

prof. dr hab. Jacek Sosnowski
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

Warszawa, 10 kwietnia 2017 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Tomkowa pt.

Numerical modelling of superconducting components applied in devices for high energy physics

opracowana na podstawie pisma prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gnutka, Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, nr W9/PW/354/2017 z dn. 10.03.2017 r.

1. Wybór tematu i jego znaczenie

Temat przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej poświęcony jest wykorzystaniu elementów nadprzewodnikowych w urządzeniach fizyki jądrowej. Ten bardzo aktualny wybór tematu rozprawy związany jest z uczestnictwem Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, w którym realizowana była praca doktorska, w międzynarodowym projekcie FAIR, w zakresie budowy szynoprzewodu do kriogenicznej linii bocznikującej akceleratora cząstek elementarnych SIS 100. Analizie numerycznej właściwości elektrycznych i cieplnych tego szynoprzewodu poświęcona jest główna część recenzowanej rozprawy doktorskiej. Lina bocznikująca zawiera cztery pary szynoprzewodów, które wykonane będą z kabla nadprzewodnikowego stosowanego przy budowie akceleratora Nuklotron w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnie pod Moskwą, w Rosji. Jest to bardzo oryginalny kabel zbudowany z 23 niskotemperaturowych przewodów nadprzewodnikowych Nb-Ti nawiniętych w sposób skręcony na rurkę miedzianą, przez którą płynie chłodzący kabel ciekły hel wraz z parami pod ciśnieniem,. Tak więc kabel nadprzewodnikowy chłodzony jest wewnątrz, a nie jest umieszczony w kąpeli helowej. Z kolei analizie ekranów nadprzewodnikowych, które mają być stosowane właśnie w ZIBJ poświęcone są pierwsze rozdziały rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Tomkowa. Ekran nadprzewodnikowe mogą zostać użyte w akceleratorach z uzwojeniami nadprzewodnikowymi, w tym otwarty ekran nadprzewodnikowy ma zostać użyty w systemie chłodzenia elektronowego dla rozbudowywanego obecnie akceleratora Nuklotron-NICA. Tak więc uczestnictwo Doktoranta w tej ważkiej problematyce nadaje rozprawie duże znaczenie naukowe i techniczne oraz wskazuje na jej aktualność.

2. Cel rozprawy i tezy pracy

Recenzowana rozprawa doktorska poświęcona jest analizie funkcjonowania szynoprzewodów nadprzewodnikowych w bocznikującej linii kriogenicznej akceleratora SIS 100, co jest podstawowym celem rozprawy. Weryfikacja teoretyczna parametrów elektromagnetycznych i cieplnych tych szyno-przewodów umożliwi następnie sprawdzenie prawidłowego ich działania w układzie akceleratora SIS 100, szczególnie pod względem bezpieczeństwa pracy akceleratora i stabilności wiązki jonowej. Z kolei ponieważ

własności materiałów nadprzewodnikowych opisane są przez nieliniowe charakterystyki, więc dla ich opisu, szczególnie przy bardziej skomplikowanych geometriach wymagane jest zastosowanie metod numerycznych, co właśnie prowadzono w rozprawie. Następnym celem rozprawy było sprawdzenie metodyki obliczeniowej poprzez analizę ekranów nadprzewodnikowych zamkniętych, jak też otwartych. Pewne rezultaty Doktorant otrzymał w tych przypadkach także metodami analitycznymi, szczególnie dla ekranów zamkniętych cechujących się symetrią cylindryczną, co umożliwiło porównać je z numerycznymi obliczeniami. Celem pracy było także porównanie wyników badań doświadczalnych tych ekranów z obliczeniami teoretycznymi.

Wymienione cele rozprawy pozwoliły Autorowi sprecyzować jej tezy, które zawarte są w czterech punktach:

1. Uproszczenia stosowane w modelu numerycznym złożonej struktury kabla nadprzewodnikowego nie wpływają w istotny sposób na otrzymane wartości jego parametrów elektrycznych
2. Wartości indukcyjności i pojemności linii szynoprzewodu są zgodne z wymaganiami. Sprężenia występujące w linii pozostają w założonych granicach.
3. W celu prawidłowego modelowania termicznego zachowania nadprzewodnikowego szynoprzewodu pojedyncze żyły powinny być rozpatrzone
4. Działanie nadprzewodnikowego szynoprzewodu jest bezpieczne ze względu na ryzyko wystąpienia niekontrolowanego wyjścia ze stanu nadprzewodnictwa. Odległość do przejścia nadprzewodnikowego jest dość duża, a źródła ciepła w linii nadprzewodnikowej nie prowadzą do osiągnięcia wartości krytycznych.

3. Struktura i główne osiągnięcia wymienione w rozprawie

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Tomkowa wydana przez Politechnikę Wrocławską w 2017 r. napisana została na 147 stronach, wliczając w to trzy załączniki i poprzedzona streszczeniem, oznaczeniem symboli, podziękowaniem, spisem treści. Wykaz literatury zawiera 142 pozycje literaturowe, w tym 2 artykuły napisane przy współdziałaniu Doktoranta w renomowanych czasopismach i jeden artykuł indywidualny. Rozprawa napisana została w języku angielskim, co zasługuje na podkreślenie i zwiększa jej zasięg, szczególnie w sytuacji, gdy dotyczy ona urządzeń stosowanych w fizyce wysokich energii, a więc budowanych w międzynarodowych laboratoriach, takich jak w Darmstadt w Niemczech, w ZIBJ w Dubnej, Rosja oraz w CERN-ie.

3.1 Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

Opracowanie modelu numerycznego szynoprzewodu nadprzewodnikowego i zbadanie jego charakterystyk elektrycznych

W ramach tego osiągnięcia Doktorant zbadał, w jakim stopniu zastosowane w modelu numerycznym uproszczenia skomplikowanej konstrukcji szynoprzewodu nadprzewodnikowego wpływają na obliczone pojemności i indukcyjności kabla. Stwierdził, że obliczone parametry elektryczne projektowanego szynoprzewodu nadprzewodnikowego

spełniają wymagania dostarczania prądu o odpowiedniej jakości do zasilania akceleratora nadprzewodnikowego. Autor przedstawia dwie metody modelowania kabla nadprzewodnikowego typu Nuklotronowego. Pierwszy model oparty jest na indywidualnym opisie przewodów nadprzewodnikowych z NbTi tworzących szynoprzewód, natomiast w drugim modelu stosuje przybliżenie ciągłe. Następnie Autor przeprowadza analizę charakterystyk elektrycznych całego szynoprzewodu, w tym jego pojemności, indukcyjności przy uwzględnieniu zjawisk dylatacji oraz efektów prądów przesłuchu.

Opracowanie modelu termicznego szynoprzewodu nadprzewodnikowego przewidzianego do zastosowania w bocznikującej linii kriogenicznej

Doktorant przeprowadził analizę numeryczną szynoprzewodu nadprzewodnikowego pod kątem cieplnym, w wyniku której stwierdził, że praca szynoprzewodu będzie bezpieczna, ze względu na zagrożenie występowania niekontrolowanego przejścia, po angielsku zwanego quenchem, a parametry termiczne urządzenia mieszczą się dobrze w granicach bezpieczeństwa.

Opracowanie modelu teoretycznego i częściowa weryfikacja doświadczalna działania ekranów nadprzewodnikowych

W ramach tej części rozprawy niewidocznej bezpośrednio w tezach rozprawy, natomiast wymienionej w celach, Doktorant przeprowadził analizę numeryczną i badania doświadczalne ekranów nadprzewodnikowych: zamkniętego i otwartego typu, które mają zostać zastosowane w rozbudowywanym projekcie Nuklotron-NICA, w celu uzyskania jednorodnego pola magnetycznego. Szczególnie interesująca jest analiza otwartego ekranu nadprzewodnikowego, który wpływa na osiową i radialną składową indukcji magnetycznej, a użyty ma zostać do poprawy jednorodności pola magnetycznego w procesie schładzania wiązki jonów.

Podkreślić należy, że Autor używa w obliczeniach komercyjnego oprogramowania Comsol, MatLab, jak też przygotował w ramach tego osiągnięcia własny kod numeryczny SuShi.

3.2 Omówienie rezultatów rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z 6 rozdziałów merytorycznych, wniosków i bibliografii oraz zawiera obszerną część wstępną i trzy dodatki opisujące metodykę obliczeniową i przeprowadzone badania eksperymentalne prądu krytycznego.

Pierwszy rozdział rozprawy stanowi wstęp, w którym Autor przedstawia cele i tezy pracy. Rozdział drugi poświęcony jest wprowadzeniu do zagadnień zjawiska nadprzewodnictwa, historii odkryć i jego opisu teoretycznego. Autor w zgrabny sposób prezentuje historię odkryć i podstawowe cechy zjawiska nadprzewodnictwa, nasuwa się tutaj jednak pytanie, czy tak podstawowe, podręcznikowe wiadomości są niezbędne w pracy doktorskiej. Przedstawia w tym rozdziale także zalety prowadzenia modelowania numerycznego opisu własności nadprzewodników, co związane jest z nieliniowością ich charakterystyk. Rozdział trzeci rozprawy poświęcony jest już merytorycznym zagadnieniom i dotyczy analizy zamkniętych ekranów nadprzewodnikowych, w postaci litego cylindra wykonanego z bizmutowego nadprzewodnika wysokotemperaturowego Bi-2223 otoczonego na zewnątrz

pierścieniami nawiniętymi taśmą z YBaCuO lutowaną cyną. Autor przedstawia szczegółowo konstrukcję ekranu i jego wymiary oraz metodykę pomiarową. Konstruuje numeryczny model obliczeniowy oparty na środowisku Matlab, zakładający symetrię 2D. W moim odczuciu łączenie ekranu nadprzewodnikowego lutem cynowym będącym w stanie normalnym, trochę utrudnia założenie cylindrycznej symetrii 2D. Głównym osiągnięciem tego fragmentu rozprawy jest zbadanie rozkładów gęstości prądu i indukcji magnetycznej w ekranie nadprzewodnikowym oraz zależności wartości indukcji pełnej penetracji do wnętrza ekranu od częstotliwości pola magnetycznego. Autor uzyskał dobrą zgodność zależności indukcji magnetycznej wewnątrz ekranu od przyłożonej indukcji, teoretycznie obliczoną metodami numerycznymi ze zmierzoną eksperymentalnie. Zauważyć należy, że analogiczne rezultaty Autor uzyskał także metodami analitycznymi, co wskazuje na prawidłowość obliczeń numerycznych, jednak sugeruje jeszcze celowość poprawy ich dokładności dla osiągnięcia lepszej zgodności z eksperymentem. Ciekawym efektem zaobserwowanym doświadczalnie przez Doktoranta była zależność od częstotliwości przyłożonego pola magnetycznego wartości indukcji pełnej penetracji do wnętrza ekranu nadprzewodzącego. Doktorant analizuje tutaj dodatkowe efekty ekranujące w przypadku ekranu wykonanego z nawiniętych krążków z wysokotemperaturowej taśmy nadprzewodnikowej z YBaCuO. Obserwuje wzrost indukcji magnetycznej wnikania do ekranu wraz z częstotliwością pola magnetycznego, szczególnie od wartości granicznej rzędu 10 Hz. Podaje interpretację tego efektu przyjmując, że przy pewnych częstotliwościach ekran staje się filtrem RL. Zagadnienie to wymaga jednak dalszych badań doświadczalnych i rozszerzonej analizy teoretycznej dla uzyskania zgodności modelu z eksperymentem.

Czwarty rozdział rozprawy poświęcony jest analizie otwartych ekranów nadprzewodnikowych. Ekran taki przewidziany jest między innymi do użycia w akceleratorze Nuklotron-NICA, konstruowanym obecnie w ZIBJ w Dubnie, Rosja. Użyteczny on będzie w procesie schładzania wiązki jonów, gdy wymagane jest maksymalnie jednorodne pole magnetyczne. Zapewniają to właśnie nadprzewodnikowe ekrany otwarte, które oddziałują na radialną i osiową składową indukcji magnetycznej. Koncepcja otwartych ekranów nadprzewodnikowych nie jest nowa, gdyż pochodzi ona jeszcze z czasów nadprzewodnictwa niskotemperaturowego, gdy wkładano zwiniętą folię z NbTi w środek elektromagnesu nadprzewodnikowego dla podwyższenia jednorodności pola magnetycznego. Unikano w ten sposób konieczności stosowania cewek korekcyjnych w uzwojeniach elektromagnesów nadprzewodnikowych. Autor prezentuje w tym rozdziale zasadę chłodzenia wiązki jonów z pomocą przeciwbieżnej wiązki zimnych elektronów, a jakość tego procesu zależy właśnie od jednorodności pola magnetycznego. Opisuje projekt konstrukcji otwartego ekranu nadprzewodnikowego złożonego z 28 prostych odcinków pojedynczych wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych 2 generacji, ułożonych ściśle na powierzchni karkasu, przez który przepływa chłodzona wiązka. Autor przedstawia model matematyczny taśmy nadprzewodnikowej oraz układu elektromagnesu generującego pole magnetyczne i otwartego ekranu nadprzewodnikowego. Rozpatruje dwie geometrie usytuowania ekranu względem elektromagnesów wytwarzających pole magnetyczne i oblicza składowe indukcji magnetycznej radialną i osiową w każdym z tych przypadków. Obliczenia prowadzi dla pojedynczej taśmy i całego ekranu nadprzewodnikowego złożonego z szeregu takich taśm. Uwzględnia występowanie obszarów normalnych pomiędzy taśmami nadprzewodnikowymi w ekranie. Stwierdza poprawę jednorodności indukcji magnetycznej w wyniku zastosowania ekranów nadprzewodnikowych.

Rozdział 5 poświęcony jest zgodnie z tezami rozprawy zasadniczemu zagadnieniu, czyli analizie elektromagnetycznej i termicznej szynoprzewodu nadprzewodnikowego. Szynoprzewód jest częścią składową kriogenicznej linii bocznikującej, w skład której wchodzi także przewody doprowadzające ciekły hel do elektromagnesów nadprzewodnikowych akceleratora nadprzewodnikowego i następnie odprowadzające gazowy hel. Ta linia obwodnicy kriogenicznej jest projektowana i wykonywana przez Politechnikę Wrocławską, gdzie właśnie Doktorant zrealizował swoją rozprawę doktorską. Doktorant uczestniczył w projektowaniu szyno-przewodu w międzynarodowym programie poświęconemu budowie akceleratora nadprzewodnikowego SIS 100 w ramach współpracy międzynarodowej FAIR. Akcelerator ten budowany jest w Darmstadt w Niemczech, z udziałem strony polskiej, który to udział koordynuje Uniwersytet Jagielloński w Krakowie. Bocznikujące linie kriogeniczne służą do ominięcia ciepłych miejsc w akceleratorze, który podzielony jest na sześć sekcji. Autor w swojej rozprawie modeluje pracę szynoprzewodu nadprzewodnikowego, który będzie dostarczał prąd rzędu 13 kA do akceleratora. Jest to kabel nazywany nuklotronowym, gdyż ten rodzaj kabla złożony z 23 przewodów (żył) nadprzewodnikowych z NbTi, stosowany jest właśnie w akceleratorze Nuklotron, pracującym w ZIBJ w Dubnie, Rosja. Jest to kabel skręcony (twistowany), więc pewnym przybliżeniem jest stosowanie dla takiej geometrii symetrii 2D. Dwa modele Doktorant stosuje do analizy właściwości tego szynoprzewodu: model oparty na analizie własności pojedynczych przewodów, z których wykonany jest kabel oraz model ciągły, w którym traktuje nadprzewodnikowe przewody jako ciągłą, monolityczną nadprzewodnikową warstwę.

Kolejnym osiągnięciem Doktoranta jest analiza numeryczna pojemności oraz indukcyjności układu dwóch kabli nuklotronowych, jak to ma miejsce w linii kriogenicznej zasilającej elektromagnesy nadprzewodnikowe akceleratora. Numeryczne obliczenia pojemności wykonane zostały w geometrii 2D dla liniowego kształtu szynoprzewodu. Pojemność szynoprzewodu Doktorant liczy trzema metodami (energetyczną, połową i ładunkową) i dostaje dla różnych warunków brzegowych dobrą zgodność rezultatów. Następnie Doktorant przeprowadza obliczenia indukcyjności kabla nadprzewodnikowego. Przypadek liniowego kabla liczy w przybliżeniu 2D i dostaje rezultaty zgodne z wzorem analitycznym, natomiast uwzględnienie dylatacji szynoprzewodu o kształcie Ω wymaga zastosowania już geometrii 3D. W wyniku przeprowadzonych obliczeń Doktorant otrzymuje wartości indukcyjności i wzajemnej indukcyjności pomiędzy prostymi odcinkami linii nadprzewodnikowej o długości 270 m i w 21 obszarach z występującą dylatacją. Obliczone wartości indukcyjności i wzajemnej indukcyjności szynoprzewodu służą następnie Doktorantowi do obliczenia prądów przesłuchu pomiędzy poszczególnymi liniami nadprzewodnikowymi. Obliczone prądy sprzężenia między liniami - przesłuchu są rzędu od 0.28 do 2.03 mA, co jest wartością niższą od dopuszczalnej tolerancji wynoszącej 5 mA. Rozdział 5 kończy się analizą prądów wirowych indukowanych w stalowej osłonie szynoprzewodu nadprzewodnikowego. Dla rozwiązania tego problemu Autor stosuje przybliżenia analityczne oraz prowadzi obliczenia numeryczne w pakiecie Comsol w wersji 2D i 3D. Przedstawia rozwiązania rozkładu prądów wirowych uzyskane w różnych przekrojach kabla.

Szósty rozdział rozprawy poświęcony jest analizie cieplnej szynoprzewodu nadprzewodnikowego. Autor omawia tu źródła ciepła generowanego w budowanym szynoprzewodzie do akceleratora SIS 100, podkreślając znaczenie strat mocy, zagadnienia stabilizacji i niekontrolowanego wygaszania nadprzewodnictwa. W analizie termicznej

szynoprzewodu Doktorant rozpatruje dwa modele uwzględniając ciepło doprowadzane do akceleratora z zewnątrz głównie w wyniku promieniowania oraz straty mocy generowane w szynoprzewodzie. Przeprowadza obliczenia numeryczne rozkładu temperatury w szynoprzewodzie i poszczególnych jego elementach oraz przedstawia rozkłady prądu i generowanego ciepła w żyłce nadprzewodnikowej. Ciekawy jest prezentowany na rys. 6.9 rozkład gęstości prądu w nadprzewodniku w narastającym przypadku. Czy występowanie obszarów niebieskich, określających odwrotną polaryzację prądu, związane jest z precyzją obliczeń, czy też ma znaczenie fizyczne. Dobrze byłoby porównać obliczenia z wykonanymi przy zwiększonej liczbie węzłów, co poprawiłoby dokładność rezultatów. Zastanawia również sam kształt przepływu prądu przez pojedynczy przewód nadprzewodnikowy z NbTi. Wyniki prezentowanych tutaj obliczeń pokazują, że prąd będzie początkowo płynął w jednej połowce przewodu nadprzewodnikowego, stopniowo wysycając cały jego przekrój. Doktorant prowadzi obliczenia rozkładu temperatury w szynoprzewodzie oraz w przewodzie z NbTi w funkcji czasu. Analizuje generację ciepła w funkcji natężenia prądu płynącego przez szynoprzewód. W kolejnym paragrafie Doktorant oblicza straty mocy związane z prądami wirowymi w osłonie szynoprzewodu w funkcji parametru określającego geometrię szynoprzewodu. Obliczenia prowadzi metodami numerycznymi używając programów dwu i trójwymiarowych oraz dla weryfikacji rezultatów prowadzi obliczenia analityczne. Uzyskuje dobrą zgodność rezultatów stosując wszystkie trzy metody. Przeprowadzone obliczenia wskazują, że szynoprzewód będzie pracował w bezpiecznym obszarze cieplnym i nie jest narażony na niekontrolowane wyjścia ze stanu nadprzewodnictwa, po angielsku zwane quench. Opracowane przez Doktoranta modele elektromagnetyczny i cieplny szynoprzewodu dobrze opisują jego właściwości i zużywają znacznie mniej czasu obliczeniowego, niż byłoby to w przypadku modelu sprzężonego łączącego obydwie te zagadnienia. Siódmy rozdział rozprawy zawiera wnioski, natomiast ósmy jest spisem literatury.

4. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Rozprawa zawiera oryginalny materiał poznawczy, omówiony poprzednio, który upoważnia recenzenta do wystawienia pozytywnej opinii o całej rozprawie, a nawet pozwala wnieść o jej wyróżnienie. Jednak zgodnie z obowiązkiem recenzenta pozwalam sobie zgłosić kilka uwag krytycznych, poza wymienionymi poprzednio, które może okazać się przydatne przy dalszych opracowaniach Doktoranta i będą stanowiły element do dyskusji na obronie.

Jaka jest interpretacja wyników z rysunku 6.13, który pokazuje, że w pewnych cyklach prądowych największa generacja ciepła w kablu ma miejsce dla zerowego prądu, natomiast przy maksymalnym prądzie generowane ciepło spada niemal do zera.

Pewne wątpliwości budzi rozkład gęstości prądów w przewodzie nadprzewodnikowym z NbTi pokazany np. na rys. 6.9-6.10. Wg najprostszego modelu Beana, na który powołuje się Autor, prąd powinien płynąć po powierzchni nadprzewodnika, a w środku powinien być obszar tzw. dziury Meissnera, gdzie B i j znikają. Drugi wariant jest taki, że prąd będzie płynął w stanie rezystywnym po całym przekroju przewodu. Natomiast prąd płynie tutaj pierwotnie tylko w dolnej połowie przekroju nadprzewodnika, stopniowo wypełniając cały przewód. Jak Doktorant to uzasadnia i jaka jest interpretacja występowania obszarów z ujemną gęstością prądu, w przypadku jego narastania, jak pokazuje to rys. 6.9.

Mam także pytanie odnośnie wzoru 4.32. Przypuszczam że ma tu miejsce chochlik drukarski, gdyż w obecnej postaci tego wzoru parametr $B_0 \cdot 10^{-2}$ nie zmniejsza singularności dla $B=0$, natomiast podwyższa wartość gęstości prądu krytycznego, który powinien dążyć do zera dla B zmierzającej do nieskończoności.

Rozprawa poświęcona jest modelowaniu numerycznemu, odczuwa się jednak w niektórych przypadkach np. dla wyników pokazanych na rys. 4.7 – 4.10, 4.18 - 4.20 brak opisu szczegółów matematycznych stosowanych w programach obliczeniowych. Czy w każdym z tych przypadków podane są explicite wyjściowe równania różniczkowe (Laplace'a, Helmholtza, Ampera), które są rozwiązywane w danym programie numerycznym, jaką metodą (elementów skończonych), jakie są stosowane warunki brzegowe Neumanna, Dirichleta, mieszane i jakie są ich wartości, jaka jest ilość węzłów sieci i jak ta liczba oraz kształt elementów wpływa na dokładność rezultatów. Jak widzi Autor możliwość poprawy programów numerycznych dla osiągnięcia lepszej zgodności z obliczeniami analitycznymi i eksperymentem pokazanym na rys. 3.19.

W szeregu przypadkach np. w podpisie do rys. 5.9 – 5.10 Autor pisze o polu magnetycznym, a używa jednostek indukcji magnetycznej T . Dobrze byłoby uporządkować to zagadnienie rozróżnienia między B i H w całej rozprawie. Nie widzę rozkładów indukcji magnetycznej i gęstości prądu na rys. 3.1 3.2. Czy w przypadku wyników pokazanych na rys 3.16 - 3.17 badano zależności czasowe, gdyż efekt pełzania strumienia może mieć wpływ na pokazane tu parametry.

W szeregu rysunków np. 3.12 - 3.15, brak jest mian przy wartościach liczbowych, co poprawiłoby ich czytelność. Odnosi się to także do rys. 6.7. Co oznacza mnożnik 10^{-4} na tym rysunku. Czy tam występują tak małe zmiany temperatury, rzędu ułamków milikelwinów. Na str. 84-85 zastanawia znaczna różnica w wartości gęstości prądu między obydwooma modelami kabla nuklotronowego, sięgająca wg recenzenta nawet 50 %, jak wynika z porównania rys. 5.11-5.12, które opisują ten sam kabel nuklotronowy. Może to wpływać na dalsze wyniki obliczeń. Jaki jest skok skręcenia przewodów w kablu nuklotronowym i jak wpływa to na zastosowanie przybliżenia 2D.

Język angielski pracy oceniam jako bardzo dobry, jednak znalazłem kilka usterek, co jest zrozumiałe w tak dużej pracy, np.

Str. XV 1 dół calculation

Str. 28 wiersz 6 dół, dwa razy użyty jest wyraz square

Str. 36 1 wiersz góra the jest niepotrzebne

Str. 57 wiersz 5 dół E_0 is magnetic field

5. Wnioski

W podsumowaniu rozprawę oceniam pozytywnie, a kilku uwag dyskusyjnych, mam nadzieję będzie pomocnych Doktorantowi w dalszych pracach. Doktorant zrealizował szeroki program badawczy z zakresu nadprzewodnictwa stosowanego i modelowania numerycznego urządzeń fizyki jądrowej z elementami nadprzewodnikowymi oraz ich działania – szynoprzewodów nadprzewodnikowych i ekranów nadprzewodnikowych stosowanych w akceleratorach nadprzewodnikowych. Doktorant wykazał się dobrą znajomością zagadnień nadprzewodnictwa, umiejętnością rozwiązywania numerycznego problemów z zakresu nadprzewodnictwa stosowanego przy pomocy programów komputerowych, umiejętnością formułowania i rozwiązywania problemów naukowych. Na

podkreślenie zasługuje także wysoki poziom edytorski rozprawy i poprawność języka angielskiego, w którym rozprawa została napisana.

Biorąc pod uwagę treść i formę przedstawionej rozprawy, wybór tematu i jego znaczenie uważam, że recenzowana rozprawa: **Numerical modelling of superconducting components applied in devices for high energy physics**, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w obowiązującej Ustawie z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595) z późniejszymi zmianami. Na tej podstawie stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Tomkowa do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



prof. dr hab. Jacek Sosnowski