

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgra Juliana Płoszajskiego

***Zastosowanie wiązki cząstek z akceleratorów
i chłodzonych uzwojeń z wolframu do wytwarzania
silnych pól magnetycznych***

Przestawiona mi do recenzji praca doktorska wykonana została na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego. Promotorem pracy jest dr hab. Stanisław Bednarek.

Praca zawiera 133 stron, w tym liczne tabele, rysunki i wykresy oraz obszerny spis literatury (69 pozycji). Praca podzielona jest na rozdziały:

Wprowadzenie – cel i zakres pracy

1. Silne pola magnetyczne i metody ich wytwarzania
2. Pole magnetyczne i elektryczne paczki protonów o jednowymiarowym rozkładzie Gaussa w pierścieniu akumulacyjnym akceleratora LHC
3. Pole magnetyczne i elektryczne paczki protonów o trójwymiarowym rozkładzie Gaussa w pierścieniu akumulacyjnym akceleratora LHC
4. Pole magnetyczne i elektryczne paczki elektronów o trójwymiarowym rozkładzie Gaussa w pierścieniu akumulacyjnym akceleratora Solaris
5. Projekt mimośrodowej cewki z wolframu chłodzonej ciekłym helem do wytwarzania silnych jednorodnych pól magnetycznych.
6. Projekt magnesu Bittera z wolframu chłodzonego ciekłym helem do wytwarzania silnych pól magnetycznych w dużej objętości.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Alfabetyczny spis literatury

Wykaz publikacji i referatów z udziałem doktoranta związanych z rozprawą

Streszczenie

Abstract

W **Wprowadzeniu** Autor omawia cel i zakres pracy. Celem rozprawy jest przedstawienie wyników badań teoretycznych, dotyczących opracowania innowacyjnych sposobów wytwarzania silnych pól magnetycznych, które mają zastosowanie w badaniach podstawowych, w technice oraz coraz częściej w praktyce medycznej. Wytwarzanie silnych pól magnetycznych za pomocą dotychczasowych metod wymaga ciągłego udoskonalenia techniki i nie zawsze daje to, z różnych powodów, oczekiwane rezultaty. Stąd zainteresowania Doktoranta poszukiwaniem nowych sposobów wytwarzania silnych pól magnetycznych.

W pracy Autor zajmuje się dwiema możliwymi metodami wytwarzania silnych pól magnetycznych:

-wykorzystaniem paczek cząstek naładowanych przyspieszanych w akceleratorach do wytwarzania silnych impulsowych pól magnetycznych o bardzo krótkim czasie trwania. Podczas ruchu takie paczki wytwarzają w układzie własnym tylko pole elektryczne, ale jak wynika z transformacji Lorentza, w układzie laboratoryjnym są też źródłem pola magnetycznego,

-zastosowaniem wolframu chłodzonego ciekłym helem, jako materiału do budowy cewek przeznaczonych do wytwarzania silnych stałych pól magnetycznych. Wynika to stąd, że w temperaturach wynoszących kilka stopni Kelvina wolfram wykazuje bardzo niską oporność właściwą. Wolfram przechodzi w stan nadprzewodnictwa dopiero w temperaturze poniżej 0,015 K.

Rozdział 1. Silne pola magnetyczne i metody ich wytwarzanie

Istotną wielkością charakteryzującą pole magnetyczne jest wektor indukcji magnetycznej B mierzonej w teslach. Zakres wartości B pól magnetycznych jest bardzo szeroki i obejmuje 25 rzędów wielkości. W Tabeli 1.1. Autor przytacza kilkanaście charakterystycznych wartości indukcji magnetycznej B pola magnetycznego naturalnego i wytwarzanego przez człowieka od najsłabszych mierzalnych pól 10^{-15} T do najsilniejszych 10^{10} T występujących w pulsarach radiowych.

Autor stwierdza, że: *pole magnetyczne jest „obiektem”, który bardzo powszechnie występuje w całym Wszechświecie. Jest też wytwarzane przez człowieka podczas jego różnorodnej działalności.* Pole magnetyczne może być stałe, zmienne i impulsowe,

Autor zwraca uwagę na to, że nie ma ściśle określonej definicji silnego pola magnetycznego, ale pole magnetyczne jest uważane za silne, jeżeli wartość jego indukcji B wynosi co najmniej 5 T i zajmuje ono objętość co najmniej 5 cm³.

Obecnie w laboratoriach naukowych wytwarza się pola magnetyczne o indukcji B około 2 500 T. Silne pola magnetyczne mają zastosowanie m.in. w: badaniach naukowych, różnego rodzaju procesach technologicznych, transporcie, medycynie i technice wojennej. W nauce, jak podaje Autor, silne pola magnetyczne odgrywają istotną rolę m.in. w technice akceleracyjnej, w utrzymywaniu plazmy w urządzeniach kontrolowanej syntezy termojądrowej, technologii wytwarzania materiałów o zadanych właściwościach.

Autor przedstawia stosowane obecnie metody wytwarzania stałych silnych pól magnetycznych m.in. za pomocą elektromagnesów, cewek nie zawierających rdzeni, w szczególności magnesów Bittera, magnesów nadprzewodnikowych. W Tab. 1.2. przedstawiono porównanie podstawowych parametrów stałych pól magnetycznych, wytwarzanych przez wybrane źródła laboratoryjne.

Następnie Autor omawia metody wytwarzania impulsowych silnych pól magnetycznych o indukcji przekraczającej 100 T. Najczęściej stosowany do tego celu układ zbudowany jest z impulsowego źródła prądu zasilającego cewkę wytwarzającą pole magnetyczne. Cewki składają się z niewielkiej liczby zwojów, dla najwyższych pól są to cewki jednozwojowe. Chodzi o to, żeby ograniczyć indukcyjność cewek w celu zwiększenia wartości indukcji B i skrócenia czasu trwania impulsu t . W takich układach można uzyskać pole magnetyczne o indukcji do 500 T i czasie trwania impulsu około kilka mikrosekund. Podczas eksperymentu często cewki ulegają zniszczeniu. Najsilniejsze impulsowe pola magnetyczne można uzyskać metodą wybuchowej kompresji strumienia pola magnetycznego, która również prowadzi do zniszczenia cewki.

W Tabl. 1.4. i 1.5. przedstawione zostały podstawowe parametry impulsowych pól magnetycznych oraz ich zalety i wady. W tych tabelach wymienione są także parametry pola oraz zalety i wady ciągle teoretycznego impulsowego pola magnetycznego wytwarzanego przez wiązkę cząstek z akceleratora. Parametry tego pola to: B 40-60 T, czas trwania impulsu t 1 ps- 1fs, objętość V 10 mm³ i próbka nie ulega zniszczeniu. Zaletą metody, jeśli uda się ją zastosować, będzie duża wartość indukcji pola magnetycznego, bardzo krótki czas trwania impulsu i powtarzalność.

Metoda ta wymaga jednak akceleratora, unikatowej aparatury i wytwarza pole w małej objętości. Z przytoczonych przewidywanych charakterystyk metody wynika, że warto zająć się przygotowaniem realizacji tej metody.

W dalszej części Rozdziału 1. Autor omawia główne bariery związane z wytwarzaniem klasycznych silnych pól magnetycznych. Wymienia trzy zasadnicze grupy ograniczeń: bariera materiałowa, bariera energetyczna, bariera szybkości chłodzenia. Rozdział stanowi dobre wprowadzenie do dalszej części rozprawy i kończy się spisem literatury (zawierającym 44 pozycje) dotyczącej poruszanych kwestii.

Rozdział 2. Pole magnetyczne i elektryczne paczki protonów o jednowymiarowym rozkładzie Gaussa w pierścieniu akumulacyjnym akceleratora LHC.

Ten rozdział zawiera opis własnej metody Autora wyznaczania rozkładu przestrzennego indukcji pola magnetycznego B i natężenia pola elektrycznego E , wytwarzanego przez relatywistyczną wiązkę naładowanych cząstek przyspieszanych w akceleratorze. Wiązki te uformowane są w paczkach poruszających się w pewnej odległości od siebie. Do obliczeń przyjęto, że gęstość przestrzenna cząstek w paczce, a tym samym i gęstość liniowa ładunku, zmienia się w kierunku ruchu paczki i opisywana jest jednowymiarowym rozkładem Gaussa. Ponadto założono, że w kierunkach prostopadłych do kierunku ruchu rozkład ten jest jednorodny.

Opracowaną metodę zastosowano do wyznaczania rozkładu przestrzennego indukcji pola magnetycznego B i natężenia pola elektrycznego E w otoczeniu paczki protonów przyspieszanych w Wielkim Zderzaczu Hadronów LHC. Wykazano, że takie paczki wytwarzają silne, impulsowe pola magnetyczne indukcji od kilkudziesięciu do kilkuset T w obszarze o rozmiarach kilku cm. Autor zauważa, że pola te mogą być wykorzystane do badania właściwości materiałów w nowej skali czasu rzędu fs. Aby jednak w przyszłości wykorzystać to zjawisko do badania własności materiałów w silnych impulsowych pola magnetycznych należy zbudować specjalną komorę umożliwiającą umieszczenie próbki blisko wiązki akceleratora i zdalne wymienianie próbek podczas pracy akceleratora. Stosowana już w Uniwersytecie Stanforda przez Siegman'a i współpracowników wiązka relatywistycznych elektronów z liniowego

akceleratora SLAC przechodziła przez próbkę, wytwarzała efekty magnetyczne w próbce, ale powodowała punktowe niszczenie próbki.

Proponowana przez Autora metoda obliczenia silnych pól magnetycznych i elektrycznych wywołanych przelatującą paczką cząstek naładowanych pozwalająca na wyznaczenie rozkładu przestrzennego indukcji pola magnetycznego B i natężenie pola elektrycznego E wykorzystuje transformację Lorentza. Oba pola analizowane są na zewnątrz wiązki, gdzie jest możliwość prowadzenia badań nieniszczących.

W końcowej części rozdziału opisany został projekt specjalnej komory, przeznaczonej do zamontowania obok rury akceleratora. Komora umożliwi zdalną wymianę badanych próbek i przesyłanie wyników pomiarów. Zbudowanie takiej komory ułatwiłoby szerokie zastosowanie wiązki naładowanych cząstek z akceleratorów do badań materiałów przy użyciu silnych impulsów pola magnetycznego w niespotykanych dotychczas krótkich przedziałach czasu.

Autor szczegółowo przedstawia metody stosowanych przez niego obliczeń pola elektrycznego E i pola magnetycznego B uwzględniających układ odniesienia, kształt przelatującej paczki relatywistycznych naładowanych cząstek, odległość próbki od wiązki.

W Tab.2.1. wymieniono podstawowe parametry wiązki protonów w pierścieniu akumulacyjnym LHC, które Autor wykorzystał do swoich obliczeń. Na rysunkach od 2.1. do 2.10. przedstawia wyniki obliczeń składowych indukcji magnetycznej B i natężenia pola elektrycznego E od odległości r_0 od osi wiązki i x_0 względem środka paczki.

W dyskusji wyników przedstawionych w tym rozdziale Autor pokazuje, że maksymalne wartości indukcji pola magnetycznego B znajdują się w poprzecznej płaszczyźnie symetrii paczki, dla której $x_0=0$. Te maksymalne wartości pojawiają się w momencie przechodzenia środka paczki w najmniejszej odległości od próbki, co jest spodziewanym wynikiem. Przy założeniu, że rozmiary badanych próbek są około 1 mm i takie próbki będą umieszczane w odległości $r_0=1$ mm od osi paczki lub większej, górna granica zakresu indukcji pola magnetycznego użytecznego do badań dla próbek o rozmiarach milimetrycznych wynosi ok. 160 T. Wartość indukcji maleje wraz odległością od osi paczki. W odległości $r_0=5$ mm od osi paczki granica ta wynosi 57 T. Te wartości indukcji magnetycznej są porównywalne z indukcjami pól

wytwarzanych przy użyciu cewek. Jeżeli próbka zostanie umieszczona dalej od osi paczki, to wtedy graniczna wartości indukcji pola będzie mniejsza, ale pole to będzie bardziej jednorodne. Z powodu niejednorodności pola magnetycznego w dużej próbce, jej optymalna objętość powinna być ograniczona do kilkudziesięciu mm³. Próbkę o takich rozmiarach obecnie bada się w laboratoriach.

Autor rozważa również działanie impulsowego pola elektrycznego E towarzyszącego impulsowi pola magnetycznego zgodnie z prawem Faradaya. Pole to można ekranować za pomocą ekranów wykonanych z przewodzącego materiału. Cząstki poruszające się w akceleratorze mają prędkości relatywistyczne, zachodzi więc skrócenie długości paczki, a to umożliwi wytwarzanie bardzo krótkich impulsów pola magnetycznego o długości zaledwie 4 fs.

Ze względu na konieczność zabezpieczenia wysokiej próżni w rurze akceleratora oraz zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego podczas eksperymentu z próbką na którą działa impulsowe pole magnetyczne zaproponowano zbudowanie specjalnej komory do zdalnej wymiany i sterowania próbkami podczas pracy akceleratora. Tę zaprojektowaną przez dr. hab. Stanisława Bednarkę zarejestrowaną w Urzędzie Patentowym RP pod nr P-422643 2017) Autor przedstawia na Rys. 2.11. i w tekście szczegółowo omawia. Komora ta może być przyłączana do rury akceleratora podczas przerwy konserwacyjnej akceleratora. Ponieważ nie jest wstawiona w strumień przyspieszanych cząstek nie zakłóca normalnej pracy akceleratora.

We wnioskach dla tego rozdziału Autor stwierdza, że zastosowanie wiązki naładowanych cząstek z akceleratora do wytwarzania silnych, impulsowych pól magnetycznych usuwa liczne problemy związane z nagrzewaniem cewek, ich naprężeniami i niszczeniem. Umożliwia to również otrzymywanie metodą nieniszczącą wielokrotnie powtarzalnych impulsów pola magnetycznego. Ponieważ pola magnetyczne wytwarzane przez paczki cząstek z akceleratora mają unikalne i nie osiągalne innymi metodami parametry, to otwierają one nową dziedzinę badań, w której można spodziewać się znaczących odkryć. Pozwalają m.in. na badanie bardzo szybkich procesów przemagnesowania. Spis literatury do tego rozdziału zawiera 22 pozycje.

Rozdział 3. Pole magnetyczne i elektryczne paczki protonów o trójwymiarowym rozkładzie Gaussa w pierścieniu akumulacyjnym akceleratora LHC

W tym rozdziale Doktorant wykonuje obliczenia wartości indukcji magnetycznej B pola magnetycznego i natężenie pola elektrycznego E wytwarzanych przez relatywistyczną wiązkę cząstek, w której gęstość ładunku paczki opisywana jest trójwymiarowym rozkładem Gaussa. Jest to przypadek bardziej ogólny od rozpatrywanego w poprzednim rozdziale i bardziej adekwatny do rzeczywistej sytuacji, występującej w akceleratorach i pierścieniach akumulacyjnych. Tutaj również najpierw wyznaczone zostało natężenie pola elektrycznego w układzie związanym z paczką ładunku. Następnie zastosowano transformację Lorentza i obliczono wartości składowych natężenia pola elektrycznego E oraz indukcji pola magnetycznego B w układzie związanym z próbką. Obliczenia były znacznie bardziej rozbudowane niż w przypadku osiowego rozkładu Gaussa w paczce relatywistycznych cząstek przedstawionym w Rozdziale 2. Pozwoliło to na wyprowadzenie wzorów na składowe pola elektrycznego i magnetycznego w miejscach wyznaczonych przez charakterystyczne płaszczyzny i osie układu związanego z paczką cząstek oraz układu związanego z próbką. Na rysunkach od 3.3. do 3.28. przedstawiono wyniki obliczeń składowych natężenia pola elektrycznego E i indukcji magnetycznej B w zależności od położenia próbki względem osi wiązki cząstek poruszających się w akceleratorze. Na zakończenie rozdziału zamieszczone spis wykorzystanej w tym rozdziale literatury zawierający 17 pozycji.

Rozdział 4. Pole magnetyczne i elektryczne paczki elektronów o trójwymiarowym rozkładzie Gaussa w pierścieniu akumulacyjnym akceleratora Solaris

Opracowaną w poprzednim rozdziale ulepszoną metodę, polegającą na wykorzystaniu do obliczeń indukcji pola magnetycznego B i natężenia pola elektrycznego E trójwymiarowego rozkładu Gaussa, postanowiono zastosować w przypadku innego akceleratora. Ten rozdział zawiera wyniki uzyskane dla akceleratora pracującego w Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego

(NCPS) Solaris w Krakowie. Wybór akceleratora w NCPS Solaris uzasadniony jest również m.in. względami poznawczymi, ponieważ parametry poruszających w nim paczek cząstek znacznie różnią się od tych, które występują w LHC. Energia przyspieszanych tutaj elektronów jest o trzy rzędy wielkości mniejsza, niż energia protonów w LHC. Planuje się, że zgłoszone projekty badawcze po uzyskaniu pozytywnej oceny i znalezieniu źródeł finansowania będą kwalifikowane do realizacji. Ta sytuacja może w znacznym stopniu ułatwić zastosowanie wyników obliczeń i budowę zaproponowanej wcześniej komory do zdalnego pozycjonowania i wymiany próbek. W tab. 4.1. Autor zebrał podstawowe parametry paczki elektronów w pierścieniu akumulacyjnym akceleratora Solaris wykorzystanych do obliczeń. W obliczeniach przyjęto taką długość paczki elektronów, która umożliwiała uwzględnienie prawie całego ładunku elektrycznego przenoszonego przez paczkę elektronów. Wyniki obliczeń pozwoliły na wykreślenie rozkładów przestrzennych indukcji pola magnetycznego (wykresy trójwymiarowe), przedstawionych na rysunkach od 4.1 do 4.6. oraz wykresów, pokazujących zależności natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej od pojedynczych współrzędnych (wykresy dwuwymiarowe), pokazanych na rysunkach od 4.7 do 4.26.

Analiza obliczeń i wykresów pozwala na stwierdzenie, że rozkłady przestrzenne natężenia pola elektrycznego i indukcji pola magnetycznego, wytwarzanego przez paczki elektronów w pierścieniu akumulacyjnym synchrotronu Solaris, mają podobny kształt do odpowiednich rozkładów przestrzennych natężenia pola elektrycznego i indukcji pola magnetycznego, wytwarzanego przez paczki protonów w przypadku pierścienia akumulacyjnego synchrotronu LHC, ale wartości natężenia pola elektrycznego i indukcji pola magnetycznego są kilkanaście razy mniejsze, niż w przypadku LHC.

Zmniejszenie wartości tych oraz pozostałych składowych indukcji pola magnetycznego i natężenia pola elektrycznego spowodowane jest przez dwa główne czynniki. Pierwszy z nich to mniejsza liczba cząstek naładowanych, zawartych w paczkach poruszających się w pierścieniu akumulacyjnym Solaris. W przypadku pierścienia akumulacyjnego LHC w paczce znajdowało się $1,15 \cdot 10^{11}$ protonów, natomiast w pierścieniu akumulacyjnym Solaris paczka zawiera $3,125 \cdot 10^{10}$ elektronów. Drugim czynnikiem jest niższa energia elektronów w pierścieniu akumulacyjnym Solaris, niż energia protonów w pierścieniu akumulacyjnym LHC.

Zestawienie wyników oszacowania minimalnego i maksymalnego natężenia pola elektrycznego oraz indukcji pola magnetycznego i wyników obliczeń tych wielkości według trójwymiarowego rozkładu Gaussa dla pierścieni akumulacyjnych akceleratorów LHC i Solaris w odległości $r = 5$ mm od osi paczki przedstawił Autor w Tab.4.1. Indukcja B_z wynosi 56 T w przypadku akceleratora LHC i 4,6 T w przypadku Solaris. Spis literatury do tego rozdziału zawiera 9 pozycji.

Rozdział 5. Projekt mimośrodowej cewki z wolframu chłodzonej ciekłym helem do wytwarzania silnych jednorodnych pól magnetycznych

Ten rozdział dotyczy projektu innowacyjnej cewki do wytwarzania stałych pól magnetycznych o indukcji ponad 55 T w objętości kilku dm^3 . Na początku rozdziału opisana została budowa cewki. Użyteczne pole magnetyczne w tej cewce wytwarzane jest w podłużnej, cylindrycznej wnęce, wytworzonej mimośrodowo wewnątrz uzwojenia. Odcinki przewodów tworzących to uzwojenie przechodzą równoległe do osi wnęki i cylindra oraz łączą się ze sobą na zewnątrz tego układu. Przewody wykonane są z wolframu i chłodzone ciekłym helem. Wyznaczono rozkład przestrzenny indukcji wytwarzanego pola magnetycznego. Przeprowadzono obliczenia przybliżone dla cewki długiej oraz dokładniejsze obliczenia dla cewki o ograniczonej długości. Obliczono również podstawowe parametry układu zasilania i chłodzenia tej cewki. Porównano uzyskane wyniki z obecnymi możliwościami technicznymi i przedyskutowano wykonalność projektu. Istotnymi zaletami cewki są: duża jednorodność wytwarzanego pola magnetycznego, zredukowanie pola rozproszonego na zewnątrz oraz niewielka moc strat cieplnych. Wartość indukcji pola magnetycznego jest stała i wprost proporcjonalna do gęstości natężenia prądu oraz odległości między osiami wnęki i walca. Dlatego też w celu zwiększenia wartości indukcji, wnękę należy umieścić możliwie daleko od osi walca. Najlepiej, żeby wnęka była styczna do powierzchni walca i miała stosunkowo mały promień. Spełnienie tego drugiego warunku powoduje jednak ograniczenie użytecznej objętości wnęki, w której wytwarzane jest użyteczne pole magnetyczne.

Odpowiednim materiałem do wykonania uzwojenia jest wolfram, który w temperaturach kilku stopni Kelvina ma bardzo małą oporność właściwą rzędu 10^{-12} - 10^{-13} Ω . Temperatury takie są osiągnane przez chłodzenie ciekłym helem.

Ponadto, wolfram charakteryzuje się wysoką wytrzymałością mechaniczną. Jest to również jego korzystna cecha, ponieważ cewki przeznaczone do wytwarzania silnych pól magnetycznych są poddane bardzo dużym naprężeniom, spowodowanym przez siły elektrodynamiczne. Jako materiał izolacyjny o wysokiej wytrzymałości mechanicznej, nadający się również do pracy w niskich temperaturach, może być zastosowany teflon. Podstawowe znaczenie dla zastosowań praktycznych ma wyznaczenie rozkładu przestrzennego indukcji pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę, a w szczególności obliczenie wartości tej indukcji w komorze roboczej. Na rysunkach od 5.7. do 5.14. przedstawiono rozkład przestrzenny składowych indukcji pola magnetycznego B. Autor omówił w tym rozdziale parametry układu zasilania o mocy 30 kW jak również parametry układu chłodzenia ciekłym helem.

Otrzymane wyniki pokazują, że maksymalna wartość indukcji pola magnetycznego $B_{c \max} = 55,1$ T, wytwarzanego za pomocą rozpatrywanej cewki jest o ok. 20 T większa od indukcji pola wytwarzanego przez najsilniejsze magnesy rezystywne typu Bittera. Moc niezbędna do zasilania cewki, wynosząca ok. 30 kW jest bardzo mała w porównaniu z mocą dostarczaną do magnesów typu Bittera, wytwarzających pola o indukcji magnetycznej 30 T. Stanowi ona ok. 10^{-3} mocy zasilającej te magnesy. Natężenie przepływu ciekłego helu, niezbędne do utrzymania stałej temperatury uzwojenia, mimo rozpraszania w nim ciepła ma również podobną wartość, jak w przypadku dużych układów do wytwarzania silnych pól magnetycznych z chłodzeniem kriogenicznym. Literatura do tego rozdziału zawiera 17 pozycji.

6. Projekt magnesu Bittera z wolframu chłodzonego ciekłym helem do wytwarzania silnych pól magnetycznych w dużej objętości

W tym rozdziale został przedstawiony projekt magnesu typu Bittera, w którym będą zastosowane płyty wykonane z wolframu i chodzone przy użyciu ciekłego helu. Przeliczono parametry układu zasilania, parametry układu chłodzenia i wytrzymałość mechaniczną. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że za pomocą magnesu typu Bittera o znanym dotychczas kształcie i konstrukcji mechanicznej, ale wykonanym z płyt wolframowych i schłodzonym do temperatury 1K, można wytworzyć pole magnetyczne o maksymalnej wartości indukcji w środku ponad 32 T. Jest to wartość porównywalna z maksymalną wartością indukcji magnetycznej osiąganą

w działających obecnie magnesach typu Bittera, wykonanych z płyt miedzianych, pracujących w temperaturze ok. 40-50 °C i chłodzonych wodą.

Zastosowanie płyt wykonanych z wolframu i schłodzonych ciekłym helem do temperatury 1 K dałoby jednak radykalne zmniejszenie oporu elektrycznego, a co za tym idzie również mocy zasilania i nowe możliwości wytwarzania silnych pól magnetycznych. Jedną z tych możliwości polegałaby na zachowaniu niewielkiej średnicy otworu w którym jest wytwarzane pole magnetyczne – średnice te wynoszą obecnie 20-30 mm i wielokrotne – o kilka rzędów. rzędu kilowatów i znaczące zwiększenie średnicy obszaru, w którym wytwarzane jest pole magnetyczne. Tego typu magnesy mogłyby okazać się bardzo użyteczne do badań zachowania dużych obiektów w silnych polach magnetycznych, np. organizmów żywych lub w procesach technologicznych do obróbki materiałów w tych polach, np. wytwarzania uporządkowanej struktury w polimerach lub stopach w celu poprawy ich właściwości mechanicznych. Trzecia możliwość mogłaby polegać na założeniu, że średnica obszaru, w którym będzie wytwarzane pole magnetyczne pozostanie niewielka – w granicach 20-30 mm i moc dostarczana do magnesu pozostanie na dotychczasowym poziomie – w granicach kilku MW, natomiast radykalnie zostanie zwiększona indukcja wytwarzanego pola magnetycznego – do wartości kilkuset tesli. Tego rodzaju magnesy pozwoliłyby na wytwarzanie silnych i stałych pól magnetycznych w tym zakresie wartości indukcji magnetycznej, w którym obecnie możliwe jest wytwarzanie tylko pól impulsowych. W tych magnesach nastąpiłoby jednak przekroczenie granicy wytrzymałości uzwojenia, przede wszystkim na rozciąganie. Z tego powodu ta trzecia możliwość ma mniejsze szanse na realizację. Spis literatury do tego rozdziału zawiera 13 pozycji.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Z obliczeń zamieszczonych w rozdziałach 2-4 wynika, że przyspieszane w akceleratorze paczki cząstek naładowanych generują w układzie laboratoryjnym silne, impulsowe pole magnetyczne. Paczki te są również źródłem silnego impulsowego pola elektrycznego. W przybliżeniu są one odwrotnie proporcjonalne do odległości od podłużnej osi paczki. Wymienione wielkości charakteryzujące pola maleją również wraz ze wzrostem odległości od poprzecznej płaszczyzny symetrii paczki. Wytwarzane przez paczki cząstek pole magnetyczne może być wykorzystane do badań, np. w fizyce ciała stałego, czy fizyce fazy skondensowanej. Załóżmy, że

badania będą miały charakter nieniszczący oraz badane próbki będą o rozmiarach ok. 1 mm i zostaną umieszczone w odległości ok. 5 mm od osi paczki. Wtedy zakres wartości indukcji dostępnych do badań pól magnetycznych wynosiłby od kilkudziesięciu do kilku T (56 T w przypadku akceleratora LHC i 4,6 T w przypadku akceleratora Solaris). Jednocześnie próbki te byłyby poddane działaniu silnego pola elektrycznego o natężeniu od kilkunastu GV/m do kilkuset kV/m. Czas trwania impulsów tych pól byłby w granicach od kilkunastu do kilkudziesięciu fs. Pól magnetycznych i elektrycznych o takich parametrach nie można wytworzyć innymi metodami. Można się, więc spodziewać, że wykorzystanie tych pól pozwoliłoby prowadzić badania w niedostępnym dotychczas obszarze i uzyskać odkrywcze wyniki, np. na temat bardzo szybkich procesów przemagnesowania materiałów, czy odporności układów elektronicznych na zakłócenia lub zniszczenie przez broń elektromagnetyczną. Zalety wykorzystania do wytwarzania tych pól paczek cząstek naładowanych to uniknięcie problemów związanych z wytrzymałością materiału i stałymi czasowymi obwodów elektrycznych, limitującymi czas trwania impulsu. Zbudowanie komory zaproponowanej przez dr. hab. Stanisława Bednarka i przedstawionej w Rozdziale 2. pozwoliłoby na seryjne badanie próbek, co ułatwiłoby prowadzenie badań i zmniejszyło koszty.

Z obliczeń przeprowadzonych w rozdziałach 5-6 wynika, że zastosowanie uzwojeń wykonanych z wolframu, chłodzonego ciekłym helem do temperatury 1K w celu radykalnego zmniejszenia jego oporności właściwej daje trzy nowe możliwości wytwarzania silnych pól magnetycznych. Pierwsza z nich to wielokrotne (o czynnik rzędu 10^3 - 10^4) zmniejszenie mocy zasilania cewek, przy zachowaniu dotychczasowych, stosunkowo niewielkich objętości, w których wytwarzane są silne pola przez magnesy rezystywne. Druga możliwość polega na zwiększeniu objętości wytwarzanego pola magnetycznego, przy utrzymaniu stosunkowo wysokiej mocy zasilania. Z kolei trzecia możliwość, to zastosowanie tych uzwojeń do radykalnego zwiększenia wartości indukcji wytwarzanego pola w niewielkiej objętości przy użyciu dużej mocy zasilania. Wykorzystana w Rozdziale 6. druga alternatywa i zaprojektowanie magnesu Bittnera o średnicy otworu 400 mm oraz małej mocy zasilania, pozwoliłaby na prowadzenie badań dużych obiektów w polu magnetycznym o indukcji ponad 32 T. Rozpatrywana w rozdziale 5, innowacyjna cewka z mimośrodowo umieszczonym otworem, pozwoliłaby na wytwarzanie pola

magnetycznego o indukcji 55,1 T w otworze o znacznie mniejszej średnicy, wynoszącej 100 mm, ale o większej długości oraz przy zachowaniu dużej jednorodności tego pola wzdłuż osi otworu. Zaletą tej cewki oprócz małej mocy zasilania jest również znaczne zredukowanie rozproszonego pola magnetycznego na zewnątrz cewki, także pozioma orientacja otworu. Taka cewka oprócz zastosowań do badania w silnym polu magnetycznym obiektów o stosunkowo dużej objętości, mogłaby znaleźć zastosowanie również w procesach technologicznych do formowania struktury materiałów.

Uwagi końcowe recenzenta. Zawarte w tej pracy badania mają (z konieczności) charakter teoretyczny, chciałbym jednak wyrazić nadzieję, że prezentowane wyniki zostaną wykorzystane do realizacji opisanych lub podobnych projektów, albo przyczynią się opracowania lepszych rozwiązań w technice wytwarzania silnych pól magnetycznych. Recenzowana praca dotyczy bardzo aktualnego problemu wytwarzania stałych i impulsowych pól magnetycznych o dużej indukcji pola magnetycznego B i krótkich czasów trwania t tego pola w przypadku źródeł impulsowych.

Autor skorzystał z patentowanych pomysłów promotora i przeprowadził bardzo pracochłonne i skomplikowane wyliczenia wyznaczające ważne parametry proponowanych urządzeń. Praca jest skonstruowana poprawnie, jej treść jest przejrzysta i napisana dobrą polszczyzną.

Mam krytyczną uwagę związaną z nie umieszczeniem w spisie literatury 2 prac, których współautorem jest Doktorant oraz nie wskazanie w pracy jakie rachunki są autorstwa Doktoranta. Zawarte w tych pracach informacje w dużej mierze są częścią recenzowanej pracy doktorskiej. Uważam także, dla lepszej czytelności rysunki opisujące komory powinny być kolorowe, co znacznie ułatwiłoby czytelnikowi zrozumienie przedstawianych konstrukcji.

Podsumowując: pozytywnie oceniam pracę doktorską mgr. Juliana Płoszajskiego, uważam że spełnia ona warunki stawiane w przepisach dotyczących rozpraw doktorskich i stawiam wniosek o dopuszczenia Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

