

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Numerical Modelling of Superconducting Components Applied in the Devices for High Energy Physics

Autor: mgr inż. Łukasz Tomków

Promotor: dr hab. Marian Ciszek, prof. PWr

Nadprzewodnictwo jest zjawiskiem znajdującym powszechne zastosowanie w urządzeniach fizyki wysokich energii. Unikalne własności stanu nadprzewodzącego, w szczególności zerowy opór elektryczny i idealny diamagnetyzm, predestynują tego typu materiały do wytwarzania i kontroli silnych pól magnetycznych. Możliwości takie szczególnie ważne są w akceleratorach cząstek elementarnych i reaktorach fuzji termonuklearnej, najważniejszych obecnie instrumentach badawczych fizyki jądrowej oraz przyszłych źródeł energii. Nadprzewodniki są materiałami o wysoce nieliniowych właściwościach magnetycznych i elektrycznych, w związku z czym do ich skutecznego modelowania konieczne jest zastosowanie obliczeń numerycznych.

Głównym celem pracy jest przeprowadzenie analizy działania nadprzewodnikowego szynoprzewodu. Analizowany szynoprzewód nadprzewodnikowy jest elementem kriogenicznej linii bocznikującej akceleratora cząstek elementarnych SIS100 budowanego w ramach współpracy w projekcie FAIR. Linia bocznikująca jest częścią polskiego wkładu materialnego do FAIR i jest projektowana na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. Zawiera cztery pary kabli nadprzewodzących zasilających magnesy dipolowe i kwadrupolowe. Szynoprzewody wykonane są z kabla nuklotronowego zawierającego nadprzewodnik NbTi. W pracy badane są cieplne i elektromagnetyczne aspekty działania tych elementów. Głównym narzędziem wykorzystywanym w analizach są symulacje numeryczne. Uzyskane wyniki zostały zinterpretowane w kontekście jakości i bezpieczeństwa pracy akceleratora oraz, jeżeli było to możliwe, porównane z wynikami eksperymentalnymi i analitycznymi.

Przeanalizowano, czy zastosowane w modelu numerycznym uproszczenia skomplikowanej struktury kabla nuklotronowego wpływają znacząco na obliczone wartości parametrów elektrycznych linii – pojemności i indukcyjności. Ustalono, że obliczone wartości tych parametrów nie przekraczają wyznaczonych limitów, dzięki czemu zapewniona jest odpowiednio wysoka jakość prądu elektrycznego dostarczanego do magnesów akceleratora. Jednakże, aby uzyskać miarodajne wyniki dotyczące cieplnego zachowania szynoprzewodu konieczne jest zastosowanie bardziej skomplikowanego modelu, w którym brane są pod uwagę pojedyncze włókna kabla nuklotronowego. Dokonano analizy termicznej urządzenia, której rezultaty wskazują, że praca szynoprzewodu jest bezpieczna pod względem wygaszenia nadprzewodnictwa (*quench*) i jej parametry są odpowiednio dalekie od warunków powodujących gwałtowny i niekontrolowany zanik właściwości nadprzewodzących.

Dodatkowym celem pracy jest przeprowadzenie analizy działania ekranów magnetycznych służących do kształtowania pola magnetycznego w akceleratorach cząstek elementarnych. W ramach ich realizacji stworzono kilka modeli elementów nadprzewodzących o różnym poziomie złożoności. Pierwszym jest model zamkniętego nadprzewodzącego ekranu magnetycznego, do analizy którego wykorzystano własny kod numeryczny *Sushi*. Następnie zbadano otwarty ekran

magnetyczny wykorzystując komercyjne oprogramowanie Comsol. Wykazano, że wyniki zgodne są zarówno z wynikami eksperymentalnymi, jak i teoretycznymi. Następnie przeprowadzono właściwą analizę szynoprzewodu nadprzewodzącego. Stworzono początkowy model elektromagnetyczny kabla nuklotronowego analizujący dwa sposoby modelowania nadprzewodnika. Następnie uzyskane dane wykorzystano do stworzenia modelu elektromagnetycznego całej linii i obliczenia jej parametrów elektrycznych. W ramach kolejnego etapu stworzono sprzężony model cieplno-elektromagnetyczny kabla nuklotronowego i obliczono produkcję oraz dopływy ciepła.

W początkowych rozdziałach pracy zaprezentowano podstawy teoretyczne zjawiska nadprzewodnictwa. Opisane zostały fizyczne mechanizmy prowadzące do występowania stanu nadprzewodzącego, własności tego stanu, wartości parametrów krytycznych i podział nadprzewodników ze względu na przydatność w kriotechnice. Wymieniono najważniejsze materiały nadprzewodzące wraz z ich właściwościami. Pokazane zostały wybrane zastosowania nadprzewodników. Przedstawiono również wyzwania związane z numerycznym modelowaniem elementów nadprzewodzących.

Pierwszym i najprostszym analizowanym elementem nadprzewodzącym jest zamknięty ekran magnetyczny. Urządzenie to wykorzystywane jest do redukcji pola magnetycznego w wybranym obszarze, bądź do blokowania rozchodzenia się tego pola (np. pułapki magnetyczne). Dzięki zastosowaniu litego elementu z nadprzewodnika wysokotemperaturowego możliwa jest niemal całkowita redukcja pola magnetycznego. W badanym ekranie dodana została również dodatkowa warstwa z taśmy nadprzewodzącej zdolna do znacznego zwiększenia zdolności ekranowania pól magnetycznych niskiej częstotliwości. Jest to pierwszy przypadek wspólnego zastosowania nadprzewodnika litego i taśmy nadprzewodzącej do ekranowania pola magnetycznego.

Stworzono model numeryczny wielowarstwowego ekranu i uzyskano wyniki bliskie wynikom eksperymentalnym. Ekran taki charakteryzuje się stosunkowo prostą geometrią z symetrią osiową. Możliwe jest analityczne obliczenie parametrów pracy takiego urządzenia z wykorzystaniem modelu Kima-Andersona. Również w tym wypadku wyniki obliczeń numerycznych okazały się zgodne z wartościami wyznaczonymi analitycznie.

Podczas badań eksperymentalnych przeprowadzonych w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu zauważono dodatkowy efekt ekranowania pojawiający się przy pewnej częstotliwości granicznej. W pracy zaprezentowano analizę tego efektu i wyznaczono parametry elektryczne ekranu służące do wyznaczenia częstotliwości granicznej. Przedstawiona została metoda numerycznego wyznaczania indukcyjności badanego ekranu magnetycznego.

Następnie przeprowadzono analizę otwartego ekranu magnetycznego, który zastosowany zostanie w systemie chłodzenia elektronowego akceleratora NICA budowanego w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej. System ten służy do zwiększenia jakości wiązki przyspieszanych cząstek poprzez zmniejszenia jej przekroju oraz jej monochromatyzację. Realizowane jest to poprzez kulombowskie interakcje pomiędzy przyspieszonymi cząsteczkami a wiązką elektronów o łatwych do kontroli właściwościach. Proces ten najefektywniej dokonuje się w polu magnetycznym o ekstremalnej jednorodności.

Ekran taki charakteryzuje się bardziej skomplikowaną geometrią. Uzyskanie pola o wysokiej jednorodności możliwe jest z wykorzystaniem otwartego ekranu magnetycznego wykonanego z nadprzewodzących taśm owiniętych wokół wspólnego karkasu otaczającego obszar interakcji. Tym razem nie występuje symetria osiowa. W związku z tym stworzone zostały dwa oddzielne modele dla dwóch komponentów pola magnetycznego. Pierwszy model wykorzystuje sformułowanie H do analizy pojedynczej, dwuwymiarowej, rozwiniętej taśmy nadprzewodzącej i wyznacza radialny

komponent pola w obszarze ekranu. Uzyskany został pełen rozkład pola oraz prądów ekranujących w pojedynczej taśmie stanowiącej część ekranu.

W przypadku drugiego modelu zaproponowana została nowa metoda obliczenia ekwiwalentnego prądu ekranującego dla tego typu geometrii. Na tej podstawie obliczony został komponent osiowy pola magnetycznego oraz jego rozkład. Zarówno badania eksperymentalne, jak i model numeryczny pokazują znaczne zwiększenie jednorodności pola po zastosowaniu ekranów. Dzięki modelowi numerycznemu przewidzieć można zachowanie ekranu w polach o różnej sile i kształcie.

Po uzyskaniu danych dotyczących zastosowanie komercyjnego programu do obliczeń numerycznych w badaniu nadprzewodników zrealizowano główny cel pracy - przeprowadzono analizę elektromagnetyczną i termiczną szynoprzewodów nadprzewodzących w linii kriogenicznej dla akceleratora SIS100. By zbadać rozkład pola wokół nadprzewodnika stworzono numeryczny model kabla nadprzewodzącego. Przeanalizowano dwie metody modelowania kabla – jako pojedyncze włókna i jako jednolity obszar nadprzewodzący. Model pojedynczych włókien wymaga znacznie większej ilości węzłów w siatce numerycznej i prowadzi do znaczącego zwiększenia czasu obliczeń. Przyjęto założenie, że temperatura kabla jest stała. Zaimplementowano empiryczną zależność krytycznej gęstości prądu elektrycznego od pola magnetycznego.

Analizując uzyskane wyniki wykazano, że do modelowania rozkładu pola wystarczające jest zastosowanie działającego szybciej modelu z obszarem jednolitym. Pole magnetyczne różni się tylko w obszarze włókien. Dalej od osi kabla jest niemal identyczne. W związku z tym ewentualnie odchylenia od rzeczywistości nie wpłyną znacząco na wartości wielkości elektrycznych zależnych od pola magnetycznego i elektrycznego generowanego przez kabel w pewnej odległości od niego. Do modelowania cieplnego użyty jednak powinien zostać model pojedynczych włókien aby uzyskać dokładniejszą wartość prądu w pojedynczym włóknie. Analiza wyników wykazała znaczne różnice w rozkładzie prądu elektrycznego pomiędzy modelami prowadzące do dużych zmian w wielkości produkcji ciepła.

Numerycznie wyznaczono parametry elektryczne linii nadprzewodnikowej. Obliczono pojemność elektryczną linii bazując na trzech przypadkach definiowanych przez różne umiejscowienie potencjału elektrycznego. Badano pojemność pomiędzy dwoma kablami nuklotronowymi, pomiędzy parą kabli a osłoną zewnętrzną oraz pojedynczym kablem a osłoną. Następnie obliczono wartość pojemności za pomocą trzech metod - energetycznej, indukcji elektrycznej oraz zgromadzonego ładunku elektrycznego. Wartości uzyskane z wykorzystaniem poszczególnych metod są sobie bardzo bliskie sobie i wyznaczonym analitycznie.

Obliczono indukcyjność własną i wzajemną linii. Do obliczenia indukcyjności własnej prostych fragmentów wykorzystano w modelu dwuwymiarowym metodę energetyczną oraz bazującą na wyznaczeniu strumienia magnetycznego w przewodzie. Uzyskane wyniki były takie same i bliskie eksperymentalnym pokazując, że obie metody dają miarodajne wyniki. Obliczenia indukcyjności własnej w obszarze dylatacji dokonano metodą energetyczną i wykorzystując model trójwymiarowy. Indukcyjność wzajemna prostych fragmentów linii została obliczona metodą strumienia magnetycznego oraz poprzez obliczenia indukowanego napięcia. Tu również wykorzystano model dwuwymiarowy. Indukcyjność wzajemna w obszarze dylatacji została obliczona w modelu trójwymiarowym używając metody polegającej na wyznaczeniu napięcia indukowanego przez prąd zmienny płynący w innych przewodach w analizowanym obszarze.

Na podstawie uzyskanych wartości indukcyjności zbadano prądy przesłuchu pomiędzy liniami. Obliczone zostały biorąc pod uwagę również indukcyjności magnesów zasilanych tymi liniami. Uzyskane wartości są znacznie niższe niż założony limit. Zapewnia to odpowiednią jakość pola

magnetycznego generowanego przez elektromagnesy akceleratora. Wyznaczono również wielkość prądów wirowych indukowanych w osłonie szynoprzewodu. Uzyskane wyniki przeanalizowano zarówno w kontekście jakości prądu dostarczanego do magnesów akceleratora, jak i wytwarzania ciepła w nadprzewodniku i elementach przewodzących linii. Wielkość tych prądów jest bardzo niewielka i powoduje nieznaczące zmiany prądu w nadprzewodniku oraz pomijalną produkcję ciepła w osłonie.

Dla celów analizy cieplnej stworzono dwa modele. Pierwszy wyznacza ilość ciepła docierającego do kabla nadprzewodzącego. Odtworzona została geometria całego przekroju linii kriogenicznej w obszarze bez odstępników. Wyznaczono parametry przepływu ciepła do chłodziwa oraz z otoczenia. Głównym sposobem przenoszenia ciepła pomiędzy elementami linii jest promieniowanie cieplne. Obliczono w ten sposób wielkość statycznych dopływów ciepła. Uzyskaną wartość przepływu ciepła przekazano do modelu kabla nadprzewodzącego.

Następnie wyznaczono straty energetyczne w kablu nuklotronowym w funkcji przepływającego prądu. Stworzono sprzężony model cieplno-elektryczny w którym zastosowano zależności prądu krytycznego od pola magnetycznego i temperatury. Modelowany był pojedynczy przekrój kabla nuklotronowego. Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę zagrożenia nagłym wygaszeniem nadprzewodnictwa w trakcie normalnej pracy kabla. Pokazano, że wielkość strat cieplnych w nadprzewodniku nie zależy bezpośrednio od wielkości przepływającego prądu. Obliczona produkcja ciepła jest stosunkowo niska i zagrożenie zniszczeniem nadprzewodnika jest niewielkie.

Zrealizowano wszystkie cele pracy doktorskiej i wykazano prawdziwość jej tez. Pokazano, że zastosowanie analizowanej linii kriogenicznej jest bezpieczne oraz zapewni odpowiednią jakość pracy akceleratora. W ramach realizacji celów dodatkowych przeanalizowano kilka ciekawych efektów. Pokazano mnogość możliwych zastosowań nadprzewodników w urządzeniach fizyki wysokiej energii, a także przydatność symulacji numerycznych w ich badaniu.

