

Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych,
Polska Akademia Nauk

ul. Okólna 2, P.O. Box 1410, 50-950 Wrocław

Prof. dr hab. Krzysztof Rogacki

Oddział Niskich Temperatur i Nadprzewodnictwa

telefon: +71 3954317, fax: +71 3441029

e-mail: k.rogacki@int.pan.wroc.pl



RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Łukasza Tomków

p.t. *"Numerical Modelling of Superconducting Components Applied in Devices
for High Energy Physics"*

Wybór tematu został określony przez aktualne potrzeby projektów NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) i FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research). Obydwa te projekty są programami międzynarodowymi mającymi na celu zbudowanie zespołów akceleratorów dużej mocy w oparciu o technologię nadprzewodnikową, m. in. wykorzystującą technologicznie dość zaawansowany przewód prądowy, tzw. kabel nuklotronowy (nuclotron-type superconducting cable). Projekt NICA dotyczy budowy zespołu akceleratorów do badania właściwości gęstej materii barionowej (np. plazmy gluonowo-kwarkowej) w Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej, planowane zakończenie budowy 2020 r. Z kolei projekt FAIR to budowa kompleksu naukowego umożliwiającego badanie antymaterii i innych, dotąd nieznanymi form materii, prawdopodobnie istniejących w początkowej fazie powstania wszechświata. Projekt FAIR jest realizowany w Centrum GSI Helmholtza w pobliżu miejscowości Darmstadt, planowane uruchomienie: 80 % możliwości - 2022 r., 100 % możliwości - 2025 r. Nie trzeba udowadniać, że są to przedsięwzięcia ważne dla ludzkości, to oczywiste, ale trzeba podkreślić, że w obydwu udział bierze Polska, a Politechnika Wrocławska aktywnie uczestniczy w realizacji projektu FAIR. Można powiedzieć, że wyniki badań otrzymane przez doktoranta dołożą cegiełkę do tej wspólnej dla nas sprawy.

Zasadniczym celem pracy było zbadanie właściwości i przeprowadzenie analizy zachowania się nadprzewodnikowego kabla nuklotronowego oraz urządzenia, w którym jest on wykorzystywany, tzw. przewodu szynowego (bus-bar), w warunkach kriogenicznej linii przesyłowej zasilającej magnesy dipolowe i kwadropolowe akceleratora SIS-100 będącego częścią wspomnianego projektu FAIR. Chodziło o zbadanie właściwości elektromagnetycznych i termicznych tych przewodów pod kątem spełnienia wymagań związanych głównie ze stabilnością wiązki cząstek i bezpieczeństwem pracy akceleratora. Ponieważ nadprzewodniki są materiałami wykazującymi nieliniowe charakterystyki magnetyczne, analiza stosunkowo złożonych geometrii, jakimi są kable nuklotronowe, wymaga użycia metod

W9/273
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
30-05-2017
Wpłynęło dnia

numerycznych. Z uwagi na znaczenie wyniku, metody takie powinny być w pełni przetestowane ze względu na ich wiarygodność i adekwatność do realizacji założonych celów. W recenzowanej pracy dokonano tego przez porównanie otrzymanych wyników z rezultatami metody analitycznej oraz, co najważniejsze, z wynikami eksperymentalnymi.

Praca napisana jest jasno, ładną, zrozumiałą i precyzyjną angielszczyzną, nie zawiera błędów merytorycznych i nie budzi wątpliwości, poza drobnymi wyjątkami, które przytoczę w dalszej części recenzji.

Doktorant sformułował szereg zadań, które należało zrealizować by osiągnąć zamierzony cel. Przede wszystkim należało opracować metodę numeryczną do zbadanie właściwości dwóch rodzajów ekranów pola magnetycznego, z uwagi na nadprzewodnictwo zamkniętego i otwartego, oraz pokazać, że uproszczenia zastosowane przy formułowaniu modelu struktury badanych przewodów nie wpłyną znacząco na wyniki badań. Ważną konsekwencją modelu są wartości indukcyjności i pojemności przewodu, które powinny zawierać się w granicach oczekiwanych dla rzeczywistego układu by zapewnić odpowiednio niski poziom zakłócającego wpływu przewodów na siebie. Kolejnym postawionym zadaniem było pokazanie, że prawidłowy opis właściwości cieplnych nadprzewodnikowego kabla nuklotronowego jest w ramach stosowanej metody numerycznej możliwy, ale wymaga analizy właściwości elektromagnetycznych i cieplnych poszczególnych włókien. Należy tu zaznaczyć, że charakterystyki cieplne nadprzewodnikowej linii przesyłowej są bardzo ważne, ponieważ pozwalają określić ryzyko nagłego wygaszenia nadprzewodnictwa i związanego z tym poważnego uszkodzenia linii oraz połączonych z nią urządzeń. Trzeba przyznać, że doktorant i promotor postawili sobie, jak na jedną pracę doktorską, zadanie bardzo ambitne. W jakim stopniu udało im się je zrealizować przedstawię w dalszej części recenzji.

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, obszernej bibliografii (143 pozycje) oraz informacji uzupełniających przedstawionych w 3 krótkich podrozdziałach. Przejrzysty spis treści poprzedzony jest listą ponad 200 (!) symboli. W rozdziale I autor przedstawia scenę, na której odbywa się jego przygoda z nauką, a ściślej z nadprzewodnictwem, i pokazuje jak ważnymi i zarazem użytecznymi zagadnieniami będzie się zajmować. Dalej jasno i odważnie formułuje tezy rozprawy, które będzie chciał udowodnić, a następnie krótko omawia wszystkie rozdziały.

Rozdział II jest zgrabnym wstępem do nadprzewodnictwa, słusznie ograniczonym do zagadnień potrzebnych do zrozumienia prowadzonych badań i analizy wyników. W rozdziale tym nie znalazłem błędów, może jedynie pewne nieścisłości, które chciałbym wskazać i ew. z doktorantem przedyskutować. Wymieńmy kilka z nich:

- 1) Wymieniając laureatów nagrody Nobla z dziedziny nadprzewodnictwa doktorant wskazał również laureatów, którzy nagrodę otrzymali za nadciekłość (Piotr Kapica, David Lee, Douglas Osheroff i Robert Richardson). I chociaż obydwa zjawiska mają wspólny pierwiastek, zwykle je rozdzielamy.
- 2) Nie do końca rozumiem zdanie: "It is surrounded by shielding current leading to the decrease of magnetic field and increases of the density of superelectrons.". Pomijając

drobny błąd językowy, chciałbym spytać, o jaki *wzrost gęstości* „super-elektronów” autorowi chodzi?

- 3) Na stronie 6, 8. wiersz od góry, i na stronie 11, 1. wiersz po równaniu 2.25, określone są właściwości odległości koherencji dla nadprzewodnictwa. Moim zdaniem, w pierwszym przypadku (str. 6) należałoby użyć zwrotu „minimalna odległość”, na jaką może zmieniać się parametr porządku, natomiast w drugim przypadku (str. 11) słowo „maximum” nie może być użyte. Chciałbym wiedzieć, czy doktorant się ze mną zgadza.

I jeszcze uwaga: szkoda, że omawiając teorie Ginzburga-Landaua i dyskutując naturę prądów krytycznych doktorant nie wspomniał o termodynamicznym prądzie krytycznym, który obok temperatury i pola krytycznego, charakteryzuje podstawowe, wewnętrzne (przyrodzone) właściwości nadprzewodnika niezależne, np., od wartości siły pinningu.

W Rozdziale III doktorant bada eksperymentalnie, analitycznie i numerycznie właściwości ekranujące dwóch typów ekranów pola magnetycznego w konfiguracji ze wspólną osią symetrii testując zarazem poprawność modelu i metod proponowanych do badań numerycznych. I chociaż głównym celem tych prac jest, można powiedzieć, przygotowanie narzędzi do realizacji kolejnych etapów doktoratu, same w sobie stanowią twórczy element działalności naukowej doktoranta, stąd omówię je dość dokładnie.

Omawiany rozdział poświęcony jest badaniom efektywności ekranowania pola magnetycznego stałego i zmiennego przez układ złożony z dwóch cylindrów o wspólnej osi i środka symetrii. Cylinder wewnętrzny, wykonany z nadprzewodnika wysokotemperaturowego (NWT) typu Bi2223, jest z uwagi na nadprzewodnictwo jednolity, natomiast cylinder zewnętrzny, wykonany z komercyjnie dostępnej taśmy typu YBCO, zawiera szczelinę. Układ taki zwiększa efektywność ekranowania, ale utrudnia analizę teoretyczną z uwagi na sprzężenie elektromagnetyczne pomiędzy ekranami. Wpływ takiego sprzężenia nie został w pracy uwzględniony, chociaż przyznaję, byłoby to trudne i nie wiem na ile użyteczne. Proponowany zestaw ekranów został wstępnie zbadany eksperymentalnie w pracy magisterskiej doktoranta. Badania wykonane w ramach doktoratu są w pewnym sensie kontynuacją tamtej tematyki, ale na zdecydowanie wyższym poziomie i w znacznie szerszym zakresie. Otrzymane w pracy doktorskiej wyniki pokazały, że gęstość prądu w ekranie z nadprzewodnikowej taśmy YBCO (ekran ze szczeliną) jest znacznie mniejsza niż w ekranie z Bi2223 (ekran jednolity). Doktorant tłumaczy to problemami w zasadzie technicznymi, związanymi z wielkością elementu siatki użytej w obliczeniach numerycznych w porównaniu z grubością ekranu. Wydaje się jednak, że obserwowane różnice w wartościach prądów płynących w obu ekranach są rzeczywiste i mogą być spowodowane rozkładem prądów ekranujących płynących w ekranie ze szczeliną normalną. I tu chciałbym zadać pytanie: *jak wygląda rozkład takich prądów w polu zewnętrznym niższym od H_{c1} ?*

Kolejnym zagadnieniem, które chciałbym krótko omówić, jest przedstawiona w podsumowaniu Rozdziału III analiza możliwych przyczyn obserwowanej anomalnej zależności efektywności ekranowania pola magnetycznego przez ekran ze szczeliną od wartości oporności szczeliny (złącze w stanie normalnym). Autor większą efektywność

ekranu z mniejszą powierzchnią złącza normalnego, czyli zakładaną (nieznaną) większą opornością tego złącza, tłumaczy możliwą różną jakością połączenia i/lub niejednorodnością samego ekranu. Wydaje się, że wiele wątpliwości można by tu usunąć stosując lepiej zdefiniowane/powtarzalne warunki łączenia taśm o znanych/zmierzonych parametrach. „Lepiej zdefiniowane warunki łączenia” to, np., lutowanie w określonej temperaturze i pod określonym ciśnieniem mechanicznym. Z kolei prąd krytyczny odpowiednio długiego fragmentu taśmy użytej do zbudowania ekranu można by zmierzyć w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur we Wrocławiu, gdzie możliwe są pomiary przy użyciu prądów stałych do 200 A, w polach stacjonarnych do 17 T lub dla prądów impulsowych do 2 kA, w polach impulsowych do 50 T.

Rozdział IV poświęcony jest właściwościom tzw. otwartego ekranu nadprzewodnikowego przeznaczonego do zastosowania w układzie elektronowego chłodzenia wiązki cząstek w akceleratorze. Efektywność takiego układu zależy m.in. od jednorodności i stabilności pola magnetycznego wykorzystywanego w procesie chłodzenia. Wysoką jednorodność i znaczne ograniczenie zakłóceń zewnętrznych (stabilność pola) stosunkowo łatwo osiągnąć poprzez użycie ekranów nadprzewodnikowych. Doktorant bada właściwości ekranu wykonanego z nadprzewodnikowych taśm typu YBCO 2. generacji (2G) stosując obliczenia numeryczne. Poprawność modelu użytego do zbadania właściwości ekranujących pojedynczej taśmy sprawdzono poprzez porównanie wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi dostępnymi w literaturze. Szkoda, że zadowolono się jedynie stwierdzeniem o zgodności rezultatów bez pokazania ich na wspólnym rysunku.

W wyniku przeprowadzonych badań autor otrzymał i przedstawił graficznie szereg zależności opisujących rozkład pola magnetycznego w układzie „magnes - otwarty ekran nadprzewodnikowy”. Przedstawione wykresy mają ważne znaczenie praktyczne; m.in. pozwalają projektować urządzenia o kontrolowanych właściwościach stosowane do ekranowania i/lub polepszania jednorodności pola magnetycznego. Autor będąc świadomym przybliżeń i ograniczeń, jakie niesie z sobą zastosowany model, krytycznie omawia otrzymane wyniki. I chociaż wyniki te są intuicyjne dla specjalistów, również dla autora, który teraz już jest wybitnym specjalistą w tym zakresie, pozwalają na ilościowy opis właściwości badanych ekranów, co z uwagi na projekty takie jak NICA czy FAIR wydaje się bardzo ważne, powiem, nie do przecenienia.

W rozdziale V badano nadprzewodnikowy przewód szynowy (tzw. bus-bar), który służy do przesyłania prądu o dużym natężeniu i jest stosowany np. w synchrotronie SIS-100 projektu FAIR. Przewód ten składa się z dwóch kabli o konstrukcji nuklotronowej z wbudowanymi elementami dylatacyjnymi, co utrudnia analizę układu zwiększając wielość zjawisk elektromagnetycznych wpływających na jego pracę. Rozpatrywano rozkład pola magnetycznego wokół kabla i gęstości prądu nadprzewodzącego w kablu stosując dwa elektromagnetyczne modele z różnym stopniem uproszczenia konstrukcji kabla. Model pierwszy uwzględnia wewnętrzną strukturę części kabla, przez który płynie prąd - 23 włókna z nadprzewodnika NbTi o średnicy 0.8 mm każde, natomiast model drugi zakłada jednolitą, zwartą strukturę tego obszaru. Dla obydwu modeli rozkład pola magnetycznego przy

powierzchni kabla i dalej jest praktycznie taki sam. Rozkład gęstości prądu w kablu jest dla tych modeli oczywiście bardzo różny. Uwzględnienie dyskretnej struktury obszaru, przez który płynie prąd, jest konieczne dla zbadania zjawisk zachodzących wewnątrz kabla, np. strat energetycznych, czy zjawisk cieplnych, natomiast model „jednolitego obszaru” jest wystarczająco dobry dla określenia sytuacji występującej na zewnątrz kabla. Dalej autor bada wzajemne oddziaływanie pomiędzy kablami w przewodzie szynowym, uwzględniając ich pojemność i indukcyjność, stosując modele 2 i 3 wymiarowe, odpowiednio dla fragmentu prostego (liniowego) i z obszarem dylatacyjnym. Rozdział zamykają badania prądów wirowych indukowanych w obudowie przewodu szynowego. Praktycznym wynikiem tych badań jest propozycja podziału obudowy na 2 części, w określony sposób, w celu minimalizacji strat energetycznych związanych z prądami wirowymi.

Rozdział VI dotyczy zagadnień termicznych nadprzewodnikowego przewodu szynowego na przykładzie przewodu zastosowanego do zasilania synchrotronu SIS-100, z rozszerzeniem na planowany synchrotron SIS-300. Analizowane są źródła ciepła, np. promieniowanie elektro-magnetyczne, szybkie magnesowanie nadprzewodnika (AC losses), czy też prądy wirowe, oraz związane z tym ryzyko wystąpienia zjawiska wygaszenia nadprzewodnictwa (tzw. quenching). Autor omawia podstawy zjawiska i określa proporcje pomiędzy wartościami krytycznymi pola i gęstości prądu dla używanego nadprzewodnika a wartościami stosowanymi w urządzeniu. Rozważania ilustruje sugestywnym diagramem fazowym B-J, niestety obciążonym błędami wydruku. Dalej autor formułuje i omawia model linii przesyłowej typu „by-pass” oraz model układu „włókno nadprzewodnikowe umieszczone pomiędzy elementem chłodzącym a ekranem zewnętrznym”. Symulując warunki panujące w linii przesyłowej, w tym przepływy ciepła pomiędzy helem a obszarem chłodzonym, otrzymuje rozkład temperatury zarówno wewnątrz włókna jak i w linii przesyłowej. W obliczeniach nie uwzględniono oporu Kapicy na granicy ciekły hel-metal, co mogłoby zmienić otrzymane wyniki. Wprawdzie opór Kapicy rośnie dramatycznie dopiero w temperaturach poniżej 1 K, ale brakuje mi wzmianki o ew. wpływie tego zjawiska na przedstawione wyniki. Ciekawym osiągnięciem badań numerycznych są charakterystyki pokazujące dynamikę zmian rozkładów temperatury w pojedynczym włóknie. Co prawda istnieje tu ryzyko uzyskania wyników nieprawdziwych, spowodowanych np. zbyt wieloma uproszczeniami zachodzących procesów i ograniczeniami użytego numerycznego modelu, ale doktorant zdaje sobie z nich sprawę i potrafi temu zaradzić: patrz np. omówienie wyników przedstawionych na Rys. 6.13.

Analizę zjawisk termicznych występujących w linii przesyłowej typu „by-pass” uzupełniono wyliczeniami ciepła generowanego przez prądy wirowe w obudowie przewodu szynowego. Zbadano rozkład tego ciepła w obudowie całkowitej (ciągłej) i w obudowach połówkowych, dla których efekt działania prądów wirowych jest słabszy. Obliczenia analityczne oraz numeryczne wykonane w oparciu o modele 2D i 3D dają podobne wyniki. Analiza zjawisk termicznych zachodzących w linii przesyłowej typu „by-pass” pokazała, że dostarczona do układu ilość ciepła wyraźnie mieści się w ramach założonego limitu. Wyniki można podsumować stwierdzeniem o znikomym prawdopodobieństwie wystąpienia zjawiska

wygaszenia nadprzewodnictwa w przewodzie szynowym o parametrach zastosowanych w pracujących lub planowanych urządzeniach akceleratorów projektów NICA i FAIR.

W Rozdziale VII zawarto szczegółowe, jasne omówienie wszystkich najważniejszych wyników i przedstawiono końcowe wnioski. Gdyby chciał podsumować wyniki jednym zdaniem, można by powtórzyć za doktorantem: badania pokazały, że analiza prostych układów ekranujących przeprowadzona metodami numerycznymi dostarczyła wiarygodnych wyników ilościowych opisujących właściwości złożonych systemów nadprzewodnikowych. To tylko tyle, ale i aż tyle.

Wszystkie rozdziały zawierają zwięzłe, logiczne wprowadzenie do zagadnień związanych z realizowanymi badaniami. Wprowadzenie to dotyczy zarówno zjawisk fizycznych, charakteryzujących te zagadnienia, jak i praktycznego wykorzystania spodziewanych wyników. Należy podkreślić, że jest to prawdziwie skuteczny sposób prezentacji tzw. badań stosowanych, oczekiwany tak przez społeczeństwo, jak i przez instytucje, które badania te finansują.

W ocenianej rozprawie uwagę zwraca dojrzałość doktoranta w podejściu do formułowania celów badawczych i proponowania metod ich realizacji. Musze też wyznać, że wręcz zachwyca bardzo wysoki poziom wiedzy na temat badanych zjawisk i zagadnień oraz logika i precyzja, z jaką opisywane i dyskutowane są stosowane metody i wyniki prowadzonych prac, włączając krytyczną ich ocenę. Bardzo podobał mi się wstęp omawiający zagadnienie modelowania numerycznego. Doktorant dyskutuje możliwość pojawienia się błędów, powstałych na skutek „zbytniego uproszczenia rzeczywistości”, czyli związanych z idealizacją zjawisk fizycznych, oraz wskazuje sposób wykrycia i wyeliminowania tych błędów. Jednocześnie pokazuje, że stosowanie uproszczeń jest tu konieczne z uwagi na złożony charakter badanych zjawisk i brak pełnego ich wyjaśnienia. Miedzy innymi, w niektórych przypadkach, specyfika procesów zachodzących w nadprzewodnikach wymaga do opisu zastosowania jednocześnie dwóch modeli, elektromagnetycznego i termicznego, dodatkowo uwzględniającego dynamikę zjawisk cieplnych. Trzeba przyznać, że doktorant poradził sobie z tym problemem znakomicie.

Powtórzę teraz pytania, które sformułowałem w recenzji, i poproszę doktoranta o ustosunkowanie się do nich:

- 1) Jak wygląda rozkład prądów ekranujących w ekranie z taśmy (ze szczeliną) w polu zewnętrznym niższym od H_{c1} , równoległym do powierzchni ekranu (wzdłuż ekranu)?
- 2) Jaki jest fizyczny mechanizm obserwowanego wzrostu skuteczności ekranowania pola magnetycznego wraz ze wzrostem częstości tego pola, czyli częstości ekranującego prądu?
- 3) W obliczeniach rozkładów temperatury wewnątrz włókna nadprzewodnikowego kabla nuklotronowego oraz, w konsekwencji, w linii przesyłowej typu „by-pass” nie uwzględniono oporu cieplnego na granicy hel-metal, co mogłoby zmienić te rozkłady. Jaki mógłby być wpływ zjawiska oporu cieplnego występującego na granicy faz gazowy/ciekły hel - metal na otrzymane wyniki?

I na koniec chciałbym jeszcze spytać o rzecz związaną z podstawami, dodam zaawansowanymi, dotyczącymi natury nadprzewodnictwa, którą doktorant skrótowo, ale bardzo ładnie opisuje we wstępie do rozprawy. Jak wiadomo, w stanie nadprzewodzącym elektrony tworzą nierozpraszające się pary (pary Coopera) oddziałując z fononami. Pytanie brzmi: jak to możliwe, że pary Coopera istnieją również w temperaturze zera bezwzględnego (z wielu względów musimy założyć, że tak jest), gdzie nie ma fononów?

W recenzowanej rozprawie wystąpiły drobne błędy redakcyjne i uchybienia techniczne, które co prawda nie osłabiają walorów merytorycznych pracy, ale chciałbym przynajmniej niektóre z nich wymienić z obowiązku recenzenta oraz w przekonaniu, że pomoże to doktorantowi w redagowaniu prac naukowych. Są to:

- 1) W spisie symboli brakuje opisu: B_b , B_e , B_i , B_m . Znaczenia tych symboli można się domyślić, ale wymieniam je, chociażby z obowiązku recenzenta.
- 2) Na kilku rysunkach brakuje oznaczeń. Dla przykładu wymienię: Rys. 2.6, 2.8, 2.9, 3.1, 3.2, 6.2 i 6.6. Czasami jest to związane z błędami wydruku, ale nie zawsze. Odczytanie Rys. 6.6 utrudnia brak skali (w kolorze) dotyczącej gęstości prądu krytycznego.
- 3) Dla kilku rysunków brakuje jednostek, w jakich przedstawione są wymiary. Dotyczy to, np., Rys. 3.12, 3.13 i 6.7 (wymiary domyślnie w [m]) oraz Rys. 3.4, 4.6, 5.13-5.15 i 5.6 (wymiary domyślnie w [mm]).

Podsumowując, doktorant badał w pracy zdolność ekranowania pola magnetycznego przez różnego typu ekrany nadprzewodnikowe o konstrukcji przydatnej dla konkretnych rozwiązań niektórych urządzeń akceleratorów cząstek elementarnych budowanych w ramach projektu NICA w Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej oraz projektu FAIR w okolicach Darmstadt. Wyniki badań mogą być również przydatne dla projektowania efektywnych ekranów pola magnetycznego w systemach pomiarowych, np. wykorzystujących magnetometrię SQUID-owe, oraz diagnostycznych, np. obrazowania za pomocą rezonansu magnetycznego (MRI). Autor postawił sobie szereg ambitnych celów, które realizował stosując naukowe, profesjonalne podejście, niczym doświadczony, wytrawny badacz. Analizę układów ekranujących pole magnetyczne rozpoczął od konstrukcji stosunkowo prostych, które sam mógł zbadać eksperymentalnie lub użyć wyników istniejących w literaturze. Dla układów tych zbudował dwu i trójwymiarowe modele i ułożył program do obliczeń numerycznych nazwany wdzięcznie *SuShi*, zapewne od angielskiego sformułowania „*Superconducting Shielding*”. Dla porównania otrzymanych wyników, niektóre zagadnienia były badane również metodami analitycznymi. Stopniowo rosła złożoność badanych układów oraz stopień ich oddziaływania z otoczeniem, co rozszerzyło zakres prowadzonych analiz do uwzględniających rozkład temperatury i przepływ ciepła w konkretnych urządzeniach.

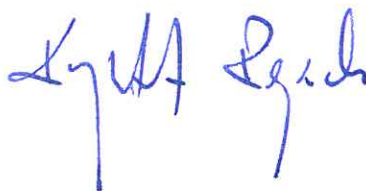
Do najważniejszych i najciekawszych osiągnięć pracy chciałbym zaliczyć:

1. Pokazanie, że dla niektórych rozpatrywanych zagadnień, modele 1 i 2 wymiarowe mogą z powodzeniem opisywać układy 3 wymiarowe, o dowolnych rozmiarach, jeśli tylko zachowana jest symetria osiowa tych układów.

2. Stosowanie przez autora różnych metod (np., numerycznej i analitycznej, magnetycznego potencjału wektorowego i „energetycznej”) i różnych modeli (1, 2 i 3 wymiarowych) w celu weryfikacji otrzymanych wyników.
3. Pokazanie, że znaczne uproszczenie modelu budowy kabla nuklotronowego nie wpływa znacząco na rozkład pola magnetycznego, nawet w dość bliskiej odległości od kabla, pomimo że rozkład prądu w kablu dla modelu „pełnego” i uproszczonego może być bardzo różny.
4. Określenie wielkości zakłóceń prądu płynącego w kablu nuklotronowym, co determinuje jakość zasilania magnesów w urządzeniach akceleratora, np. w systemie elektronowego chłodzenia wiązki jonów.
5. Oszacowanie termicznej stabilności przewodu szynowego (bus-bar) i określenie ryzyka wystąpienia zjawiska wygaszenia nadprzewodnictwa dla tego przewodu, jako elementu linii przesyłowej typu „by-pass”.
6. Zaproponowanie konkretnego rozwiązania konstrukcji zewnętrznego płaszczka przewodu szynowego w celu znaczącego obniżenia strat wywołanych prądami wirowymi.

I końcowa refleksja. Dużo można by mówić na temat szerokiego i dojrzałego podejścia doktoranta do rozwiązywania problemów powstałych na drodze realizacji celów recenzowanej pracy. Wystarczy może, jeśli powiem, że nie pamiętam by jakaś inna recenzja zajęła mi tak wiele czasu, a chciałem tylko, jak zwykle, rozprawę w całości przeczytać i zrozumieć. Aby moje słowa były właściwie odebrane dodam, że dawno już nie czytałem pracy doktorskiej z taką przyjemnością i satysfakcją, jak czyta się pracę mgr. inż. Łukasza Tomków.

Podsumowując uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa jest bardzo interesująca. Wysoki poziom szeroko zakrojonych badań świadczy o dużej wiedzy i wielkim zaangażowaniu doktoranta. Jestem przekonany, że wykonał on bardzo dobrą pracę, która w znacznej mierze przewyższa wymagania stawiane przez odpowiednią ustawę. **Składam wniosek o przyjęcie i wyróżnienie rozprawy** oraz o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Tomków do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Wrocław, 28. 05. 2017