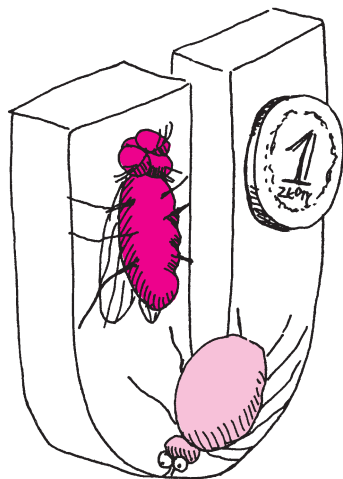


Najsilniejsze magnesy świata

Stanisław BEDNAREK



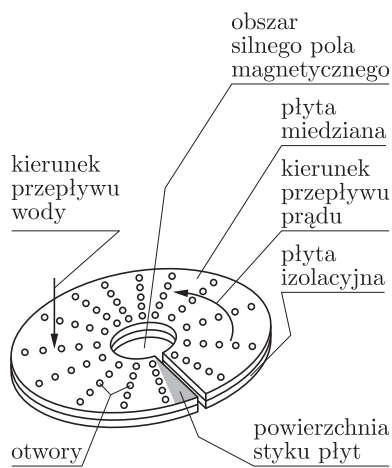
Pole magnetyczne jest obiektem fizycznym powszechnie występującym w przyrodzie. Różnego rodzaju pola magnetyczne są wytwarzane zarówno przez niektóre cząstki elementarne, np. elektrony, jak i gwiazdy czy galaktyki. Tak więc cała przestrzeń Wszechświata, od skali rozmiarów atomowych aż do skali rozmiarów kosmicznych, wypełniona jest przez silniejsze lub słabsze pola magnetyczne. Występowanie pola magnetycznego w określonym obszarze stwierdza się, wykrywając jego skutki w postaci sił działających na bieguny magnetyczne lub na poruszające się ładunki elektryczne, których uporządkowany ruch stanowi przepływ prądu. Pole magnetyczne można przedstawić graficznie za pomocą linii pola pokazujących tor, po którym poruszałyby się północny biegun magnetyczny umieszczony w tym polu. Do ilościowego opisu pola magnetycznego używa się wielkości nazywanej indukcją magnetyczną.

Pole magnetyczne	Indukcja (T)
najsłabsze mierzalne	$8 \cdot 10^{-15}$
pracującego mózgu	10^{-13}
przestrzeni międzygwiazdnej (średnio)	10^{-10}
ziemskie (średnio)	$6,5 \cdot 10^{-5}$
maszyn elektrycznych	0,005 do 2
elektromagnesów rdzeniowych	0,1 do 2,5
Słońca	0,01 do 3
urządzeń fizyki jądrowej	0,5 do 3,5
magnesów trwałych	0,001 do 4,2
magnesów nadprzewodzących	do 20
magnesów bezrdzeniowych	do 30
najsilniejsze stacjonarne w laboratorium	50
najsilniejsze impulsowe w laboratorium	2500
silnego impulsu laserowego (w ognisku)	3000
gwiazd neutronowych	10^6 do 10^9
pulsarów radiowych, tzw. magnetarów	10^{10}

Indukcja pola magnetycznego jest równa jednej tesli (1 T), jeżeli pole to działa siłą jednego niutona na przewodnik o długości jednego metra, umieszczony prostopadle do linii tego pola, podczas przepływu w przewodniku prądu o natężeniu jednego ampera.

Zakres indukcji znanych obecnie pól magnetycznych jest bardzo szeroki i obejmuje 25 rzędów wielkości. Charakterystyczne przykłady z tego zakresu zostały zebrane w tabeli. Wytwarzanie pól magnetycznych o indukcji mniejszej niż kilkanaście setnych tesli nie stanowi problemu. Takie pola wytwarzane są np. przez magnesy spotykane w szkolnych pracowniach fizycznych lub używane w domu do przytrzymywania kartek na drzwiach lodówki albo stosowane w zatraskach meblowych. Również pola magnetyczne o indukcji kilku dziesiątych tesli wytwarzane są bez większych problemów przy użyciu magnesów trwałych, produkowanych ze stopów żelaza z kobaltem, niklem i glinem, nazywanych stopami alnico. Za pomocą pojedynczych magnesów trwałych można też wytwarzać pola magnetyczne o indukcji około jednej tesli. W tych przypadkach magnesy wykonywane są ze stopów żelaza z samarem i kobaltem albo z ferrytów zawierających bor i neodym. Takie magnesy są jednak bardzo kosztowne. Najsilniejsze pole magnetyczne, które udało się wytworzyć za pomocą specjalnego układu magnesów trwałych, miało indukcję 4,2 T. Alternatywnym sposobem wytwarzania pól magnetycznych w zakresie indukcji do około 2,5 T są elektromagnesy. Są to szpule nałożone na żelazne rdzenie, na które nawinięto odpowiednio dużą liczbę zwojów miedzianego drutu i podłączono jego końce do źródła prądu. Wadą elektromagnesów, szczególnie tych, przez które płyną prądy o dużym natężeniu, jest silne nagrzewanie się, dlatego elektromagnesy wytwarzające pola magnetyczne o większej indukcji wymagają chłodzenia. W tym celu między zwojami umieszcza się przekładki i zamyka całe uzwojenie w szczelnej obudowie. Czynnikiem chłodzącym jest najczęściej woda destylowana, wtłaczana do obudowy i opływająca zwoje.

Do wytwarzania pól magnetycznych o indukcji od kilku do kilkudziesięciu tesli stosuje się (elektro)magnesy bezrdzeniowe, w których przepływ prądu o możliwie dużym natężeniu odbywa się jak najbliżej centralnej części, gdzie wytwarzane jest najsilniejsze pole. Prototyp magnesu bezrdzeniowego do wytwarzania

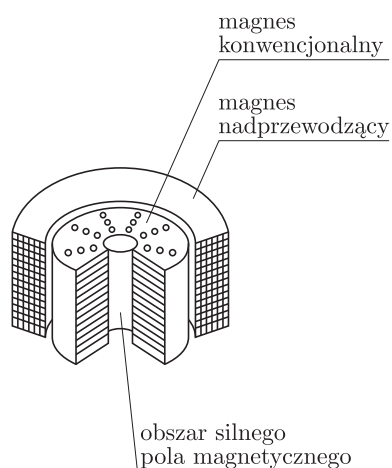


Rys. 1

silnych pól magnetycznych został skonstruowany przez F. Bittera w Cambridge około siedemdziesięciu lat temu. Magnes tego typu, nazywane dziś magnesami Bittera, składają się z pakietu miedzianych płyt w kształcie szerokich pierścieni z przecięciem wzdłuż promienia (rys. 1). Płyty te częściowo zachodzą na siebie i poprzekładane są identycznymi płytami z materiału izolacyjnego. W ten sposób tworzą one rodzaj powierzchni śrubowej, stanowiącej uzwojenie, przez które może przepływać prąd o natężeniu kilku tysięcy amperów. Silne pole magnetyczne o indukcji dochodzącej do 25 T wytwarzane jest w otworze w środku pakietu. Ponieważ magnesy takie wytwarzają bardzo dużo ciepła, wszystkie płyty zaopatrzone są w gęstą sieć otworów, przez które wzdłuż osi pakietu przepompowuje się wodę chłodzącą w ilości dochodzącej do kilku tysięcy litrów na minutę. Cały pakiet ściśnięty jest bardzo wytrzymałymi śrubami, żeby nie został zdeformowany przez potężne siły elektrodynamiczne działające podczas przepływu prądu.

Problemy związane z wytwarzaniem ciepła nie występują w magnesach nadprzewodzących. Taki magnes to po prostu szpula, na którą nawinięto kilkaset zwojów z drutu nadprzewodzącego, wykonanego np. ze stopu niobu i cyny.

Jak wiadomo, materiały nadprzewodzące po ochłodzeniu poniżej temperatury krytycznej tracą opór elektryczny, przepływ prądu elektrycznego nie powoduje więc ich ogrzewania. Niestety, temperatury krytyczne większości materiałów nadprzewodzących są bardzo niskie i wynoszą od kilku do kilkunastu kelwinów. Dlatego magnesy nadprzewodzące muszą być umieszczane w podwójnych termosach, zwanych też naczyniami Dewara i wstępnie wychłodzone przy użyciu ciekłego azotu i helu. Ponadto, silne pole magnetyczne, spowodowane np. zbyt dużym natężeniem płynącego prądu, powoduje zanik nadprzewodnictwa. Z tego powodu przy użyciu magnesów nadprzewodzących można wytwarzać obecnie silne pola magnetyczne o indukcji nieprzekraczającej 20 T.



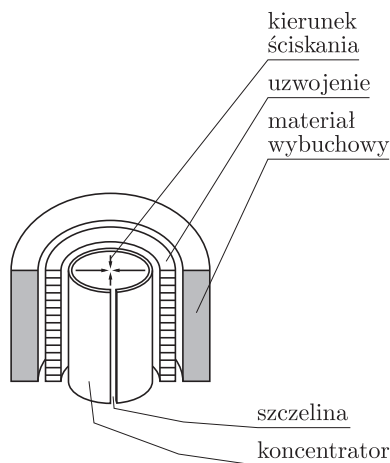
Rys. 2

Znacznie silniejsze pola magnetyczne, o indukcji do 50 T, wytwarza się przy użyciu tzw. magnesów hybrydowych, złożonych z konwencjonalnego magnesu typu Bittera lub polihelikalnego, umieszczonego wewnątrz magnesu nadprzewodzącego (rys. 2). W ten sposób magnes nadprzewodzący chroniony jest przed zbyt silnym polem, a wypadkowa indukcja magnetyczna na osi układu jest w przybliżeniu równa sumie indukcji pól pochodzących od obu magnesów. Przy obecnych możliwościach technicznych nie udaje się wytworzyć silnych pól magnetycznych w formie ciągłej o indukcji powyżej 50 T. Naprężenia powodowane przez siły elektrodynamiczne przekraczają granicę wytrzymałości miedzi. Co prawda, specjalne stopy miedzi z berylem mają większą wytrzymałość, ale ich przydatność do wykonania uzwojeń jest ograniczona przez większą oporność elektryczną – powstaje wówczas zbyt wiele ciepła, którego nie można odprowadzić i uzwojenie ulega stopieniu. Z tych powodów pola magnetyczne o indukcji przekraczającej tę granicę mogą być wytwarzane tylko w postaci impulsów.

Pola magnetyczne o indukcji do 100 T można wytwarzać w formie impulsów trwających kilka dziesiątych sekundy, przepuszczając odpowiednio silny impuls prądu, otrzymany przez rozładowanie baterii kondensatorów o pojemności setnych części farada, naładowanej do napięcia kilku tysięcy woltów. Takie pola nazywane są czasem quasi-stacjonarnymi. Do ich wytwarzania stosuje się cewki liczące kilkaset zwojów przewodu wykonanego ze stopu miedzi z berylem, wzmocnione taśmami z laminatów epoksydowych i wtłoczone w stalowe pancerze. W celu zmniejszenia oporu elektrycznego i zabezpieczenia cewki przed stopieniem ochładza się ją ciekłym azotem do temperatury około -100°C . W czasie impulsu pola cewka ogrzewa się do temperatury kilkudziesięciu stopni i dlatego przed kolejnym użyciem należy ją ponownie wychłodzić. Cewki takie wytrzymują zwykle kilkaset impulsów.

Jeszcze silniejsze pola magnetyczne, o indukcji 100–300 T, można otrzymać tylko podczas zniszczenia cewki. Używa się w tym celu cewek złożonych z jednego

lub kilku zwojów pręta wykonanego z miedzi lub ze stopu miedzi z berylem. Po przepuszczeniu przez taką cewkę impulsu prądu o natężeniu około 10^6 A, trwającego około 10^{-5} s, cewka ulega rozpadowi i wyparowaniu pod wpływem fali uderzeniowej i ciepła.



Rys. 3

Najsilniejsze pola magnetyczne o indukcji ponad 1000 T otrzymuje się tzw. metodą wybuchowej kompresji strumienia magnetycznego. Układ przeznaczony do realizacji tej metody składa się z uzwojenia, wytwarzającego początkowy impuls pola o indukcji 10–20 T w obszarze o średnicy kilkudziesięciu cm (rys. 3). Wewnątrz uzwojenia znajduje się koncentrator w postaci metalowej rury z podłużnym przecięciem. Na zewnątrz uzwojenie otoczone jest cylindrem z materiału wybuchowego. Po wytworzeniu początkowego impulsu pola, które łatwo wnika do koncentratora, materiał wybuchowy zostaje zdetonowany. Powstająca przy tym fala uderzeniowa zgniata cewkę, zamyka szczelinę koncentratora i powoduje jego dalsze ściskanie. W poruszających się prostopadle do linii pola magnetycznego przewodzących ściankach koncentratora indukowany jest prąd elektryczny, którego pole magnetyczne wzmacnia pole początkowe. Tą metodą otrzymano pole magnetyczne o rekordowej indukcji 2500 T.

Wytwarzanie coraz silniejszych pól magnetycznych to nie tylko dziedzina rywalizacji, w której uczestniczy kilkanaście znanych laboratoriów z całego świata. Silne pola magnetyczne są przede wszystkim niezbędne do badań w wielu dziedzinach fizyki i inżynierii materiałowej. Przykłady takich badań to testowanie nowych pół- i nadprzewodników, kwantowy efekt Halla, jądrowy rezonans magnetyczny czy kontrolowana synteza termojądrowa.

Nieustający konkurs Wirtualnego Wszechświata i Delt!

Rozwiąż w listopadzie grudniowe zadanie z myszką i wygraj książkę z Wydawnictwa Prószyński i S-ka.

Więcej informacji: <http://www.wiw.pl/delta/konkurs>



Zadania

Redaguje Mikołaj ROTKIEWICZ

M 1006. Dany jest zbiór $n + 1$ odcinków, których końcami są wierzchołki n -kąta foremnego. Wykazać, że co najmniej dwa spośród nich są równoległe.

Rozwiązanie na str. 14

M 1007. Na okręgu umieszczono 10 liczb, których suma wynosi 100. Suma dowolnych trzech kolejnych liczb na okręgu jest nie mniejsza od 29. Niech a będzie największą spośród tych dziesięciu liczb. Znaleźć największą możliwą wartość a .

Rozwiązanie na str. 2

M 1008. Okrąg podzielono na 7 łuków tak, że suma dowolnych dwóch kolejnych łuków jest łukiem opartym na kącie środkowym nie większym od 103° . Znaleźć minimalny możliwy kąt α , oparty na najkrótszym z łuków.

Rozwiązanie na str. 16

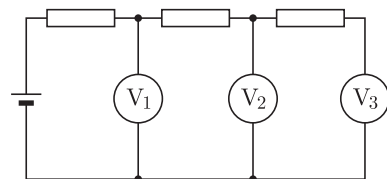
Redaguje Ewa CZUCHRY

F 583. Mamy obwód elektryczny złożony z takich samych oporników i woltomierzy (rys. 1). Pierwszy woltomierz pokazuje $U_1 = 10$ V, a trzeci $U_3 = 8$ V. Ile pokazuje drugi woltomierz?

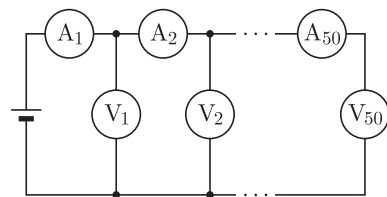
Rozwiązanie na str. 3

F 584. Obwód elektryczny pokazany na rysunku 2 składa się z 50 takich samych amperomierzy i 50 takich samych woltomierzy. Pierwszy woltomierz pokazuje $U_1 = 9,6$ V, pierwszy amperomierz $I_1 = 9,5$ mA, a drugi $I_2 = 9,2$ mA. Wyznaczyć sumę wskazań wszystkich woltomierzy.

Rozwiązanie na str. 1



Rys. 1



Rys. 2