

prof. dr hab. inż. Ryszard Kacprzyk  
ul. Seweryna Wysłoucha 32  
52-433 Wrocław  
Tel. Kom. +48 603 677 693

Wrocław, dnia 26.08. 2023

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sylwii Hajdasz, zatytułowanej „**Wpływ warunków eksploatacyjnych na parametry materiałów nadprzewodnikowych przeznaczonych do zastosowań w układach nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego**”.

Recenzję przygotowano na zlecenie Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego, tytułem uchwały nr 854 z dnia 28 czerwca 2023 r.

### I. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Sylwii Hajdasz pt. „Wpływ warunków eksploatacyjnych na parametry materiałów półprzewodnikowych przeznaczonych do zastosowań w układach nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego” liczy 156 stron i obejmuje: streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim, wykaz użytych skrótów i symboli, zasadniczy tekst rozprawy, zebrany w 15-tu rozdziałach oraz bibliografię (125 pozycji). Rozprawa zawiera ponadto 98 rysunków, 17 tabel oraz dodatek.

Rozdział 1-szy zawiera wprowadzenie, ogólny przegląd literaturowy dotyczący tematu pracy, jej cel, oraz zaproponowaną tezę i zakres pracy. W rozdz. 2-gim przedstawiono skrótowo naturę fizyczną zjawiska nadprzewodnictwa, zjawisk towarzyszących, rodzaje oraz właściwości fizyczne nadprzewodników oraz parametry stosowane do opisu ich właściwości. W rozdziale 3-cim opisano zasadę działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego. Przedstawiono podstawowe typy ograniczników, metody ich chłodzenia oraz przykładowe rozwiązania stosowane w zabezpieczeniach sieci elektroenergetycznych średniego jak i wysokiego napięcia. W rozdziale 4-tym przedstawiono budowę/struktury współczesnych wysokotemperaturowych taśm nadprzewodzących (HTS) stosowanych do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu, ich właściwości elektryczne i cieplne. Rozdział 5-ty zawiera opis metod pomiarowych stosowanych do wyznaczania wartości prądu krytycznego dla taśm nadprzewodnikowych przy wymuszeniu prądem sinusoidalnym. Oszacowano w nim również dokładności i niepewności pomiarowe dla obu metod.

W rozdz. 6-tym przedstawiono układ pomiarowy, stosowany przez Doktorantkę do badań charakterystycznych prądów i napięć, umożliwiających opis stanów dynamicznych dla próbek taśm HTS oraz energii wydzielonej na próbce w trakcie jej pobudzenia impulsem probierczym. Przedstawiono budowę uchwytu dla próbek taśm HTS. Wyniki badań zależności charakterystycznych prądów i napięć na próbce taśm HTS, wydzielonej w nich energii, ich rezystancji jak i oszacowania temperatury taśm od wartości prądu wymuszającego (spodziewanego prądu zwarciovego) przedstawiono w rozdz. 7 a jego wpływ na zmianę wartości prądu krytycznego przy wielokrotnym wyjściu ze stanu nadprzewodnictwa - w rozdz. 8-ym. Wyniki badań wpływu izolacji elektrycznej na wartość prądu krytycznego taśm



HTS przy ich wielokrotnym wyjściu ze stanu nadprzewodnictwa przedstawiono w rozdz. 9-tym. Wyniki badań wpływu czasu trwania i wartości prądu wymuszającego (spodziewany prąd zwarciový) na zmianę parametrów taśm HTS (wartości prądu krytycznego, prądu udarowego, minimalnego prądu ograniczonego oraz napięcia na taśmie), przedstawiono w rozdz. 10-tym. W rozdz. 11-tym przedyskutowano możliwości zastosowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciový do zabezpieczania turbin wiatrowych (DFIG) a w rozdz. 12-tym warunki współpracy ograniczników prądu z automatyką zabezpieczeniową jak również wpływ zmian wartości prądu krytycznego taśm HTS na nastawy teŝe automatyki. Rozdział 13-ty poświęcono omówieniu wyników badań wpływu różnych czynników na czas powrotu wybranych taśm HTS do stanu nadprzewodnictwa. Badaniom strukturalnym taśm oraz składu chemicznego poszczególnych warstw poświęcono rozdział 14. Podsumowanie całości wyników badań oraz wnioski końcowe, wraz ze stwierdzeniem o udowodnieniu tezy rozprawy zawarto w rozdz. 15-tym.

## 2. Ocena najważniejszych osiągnięć doktorantki

Doktorantka w swojej rozprawie podjęła aktualny temat związany z wykorzystaniem nadprzewodników do konstrukcji ograniczników prądów zwarciových w sieciach średniego napięcia. Właściwości elektryczne komercyjnych materiałów nadprzewodzących opisane są w sposób niepełny, co uniemożliwia ich właściwe wykorzystanie we nowoczesnych konstrukcjach urządzeń takich jak ograniczniki prądu pracujące w warunkach wymuszenia zmiennoprądowego. Badania zostały ograniczone do grubowarstwowych taśm nadprzewodzących HTS 2G z warstwą nadprzewodzącą typu YBCO, pracujących w temperaturze ciekłego azotu. Zbadanie właściwości elektrycznych wymienionych materiałów w warunkach dynamicznych, (w warunkach obciążenia prądami przemiennymi o czasie trwania wymuszenia (impulsu) dobranym pod kątem przyszłych zastosowań) jak również zbadanie stabilności efektu przechodzenia ze stanu nadprzewodzącego w rezystywny i odwrotnie (badania stabilności prądu krytycznego – efekty starzeniowe), podobnie jak wpływ na efekty dynamiczne warstwy izolacji elektrycznej, są, moim zdaniem, cennymi i najistotniejszymi elementami przedstawionej pracy.

Jako parametry istotne ze względów opisu jak i konstrukcyjnych Doktorantka przyjęła, określiła i/lub zdefiniowała:

- wartość prądu krytycznego  $I_c$ , wyznaczoną w warunkach wymuszenia zmiennoprądowego (przy częstotliwości 50 Hz i czasie trwania  $t_{ii}=0,1 / 0,2$  s, w warunkach braku pola magnetycznego i dla różnych warunków chłodzenia);
- stabilność prądu krytycznego (zależność  $I_c$  od ilości przejść ze stanu nadprzewodnictwa w rezystywny - liczby działań ogranicznika prądowego, wartości prądu testującego bądź energii zgromadzonej w stanie rezystywnym);
- spodziewany prąd zwarciový  $I_{spz}$ , (prąd testowy),
- prąd ograniczony  $I_{lim}(t)$  (płynący przez próbkę w stanie rezystywnym) o amplitudzie zależnej od czasu  $t$ ;
- prąd udarowy  $I_{0max}$  (maksymalna chwilowa wartość prądu ograniczonego);
- minimalny prąd ograniczony  $I_{min}$  (amplituda prądu na końcu impulsu testującego);
- maksymalne napięcie na próbce  $U_{max}$  (amplituda napięcia na próbce w warunkach rezystywnych, na końcu impulsu testującego);
- energia wydzielona na próbce w stanie rezystywnym podczas działania impulsu testowego;

- średnia wartość amplitudy natężenia pola elektrycznego na próbce w stanie rezystywnym  $U_{drop}$ ;
- dopuszczalna wartość  $U_{drop}$ ; (z p-tu widzenia stabilności ww parametru);
- czas powrotu (próbki chłodzonej) do stanu nadprzewodnictwa;
- graniczny prąd obciążenia taśmy HTS (z p-tu widzenia osiągnięcia krótkiego czasu powrotu);
- parametry cieplne próbek oraz warstw istotnych (podłoże, w-wy przewodzące) z p-tu widzenia transportu ciepła);
- geometria próbek/taśm HTS (z izolacją cieplną i bez).

Przyjęte spektrum parametrów wydaje się być wystarczające do precyzyjnego opisu właściwości taśm HTS z p-tu widzenia ich wykorzystania do konstrukcji nadprzewodnikowych ograniczników prądu jak również doboru warunków granicznych ich stosowania. Realizacja programu badań włączającego konieczność określenia wymienionych wyżej parametrów wymagała od Doktorantki opanowania szerokiej gamy procedur pomiarowych. Badania mikrostruktury taśm HTS oraz ich zmian na skutek działania prądu ograniczanego pozwalają na częściowe zrozumienie zachodzących w nich zjawisk fizycznych w tym zmian starzeniowych.

### 3. Uwagi dyskusyjne, krytyczne oraz pytania.

1. Co autorka rozumie pod określeniem: „... gęstość ładunków nadprzewodzących ...” (str. 58, tekst nad Rys. 31).
2. Str. 72, 5 l. g. : „Ze względu na lepsze parametry elektryczne i cieplne niż Hastelloy, warstwa srebra ma decydujący wpływ na generację ciepła w taśmie HTS”. Niejasne. Proszę o rozwinięcie tematu (struktura taśm HTS wykazuje różne grubości warstw o różnej ich rezystywność).
3. Czy metody 1 i 2 opisane w p-tach 5.1, 5.2 są oryginalnym własnym osiągnięciem doktorantki, czy też ich ideę zaczerpnięto z wcześniejszych prac? Jeśli tak to z jakich? (brak odnośników literaturowych). Opis oscylogramów mało czytelny, budzący niejasności, brak siatki bądź skalowania osi - „zrzuty z ekranu” oscyloskopu są wręcz nieczytelne – patrz Rys. 50, 51.
4. Jeżeli niepewność pomiaru jest na poziomie 10% jaki sens ma podawanie wyniku pomiaru z dokładnością do 5-ciu cyfr znaczących (patrz Tab. 5, Tab. 6).
5. Uchwyt próbek taśm HTS – Rys. 53. Opis uchwytu niepełny. Biała część, stanowiąca bazę uchwytu na ww rys – została prawdopodobnie wykonana jako nieprzewodząca elektrycznie i cieplnie. Wydaje się, że w środkowej części bazy wycięto otwór (np. dla lepszego dostępu cieczy kriogenicznej) zajmujący ca. 50% długości badanej taśmy. Oznacza to, że w warunkach dynamicznych (z p-tu widzenia procesów cieplnych – inne stałe czasu) pojawiają się w efekcie dwie próbki taśmy HTS połączone szeregowo, przy czym każda z nich ma inne warunki chłodzenia. Krytyczną częścią próbki wydaje się być ta znajdująca się blisko powierzchni bazy (biała płyta). Jakiej jest zdanie Doktorantki w powyższym temacie?
6. Czy zmiana położenia uchwytu próbek taśm HTS z poziomego na pionowe powinna wpłynąć i czy wpływała na wyniki pomiaru prądu krytycznego?
7. Str. 83, 4 l. d. : „Zastosowano miedziane zaciski .... minimalny spadek napięcia ... [114]”. Jakiego kryterium „minimalnego spadku napięcia” zastosowano?

8. Doktorantka wprowadziła parametr „spodziewany prąd zwarciovowy” (str. 84, 5 l. d.) zwany dalej „impulsem prądu testowego”  $I_{spz}$ . Wartości prądów  $I_{spz}$  podano m. in. w tab. 7 – patrz kolumna  $I_{spz}$ . W jaki sposób wyznaczano/ustawiano/regulowano wartość prądu  $I_{spz}$ ? Schemat układu pomiarowego podany na Rys. 52a wydaje się być niepełny. Programowane źródło napięcia (IT...) winno posiadać (z definicji źródła napięciowego) impedancję wewnętrzną bliską (w przypadku idealnym – równą) zeru. Podobnie z „transformatorem prądowym”. Jaki element ogranicza zatem prąd płynący przez próbkę HTS, zwłaszcza w sytuacji gdy znajduje się ona w stanie nadprzewodnictwa? Jak wartość tego prądu się ma do wartości „spodziewanego prądu zwarciovowego”?
9. Jaka może być przyczyna występowania ujemnych prądów i napięć w dodatniej połowce „wymuszenia” pokazanych na Rys. 57 a/b ? (w obszarze 8-11 ms)
10. W rozdz. 8.4. Wnioski (str. 102, 8 l. g.) napisano: Pomiary energii ... pozwalają określić dopuszczalny zakres energii i spadków napięć ... Czy zamiast energii nie lepiej byłoby podać gęstości energii [J/m<sup>2</sup>] w przeliczeniu na pole powierzchni przez którą następuje transport ciepła (szerokość taśmy x jej długość)?
11. Nie jest jasne czym się różni  $I_{HTS}$  od prądu ograniczanego  $I_{lim}$  oraz  $U_{HTS}$  od napięcia  $U$  (patrz rozdział 6). Dla Rys. 82a - podpis – „brak powrotu do nadprzewodnictwa”, jeśli tak to dlaczego dla  $t > t_p$  napięcie  $U_{HTS} = 0$ ?

#### 4. Uwagi redakcyjne

- Str. 22, 6 linia (l) od dołu (d) – wymagania dla: taśm HTS przeznaczonych do konstrukcji NOPZ – pierwszy skrót ang., drugi – polski. – winno być uporządkowane językowo.
- Str. 28, 4l. d. : wpływ ... winno być: (np.) Określenie/zbadanie wpływu ... (patrz zdanie wstępne dla całego akapitu z wyliczeniem;
- Str. 29, p-t 3 i 4 (13 i 15 l. g.): jak wyżej;
- Str. 29, 8 l. g.: wartość, winno być: – wartości;
- Str. 29, 12 g.: bezpieczny zakres – bezpiecznego zakresu;
- Str. 38, 15 l. g.: ... wir prądu istniejący ... – wir prądu nadprzewodnictwa istniejący ...;
- Str. 38, pod zależnością (5) : wektor gęstości prądu – prądu nadprzewodnictwa;
- Str. 39, nad rys. 10 . Mechanizm wnikania .... Rysunek nie przedstawia mechanizmu!
- Str. 40, 1 l. g. Równanie (11) ... wzrostem gęstości nośników .... Lambda L jest głębokością wnikania – patrz rys. 10, zależność (10), wymiar [m], gęstość ma wymiar [m<sup>-3</sup>];
- Str. 40, 15 l. g.: ... długością – długość;
- Str. 40. 3 l. d. : pod zależnościami (13) i (14) brak znaczenia symbolu fi-zero (kwant strumienia m);
- Str. 42, 5 l. d. : W teorii BCS na ... , winno być bez „na”;
- Str. 51, Rys. 22 - rysunek niejasny, cewka wzbudzające ... - wzbudzająca;
- Str. 53, Rys. 25, podpis: Chłodzie ... - Chłodzenie ...;
- Str. 55. 9 l. d. : Ciepło z nadprzewodnika ... nadprzewodniku. Brak zdania „Co dalej z ciepłem?”;
- Str. 58, Rys. 31. Brak na rysunku atomów bizmutu.
- Str. 59, Rys. 32. Źle umiejscowione wskaźniki - linie dla elementów taśmy HTS 1G.
- Str. 61, pod tab. 2. „Hastelloy ... o dużej rezystywności .... Małymi stratami przy przepływie prądu .... [105]”. Powstaje pytanie: „Jak to możliwe?”
- Str. 62, Jaki cel ma umieszczenie Rys. 36 ?;
- Str. 63, 4-5 l. g. : ...cyrkonu baru (BZO) ..., Obawiam się, że nie ma takiego związku. Może chodzi o cyrkonian baru?

Str. 4

- Str. 63, Rys. 37b. niejasne skąd Ga w YBCO. W tekście wspomniano o cyrkonianach.
- Str. 64, Tab. 4. Kolumna : Taśma HTS, Co oznacza wiersz (5 wiersz od góry) „grubość”? Całkowita?
- Str. 64, Rys. 38. Brak objaśnień, brak schematu układu pomiarowego, brak ewentualnego odnośnika literaturowego z opisem;
- Str. 65, Rys. 39. Brak podstawowego opisu. Jaka długość odcinka taśmy? Jaki układ pomiarowy? Jak mierzono temperaturę? Przy jakim prądzie mierzono rezystancję? etc.
- Str. 65, Rys. 40. Co oznaczają symbole R1 – R5? Brak jednoznacznego powiązania z warstwami;
- Str. 67, Rys. 41, podpis, jest: ... temperatury dla Hastelloy ... , - temperatury dla stopu/materiału/warstwy Hastelloy ... ;
- Str. 69, Rys. 45, brak wyjaśnień i parametrów pomiaru w języku polskim; co oznacza „critical current (A/cm)”? Prąd zwykle mierzony jest w [A], opis rysunku częściowo po polsku, częściowo po angielsku;
- Str. 70/71, opisy rys. 46 i 47 – częściowo po polsku, częściowo po angielsku;
- Str. 72, Rys. 48. Brak informacji czy wykres dotyczy stanu równowagi termodynamicznej (stanu ustalonego) czy też nie.
- Str. 75, 10 l. g. ; zamiast (25) – (27) winno być (22) – (24);
- Str. 75, 5 l. d. ; zamiast (28) winno być (25);
- Str. 81, 1 l. g. : zrobieni – zrobieniu;
- Str. 82, 6 l. d.: 6V – brak informacji czy to wartość skuteczna! Patrz  $U_{max}$  na rys. 55a/b.
- Str. 82, 7 l. d.: do 1 kA – wartość skuteczna? Amplituda? – patrz str. 87, 10 l. g. : - 1170 A!
- Str. 84, 7 l. d. : jest: „przedstawiono zasadę ograniczania zwarcia” – powinno być: „przedstawiono oscylogram prądu i napięcia na elemencie HTS, w warunkach ograniczania prądu zwarcia;
- Str. 87, 10 l. d. : ... sprawdzenie. Czego?;
- Str. 93, 3 l. g.  $I_{spz}$  był ograniczany od wartości  $I_{0max}$  do wartości  $I_{min}$ .;
- Str. 95, Rys. 63. Oraz 64 , W podpisie rysunków nie podano czasu trwania impulsu;
- Str. 98/99, Opisy rys. 65/66. Jeżeli błąd odczytu z oscyloskopu jest na poziomie 3 % pełnej skali to jaki sens ma podawanie wartości prądu z dokładnością do 5 cyfr znaczących!?
- Str. 101, 6 l. g.: 158,47 J – granica wydaje się być b. ostra (5 cyfr znaczących)
- Str. 101, 8 l. g. :winno być: ... spadku .... uzależniona ...
- Str. 103, 4/2 l. d. :5 cyfr znaczących?!
- Str. 105, 10 l. d.: ... spadek wartości krytycznej (czego?) taśm ...;
- Str. 107, 2 l. g. :... cieplnych i dynamicznych ... ! – cieplne - też dynamiczne?!
- Str. 109, P-t 10.3 , 4 l. g. ... wartości spadków napięć .... Spadek napięcia podaje się w [V].  $U_{drop}$  podawane jest w [V/m] – jednostka natężenia pola.
- Str. 119. 1-3 l. g. ... przedstawiono na Rys. 74 ;
- Str. 124, p-t 13.3. brak informacji w opisie - czy izolacja elektryczna otaczała taśmę wokół, czy pokrywała ją tylko z jednej strony;
- Str. 125, rys. 79. Nie widać różnicy pomiędzy próbkami różnych taśm. Brak przekroju poprzecznego lub wzdłużnego;
- Str. 125-127, rys. 80-82, brak opisów osi na oscylogramach;
- Str. 127, 9 l. d. : Wyniki pomiarów czasu ...;
- Str. 129, 11 l. d do końca. Jakie przyjęto kryterium „szybkiego powrotu” oraz „gwałtownego wydłużenia”;
- Str. 132, 7 l. d. : „podobne wartości ... zwarcia,” komentarz: energia jak i gęstość energii są zależne od czasu,  $U_{drop}$  – niekoniecznie;

Str. 5

Str. 135, nieszczęśliwe umieszczenie kwadracika-szczegółu na lewym rysunku;  
Str. 139, Rys. 91, Podpis, „b) próbka poddana działaniu spodziewanych ...” próbka była poddana działaniu impulsu „rzeczywistego”, ograniczonego a nie „spodziewanego”?  
Str. 139, 1 i 2 l. d.: obecność obu linii w tekście niejasna;  
Str. 140, 4/l. g. zamiast „...zmierzone ...” winno być „określono”. Zdjęcia nie są miernikami;  
Str. 141, Rys. 92, Uwaga do podpisu: fotografia nie jest pomiarem.  
Str. 141, Tab. 17. Dokładność pomiarów!? Ilość cyfr znaczących.  
Str. 152, 3 l. g.: „Celem ...zainstalowania” – cały akapit nie jest jasny. Celem pracy było zbadanie właściwości parametrów czy też właściwości taśm HTS?  
Str. 154, 5 l. d. : „... azoty ...”, ma być „azotu”;  
Str. 154, 4 l. d.: „Izolacja elektryczna pośredniczy (zawsze pośredniczy - jeśli jest) w wymianie ciepła ...”, bo inaczej być nie może;  
Brak stron 155/156 w egzemplarzu wydrukowanym;  
Str. 155, 11 l. g. : „... niewystarczający ...”, winno być „zbyt długi”;  
Str. 155, 17 l. g.: „Powyżej pewnej ...nadprzewodnictwa”. Podczas przepływu prądu w taśmie, w stanie rezystywnym, energia jest zawsze wydzielana i/lub akumulowana.

## 5.Podsumowanie i wnioski końcowe

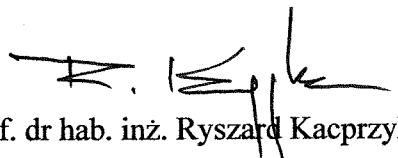
Podczas realizacji pracy Doktorantka wykazała się dużym zasobem wiedzy w zakresie rozważanej problematyki oraz należyтым podejściem do realizacji procesu badawczego, wymagającego zarówno opanowania zaawansowanych technik badawczych, jak i prawidłowego doboru procedur badawczych. Świadczy to o dobrym przygotowaniu Doktorantki do prowadzenia samodzielnych badań naukowych. Pomimo wielu uwag zgłoszonych w niniejszej Recenzji, (mają one charakter subiektywny jak i dyskusyjny) nie podważają one jednak mojej całościowej pozytywnej oceny rozprawy.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają słuszność tezy postawionej w rozdziale 1.2 rozprawy.

Tematyka rozprawy i osiągnięcia naukowe Doktorantki w zakresie badań i oceny taśm HTS z punktu widzenia ich zastosowań w konstrukcji nadprzewodzących ograniczników prądów zwarciovych w pełni lokują się w zakresie dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. Rozszerzenie wymienionej dyscypliny o Technologie Kosmiczne nie wnosi zastrzeżeń natury merytorycznej jeśli chodzi o dalsze procedowanie pracy w ramach nowej nazwy dyscypliny.

Stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska mgr inż. Sylwii Hajdasz spełnia kryteria oceny określone dla rozpraw doktorskich w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 ze zm.) i **wnioskuję o dopuszczenie** przedstawionej rozprawy **do dalszych kroków w procedurze nadawania stopnia doktora nauk technicznych** w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

Koniec

  
Prof. dr hab. inż. Ryszard Kacprzyk

Wrocław, 26.08.2023