

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Eduarda Maievskyi'ego pod tytułem  
**“Comparative studies of energy dissipation minimum in BSCCO-2223 and YBCO-123  
HTS tapes”**

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska dotyczy zjawisk dyssypacji energii w komercyjnych taśmach nadprzewodnikowych, otrzymanych na bazie nadprzewodników wysokotemperaturowych. Jest to obecnie jedno z ważniejszych zagadnień z pogranicza fizyki nadprzewodnictwa oraz przyszłych zastosowań technologii nadprzewodnikowej. Praca doktorska została wykonana w Oddziale Niskich Temperatur i Nadprzewodnictwa Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Promotorem rozprawy jest dr hab. Marian Ciszek.

Całkowity dorobek naukowy Doktoranta obejmuje artykuły opublikowane w IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 8200504 oraz *ibidem* **25** (2015) 6800704, Acta Phys. Polon. A **130** (2016) 527, Metrol. Meas. Syst. **XXI** (2014) 293. Wyniki Doktoranta były również przedstawiane podczas konferencji w formie prezentacji plakatowych oraz krótkich wystąpień ustnych. Rozprawa doktorska składa się z wprowadzenia, sformułowania celu pracy oraz z czterech zasadniczych rozdziałów, po których umieszczono podsumowanie w wersji angielskiej i polskiej, listę symboli, wykaz literatury oraz podziękowania. Rozprawa została przygotowana starannie, układ tekstu jest logiczny i merytorycznie uzasadniony, Doktorant popełnił jednak trochę błędów językowych oraz edytorskich.

Cel rozprawy został przez jej Autora określony bardzo precyzyjnie – jest nim zbadanie elektromagnetycznych właściwości taśm z nadprzewodników wysokotemperaturowych ze szczególnym uwzględnieniem efektu minimum strat energii w zmiennym polu magnetycznym. Aby założony cel osiągnąć, musiał on zbudować unikalny układ pomiarowy, wykonać pomiary oraz przeprowadzić modelowanie numeryczne zaobserwowanych zjawisk.

Dwa pierwsze rozdziały rozprawy mają charakter wprowadzający. Doktorant omawia w nich podstawowe zagadnienia z dziedziny fizyki nadprzewodników, najczęściej stosowane nadprzewodniki wysokotemperaturowe oraz metody produkcji taśm nadprzewodnikowych. Zjawiska dyssypacji energii zmiennego pola magnetycznego w nadprzewodnikach wyjaśnia

w ramach modelu stanu krytycznego w ujęciu Brandt'a-Indenboma. Jak zauważa Doktorant, uzyskanie dobrej jakości, niskostratnych taśm z nadprzewodników wysokotemperaturowych, w znaczący sposób wpłynęłoby na rozwój wielu dziedzin współczesnej cywilizacji. Alternatywnym sposobem pozwalającym obniżyć dyssypację energii jest wykorzystanie wspomnianego wcześniej efektu minimum strat. W rozdziałach tych omówiono większość problemów związanych z tematyką rozprawy, zabrakło w nich, niestety, obszerniejszej dyskusji niektórych zagadnień związanych ze zjawiskiem dyssypacji energii w nadprzewodnikach, jak: rodzaje centrów kotwiczenia wirów (defekty punktowe, kolumnowe, rozciągłe), mechanizmy kotwiczenia (kotwiczenie kolektywne, kotwiczenie powierzchniowe), czy też linii nieodwracalności omówionej tutaj jedynie pobieżnie.

Eksperymentalne zbadanie wartości prądów krytycznych, dyssypacji energii w zmiennym polu magnetycznym oraz efektu minimum strat wymagało zaprojektowania i zbudowania unikatowego układu pomiarowego. Zagadnieniom tym poświęcony jest trzeci rozdział rozprawy. Doktorant bardzo rozsądnie zaproponował, aby nie rozdzielać obwodów prądu stałego i zmiennego, a do wytwarzania pola magnetycznego użyć wspólnego elektromagnesu. Takie rozwiązanie pozwoliło uniknąć problemów ze wzajemnym sprzężeniem cewek oraz obniżyć rozmiary elektromagnesu. Separację zasilacza mocy AC zapewniono stosując kondensator. Zrezygnowano natomiast z użycia dławika w obwodzie zasilacza DC, którego budowa byłaby niepraktyczna. Problem ładowania się kondensatora separującego przez składową stałą prądu, powodujący niekorzystne zmiany punktu pracy zasilacza AC, wyeliminowano stosując element całkujący umieszczony w pętli sprzężenia zwrotnego. Właściwy dobór wartości transmitancji zasilacza AC zapobiegał natomiast jego wzbudzeniom samoistnym. Bardzo pomysłowym rozwiązaniem było zastosowanie specjalnego układu, pozwalającego eliminować niepożądane „przebiecia” pojawiające się na wyjściu zasilacza AC. Wpływ składowej zmiennej na pracę zasilacza DC ograniczono natomiast stosując dużą oporność wyjścia. Najważniejsza uwaga, którą mam do tej części rozprawy dotyczy opisu uchwytu dla taśm, w którym nie podano odległości i powierzchni elektrod. Parametry te są bardzo istotne dla poprawnych pomiarów prądów krytycznych.

Ostatni rozdział zawiera wyniki badań eksperymentalnych oraz modelowania zaobserwowanych zjawisk metodą elementów skończonych. Do pomiarów Doktorant użył komercyjnej taśmy nadprzewodnikowej „I generacji” produkcji Sumitomo wytworzonej w oparciu o tlenki bizmutu BSCCO-2223 oraz taśmy „II generacji” firmy SuperPower otrzymanej na bazie nadprzewodnika z ziemią rzadką REBCO-123. Badania mikrostruktury

i składu pierwiastkowego przeprowadzone przez Doktoranta za pomocą mikroskopii elektronowej SEM oraz spektroskopii dyspersji energii EDS, ujawniły w taśmie I generacji niejednorodność filamentów nadprzewodzących oraz liczne przerosty poprzez rozdzielającą je srebrną matrycę. Warstwa nadprzewodząca w taśmie II generacji była natomiast bardzo jednorodna i wytworzona z nadprzewodnika zawierającego gadolin. Wykonano szereg pomiarów zależności prądów krytycznych od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego oraz od jego kierunku względem powierzchni taśm. Zmierzone wartości, przy zastosowaniu kryterium limitu napięcia  $E=E_c=10^{-4}$  V/m były zgodne ze specyfikacją techniczną producentów. Zależność kąta prądów krytycznych dla taśmy I generacji wykazywała symetrię eliptyczną, związaną z uporządkowaniem warstw nadprzewodzących, których oś krystalograficzna  $c$  była prostopadła do powierzchni taśmy. Bardzo ciekawy wynik, uzyskano natomiast dla taśmy II generacji, którą cechowała asymetryczna zależność prądu krytycznego względem orientacji pola. Takie zachowanie Doktorant wyjaśnił zakładając występowanie dyslokacji powodujących skręcenie płaszczyzn  $ab$  nadprzewodnika.

Najistotniejszym celem rozprawy było zbadanie efektu minimum strat w zmiennym polu magnetycznym, który występuje po przyłożeniu do nadprzewodnika stałego pola magnetycznego, współosiowego z polem zmiennym. Pomiary dyssypacji energii oraz urojonej podatności dla taśmy I generacji wykazały, iż straty zależą niemonotonicznie od amplitudy pola zmiennego, a dla słabych pól zmiennych związane są z prądami brzegowymi oraz efektem płynięcia strumienia magnetycznego. Położenie i wartość maksimum podatności natomiast praktycznie nie zależały od amplitudy pola zmiennego. Podobne wyniki otrzymano dla taśmy II generacji, jednakże w tym przypadku straty wzrastały monotonicznie wraz z amplitudą pola zmiennego. Efekt minimum strat zaobserwowano dla obu rodzajów taśm. Występował on po przyłożeniu stałego pola magnetycznego o wartości wyższej niż pewna wartość progowa i był zależny od historii magnetycznej taśm. Obserwowane zmniejszenie wartości strat energii wynosiło około 10 %.

Do modelowania rozkładów strumienia magnetycznego oraz prądu w nadprzewodniku Doktorant użył metody elementów skończonych wraz z modelem Gömöry'ego [Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 034017], w którym rozważa się odpowiedni funkcjonal  $A-\phi-j$  wyrażony przez magnetyczny potencjał wektorowy  $A$  oraz potencjał elektryczny  $\phi$  z uwzględnieniem cechowania kulombowskiego. Potencjał wektorowy unormowany jest przy tym tak, aby jego wartość  $A'$  zniknęła w tzw. „strefie neutralnej”, w której pole elektryczne  $E$  jest zawsze równe zeru.

Wyniki pomiarów prądów krytycznych taśm zostały zinterpretowane w ramach anizotropowego modelu Kim'a [F. Gömöry, B. Klinčok, Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) 732]. Wybór takiej postaci modelu stanu krytycznego, uważam za bardzo trafny. Można, bowiem wykazać, że inne znane modele, są jego szczególnymi przypadkami. Model ten pozwolił bardzo dobrze wyjaśnić obserwowane w taśmie I generacji zależności prądów krytycznych od natężenia i kierunku pola magnetycznego, a przy założeniu, że kierunek pola lokalnego w warstwie nadprzewodnika REBCO-123 ulega pewnemu odchyleniu, również w taśmie generacji II. Stosując metodę elementów skończonych oraz podział przekroju modelowanych taśm na sieć trójkątną, Doktorant wyznaczył rozkład gęstości transportowych prądów krytycznych w taśmach oraz strumienia magnetycznego w ich otoczeniu. Przyjęty model jest jednakże na granicy stosowalności, ponieważ „strefa neutralna” zaczyna zanikać, gdy przez nadprzewodnik płynie prąd transportowy o natężeniu krytycznym. Nie jest zatem dokładnie spełnione jedno z założeń modelu. Wykonanie powyższych obliczeń wymagało dobrego przygotowania teoretycznego oraz znajomości technik numerycznych. Na tej podstawie z przekonaniem mogę stwierdzić, że Doktorant „*wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną... w danej dyscyplinie naukowej*”.

Aby wytłumaczyć pochodzenie efektu minimum strat oraz wpływ wspólnego pola stałego, Doktorant zastosował metodę elementów skończonych wraz z modelem dyssypacji energii w nadprzewodnikach sformułowanym przez Campbella [A.M. Campbell, Supercond. Sci. Technol. **20** (2007) 292], uzyskując dobrą zgodność symulacji z wynikami pomiarów strat energii oraz urojonej podatności dla obu badanych taśm. Model ten również jakościowo poprawnie opisywał zaobserwowane w taśmach minima strat oraz ich zależności od amplitudy pola zmiennego i stałego. Jest to niezwykle ciekawy rezultat, gdyż dotychczas efekt minimum strat tłumaczono procesem anihilacji wirów [J.R. Clem, J. Appl. Phys. **50** (1979) 3518]. Doktorant natomiast wykazał, iż jest on skutkiem pułapkowania strumienia magnetycznego w nadprzewodniku. Symulacje numeryczne pozwoliły także wyznaczyć pętle namagnesowania oraz rozkłady prądów i strumienia magnetycznego dla taśm I i II generacji.

Jak już wcześniej wspominałem, w rozprawie można znaleźć przykłady niezbyt udanych sformułowań oraz błędów redakcyjnych. We wstępie na stronie 2 Doktorant pisze „...production costs that causes ...”, a powinno być: „...production costs, which causes ...”, zamiast “Scientific world involved in...”, powinno być: „Scientists dealing with...”. Na stronie 3 występuje z kolei “Due to such advantage...”, a powinno być: “Due to this fact ...”, natomiast zamiast wyrażenia “So, if such trend will persist...” winno być: „If this trend

persists...”. W ostatnim akapicie strony 15 użyto wyrazu “...standing...” zamiast: “located”. Początek następnego zdania to „Another” a powinno być: „Other”. W przedostatnim zdaniu po „using” nie powinno być „of”. Żargonem jest wyrażenie na stronie 53 „...the microprocesor control system takes a decision...” oraz na stronie 55 „...the load impedance seen by the output stage...”. Na stronie 50 zamiast „Fig. 21(b)” powinno być: „Fig. 25(b)”, podobnie na stronie 51 gdzie jest „Fig. 24” zamiast „Fig. 28”. Dwukrotnie nadano ten sam numer 62 różnym ilustracjom. W streszczeniu w języku polskim również występują błędy, np. zamiast “Z punktu widzenia technik wykonania...” powinno być: “Biorąc pod uwagę techniki wykonania...”, a zamiast “Te wyniki zostały użyte...” powinno być: “Te wyniki wykorzystano...”. Należy jednak zaznaczyć, że żaden z języków, w których napisana jest rozprawa nie jest językiem ojczystym jej Autora.

Podsumowując, pan mgr Eduard Maievskyi przedstawił do recenzji bardzo interesującą rozprawę doktorską. Zaprezentował w niej pionierskie badania efektu minimum strat w taśmach z nadprzewodników wysokotemperaturowych, wykonane na zbudowanej przez siebie aparaturze, a ich wyniki wyjaśnił korzystając z symulacji numerycznych. Doktorant umiejętnie łączy zdolności praktyczne, talent eksperymentatora oraz wiedzę teoretyczną.

**Stwierdzam, że rozprawa doktorska magistra Eduarda Maievskyi’ego zatytułowana “Comparative studies of energy dissipation minimum in BSCCO-2223 and YBCO-123 HTS tapes” spełnia wymagania stawiane przez art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku „o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” oraz przez Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 października 2015 r. „w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora” i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Uwzględniając jednocześnie aktualność tematyki, szeroki zakres prac związanych z budową aparatury pomiarowej, wykonanych badań oraz przeprowadzonej analizy teoretycznej, wnoszę o uznanie pracy za wyróżniającą.

*Bartłomiej Andriejewski*