

# KOLEJKA NADPRZEWODNIKOWA

## 1. BUDOWA MODELU

Model składa się z listwy blaszanej pokrytej magnesami (dalej zwanej: „szyną”) oraz z nadprzewodnika umieszczonego we właściwie dowolnym, szczelnym pojemniku (dalej zwanych: „wagonikiem”). Szyna ma za zadanie generować silne pole magnetyczne będące torem dla wagonika. Ponieważ pole ma być silne, użyto magnesów neodymowych o kształcie prostopadłościanu namagnesowanych wzdłuż najdłuższego boku. Magnesy ułożone są na płasko na blasze w trzech rzędach w taki sposób, że rząd wewnętrzny jest ułożony biegunami w przeciwną stronę niż rzędy zewnętrzne (rys. 1). Inne ułożenie jednorodnego pola magnetycznego z takich magnesów (np. wszystkie trzy rzędy zwrócone w tę samą stronę) jest właściwie niewykonalne ze względu na siłę tych magnesów.

N	N	N	N	N
S	S	S	S	
N	N	N	N	

Rys. 1. Schemat ułożenia magnesów na szynie

Łatwo zauważyć, że sąsiedzi „wzdłuż” mają bardzo blisko bieguny o tym samym znaku, co oznacza, że się odpychają. Przed rozsunieniem się tych zbuntowanych sąsiadów broni jednak stalowe podłoże, które przyciąga każdy magnes z siłą wystarczającą zahamowanie rozsuwania. Bez grubej blachy tor o tym ułożeniu nie utrzymałby się, więc blacha taka nie może być ze stali austenitycznej! Na każdym końcu toru znajduje się magnes ułożony poprzecznie do tych, które tworzą tor. Ich zadaniem jest utworzenie na końcach toru pola innego niż to, w którym porusza się wagonik. Przy czym nieważne jest, jakie to pole będzie, ważne jedynie, aby było w ogóle i było inne niż tor (więcej szczegółów w następnym rozdziale).

Kolejnym elementem kolejki jest wagonik. Składa się on z nadprzewodnika (spiekane tlenki itru, baru i miedzi o składzie atomowym:  $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ ) w kształcie krążka. Po składzie widać, że jest to materiał ceramiczny, więc jak każda ceramika – jest kruchy. Żółta substancja widoczna na niektórych powierzchniach nadprzewodnika to po prostu klej. Krążek ma już swoje lata służby i nie raz popękał. Jednak każdy defekt

obniża sprawność działania nadprzewodnika, a szczególnie tak duży jak poklejone pęknięcie! Krażek należy umieścić w jakimkolwiek naczyniu o płaskim denku, które musi być szczelne, ponieważ do pojemnika wlewana jest ciecz. Dobrym pomysłem jest zastosowanie pojemnika o słabej przewodności cieplnej (kubek styropianowy) lub izolowanego w inny sposób, co znacznie wydłuży czas pracy nadprzewodnika.

Do rozpoczęcia pokazu niezbędny jest styropianowy dzbanek oraz diuar z ciekłym azotem.

## 2. DZIAŁANIE MODELU

**JAKAKOLWIEK** zmiana pola magnetycznego w pobliżu materiału przewodzącego prąd (czy to przewodnika czy nadprzewodnika) powoduje wytworzenie prądu wewnątrz tego materiału. Płynący prąd elektryczny zawsze wytwarza wokół siebie pole magnetyczne. Jeśli prąd ten jest wzbudzony zmianą pola magnetycznego, to pole powstałe z powodu płynącego prądu będzie przeciwnie do ruchu pola zewnętrznego.

Dla przykładu: magnetyczny walec wrzucony do pionowej, miedzianej rury nie spadnie swobodnie. Będzie spadał bardzo wolno, ponieważ jego ruch powoduje powstawanie prądu wirowego w rurze. Ten prąd z kolei wytwarza pole magnetyczne pchające magnes z powrotem do góry. Magnes jednak zsunie się w dół, ponieważ wzbudzony prąd wirowy zaniknie z czasem w wyniku istnienia oporu wewnątrz przewodnika. Zatem wraz z prądem zaniknie siła podtrzymująca magnes. Ten opada więc dalej, znowu tworząc spowalniający go prąd wirowy, itd.

Opisany wyżej przykład dotyczy przewodnika. Jeśli zastosować nadprzewodnik, to wzbudzony prąd nie będzie zanikał z czasem. Magnes wrzucony do rury z nadprzewodnika nie spadłby na dół, ponieważ wzbudziłby nie zanikający prąd wirowy, a zatem i stałe, przeciwne pole, wystarczające do zrównoważenia siły ciężkości magnesu. Dlatego właśnie możliwa jest analogiczna lewitacja nadprzewodnika nad magnesem (patrz: rozdział 3). Efekt ten może przypominać wypychanie pola magnetycznego przez nadprzewodnik, jednak to słabe wyjaśnienie dla wszystkich obserwowanych zjawisk.

Może pojawić się pytanie: dlaczego krążek zamrożony wewnątrz pola zostaje w tym polu, a zamrożony poza polem nie daje się do niego „włożyć”?

Stosowany krążek ceramiczny jest izolatorem w temperaturze pokojowej, natomiast nadprzewodnikiem staje się dopiero w temperaturze poniżej 80 K. Jest to temperatura osiągalna za pomocą ciekłego azotu (około 70 K), łatwo dostępnego na Wydziale. Zamrożenie go poza polem i zbliżanie do magnesu powoduje, że zbliżany jest nadprzewodnik do magnesu. Powstaje siła przeciwdziałająca temu ruchowi. W drugim zaś przypadku

zblizamy izolator do magnesu – brak siły „przekory”. Następnie zamrożenie krążka i przejście w stan nadprzewodnictwa wewnątrz dowolnego pola magnetycznego spowoduje, że jakakolwiek próba zmiany położenia tak zamrożonego krążka będzie tożsama ze zmianą pola magnetycznego w jego otoczeniu, a w konsekwencji pojawi się prąd wirowy i przeciwna do ruchu siła oporu. Oczywiście, oderwanie siłą wagonika od toru jest możliwe, tylko po co?

Wagonik poruszający się po torze znajduje się w polu, które nie zmienia się wzdłuż toru (jednakowe ułożenie magnesów), dlatego ruch ten jest swobodny. Jedyne czynniki rozpraszające energię ruchu wagonika są: opór powietrza, nierówne ułożenie magnesów toru. Jednak ze względu na to, że w każdym innym kierunku pole się zmienia, to ruch wzdłuż nich napotyka na bardzo silny opór z przyczyn opisanych powyżej (ruch w poprzek toru, ruch wprost na krańce toru – „bufory”, ruch pionowy, czy nawet obracanie nadprzewodnika w miejscu).

Siła pomiędzy nadprzewodnikiem i magnesem nie jest po prostu siłą odpychania czy przyciągania. Jest siłą przeciwną do ich względnego ruchu, która nie maleje z czasem!

### 3. MOŻLIWOŚCI I OGRANICZENIA MODELU

Najpopularniejszym zastosowaniem modelu jest zamrożenie krążka ustawionego kilka milimetrów nad torem (np. na pliku kartek), usunięcie podkładki i delikatne pchnięcie lewitującego wagonika wzdłuż toru. Uwaga, ograniczenie! Pchnięcie powinno być delikatne, ponieważ zbyt mocne może wyrzucić wagonik z toru. Wagonik, który spada na podłogę (najczęściej z twardej terakoty) na ogół pęka. Wagonik po dojechaniu do końca toru natrafia na inne pole magnetyczne (poprzeczny magnes), więc się odbija (w sposób dokładnie opisany w poprzednim rozdziale) od tego „innego” pola i wraca z powrotem. Możliwe jest zamrożenie nadprzewodnika na różnych wysokościach, przy czym należy pamiętać, że natężenie pola magnetycznego maleje z kwadratem odległości od jego źródła. Najlepiej zamrażać blisko magnesu, ale wtedy efekt lewitacji jest słabo widoczny. Z kolei zamrożenie zbyt daleko spowoduje, że wagonik może po prostu spaść obok toru. Należy pamiętać, że nie „podlewany” regularnie ciekłym azotem nadprzewodnik w końcu się ogrzeje powyżej tych 80 K i stanie się zwykłą ceramiką tlenkową – upadnie na tor i będzie grzecznie czekać.

Modyfikacja tego zastosowania dopuszcza odwrócenie już gotowego układu szyną do góry. Tor jest ciężki, więc trzeba użyć do tego co najmniej dwóch rąk, a trzecią trzymać wagonik. Uwaga! Próba odwrócenia toru z nietrzymanym (swobodnie jeżdżącym) wagonikiem na ogół skutkuje tym, że

wypada on z toru dość mocno rozpędzony! Unikać! Najlepiej odwracać zaraz po odparowaniu z pojemnika ciekłego azotu – inaczej można się niespodziewanie oblać.

Innym przykładem zastosowania może być zamrożenie nadprzewodnika około 1 cm nad pojedynczym magnesem (najlepiej nad dużym, neodymowym, w kształcie krążka lub kwadratu). Po przejściu ceramiki w stan nadprzewodnictwa można ostrożnie wyjąć podkładkę dystansową, unieść wagonik i obserwować unoszący się w ślad za nim magnes. W tym przypadku znacznie łatwiej jest odwrócić całość do góry dnem, jednak możliwe są dwie niespodzianki: magnes będzie za daleko i przy przekręcaniu po prostu się oderwie, zamocowanie nadprzewodnika do pojemnika będzie zbyt słabe i magnes „ciążąc” na nadprzewodnik wgniecie go w stronę wylotu pojemnika i spadnie na odwrócone dno pojemnika (choć sam nadprzewodnik nie powinien wypaść, bo będzie trzymany dalej przez magnes – po prostu pojemnik przesunie się względem układu).

#### 4. ŚRODKI OSTROŻNOŚCI I KONSERWACJA MODELU

Jak zostało wspomniane, do pokazu niezbędny jest ciekły azot. Jest to ciecz o niezwykle niskiej temperaturze (względem żywego, ludzkiego ciała), dlatego zaleca się zachowanie szczególnej ostrożności przy przelewaniu tej cieczy. Kontakt z ciekłym azotem nie jest śmiertelnie groźny, jednak w szczególnych przypadkach można nabawić się poważnych odmrożeń. Całkowicie zabronione jest picie ciekłego azotu! Natomiast zamrożone suche (bez kremów i nadzień!) ciastka można spożywać z zachowaniem szczególnej ostrożności.

Ciekły azot jest cieczą o stosunkowo małym cieple właściwym, dlatego bardzo szybko odparowuje, gdy wchodzi w kontakt z bardzo gorącym przedmiotem (np. z żywą, ludzką dłonią). Nie zaleca się wkładania dłoni do ciekłego azotu. Włożenie ręki do dzbanka z ciekłym azotem powoduje, że pomiędzy dłonią a cieczą błyskawicznie tworzy się poduszka gazowa skutecznie izolująca przepływ ciepła z dłoni (ale tylko przez krótką chwilę! - zachować ostrożność!). Podobnie, polanie azotu po gorącej powierzchni (np. blat stołu) spowoduje, że ciecz zacznie gwałtownie parować całą objętością i każda kropla otoczy się gazową powłoką. Skutkiem tego, krople azotu ślizgają się po powierzchniach dopóki nie odparują.

Uwaga! Dotknięcie azotu o temperaturze  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  przez krótką chwilę nie grozi odmrożeniami z powodów opisanych powyżej. Należy jednak zwrócić uwagę, że dotknięcie przedmiotu o tej samej temperaturze, który wcale nie paruje (np. blaszka miedziana uprzednio zanurzona w ciekłym azocie) jest już naprawdę groźne w skutkach! – stosować rękawice ochronne. Nawet pochłapanie ubrania ciekłym azotem może być bolesne.

Zdarza się, że podczas transportu, czy rozpakowywania szyny, zostanie ona o coś uderzona. Z doświadczenia wynika, że powstające drgania ułatwiają rozsuwanie się magnesów. Najczęściej dochodzi do stanu, w którym magnesy trójkami układają się pod kątem do osi szyny. Wszelkie odchylenia tego typu powodują, że pole magnetyczne nad szyną nie jest już całkiem jednorodne. Każda nierówność powoduje rozproszenie energii kinetycznej wagonika (czyli zwalnia na wertepach). W skrajnym przypadku nierówności może nastąpić wykolejenie całego interesu. Gdy nierówności staną się wyraźnie widoczne (wagonik będzie mocno drgał przy przejeżdżaniu nad krzywym podłożem i widocznie tracił prędkość), należy tor wyprostować poprzez lekkie stukanie młotkiem (palcami raczej będzie ciężko, ale próby nie są zabronione). W żadnym przypadku, nie można jednak stukać stalowym młotkiem bezpośrednio w magnesy – grozi to ich pęknięciem. Nasuwa się propozycja z młotkiem gumowym, ale ten jest z reguły wielki i nieporęczny. Dużo lepiej jest przyłożyć do zbuntowanych magnesów kawałek drewna i stukać w drewno, wtedy nie popękają.

W przypadku pęknięcia magnesu tworzącego szynę należy go usunąć metodą opisaną powyżej, a na jego miejsce wstawić nowy (zamówiony np. ze sklepu internetowego „enes”). Uwaga! Siła tych magnesów może spokojnie zmiażdżyć skórę, w przypadku nieostrożnego przykładania go do blachy, czy do innych magnesów. Niezbędna jest szczególna ostrożność oraz precyzja przy dokładaniu brakujących magnesów!

Naprawą pękniętego nadprzewodnika z reguły zajmował się dziekan ds. studenckich. W przypadku skrajnej dewastacji pozostaje tylko kupno nowego nadprzewodnika, ale... Nadprzewodnik tego rodzaju i tej wielkości kosztuje 3000-4000 PLN, dlatego zaleca się zachowanie skupionej uwagi przy pokazach.