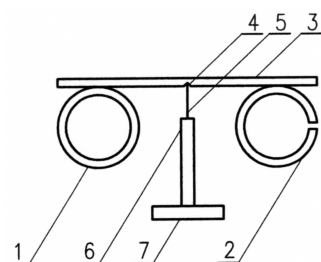


Pijany magnes w magicznych okularach

Stanisław BEDNAREK

Wiele zjawisk fizycznych udaje się pokazać, wykonując doświadczenia przy użyciu środków, którymi posługujemy się w życiu codziennym. Można tego dokonać na dwa sposoby. Pierwszy z nich to ten znany z podręczników – na ogół mało interesujący. Drugi to sposób niestandardowy, pozwalający zadziwić widzów, a czasem nawet samego wykonawcę. W ten właśnie sposób potraktujemy dziś zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Znane z podręczników doświadczenie polega na wsuwaniu magnesu sztabkowego do cewki połączonej z miernikiem wskazówkowym. My jednak postąpimy inaczej.

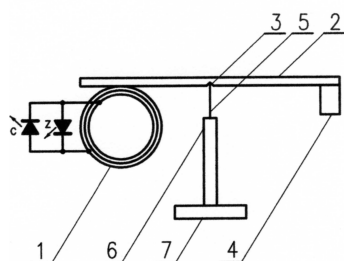
Przed przystąpieniem do doświadczeń należy przygotować: magnes neodymowy w kształcie krążka o średnicy około 20 mm i wysokości około 10 mm, kawałki listewki i deseczki, igłę do szycia ręcznego, aluminiowy ceownik (kształtownik mający przekrój litery C) o długości około 60 cm i szerokości 30 mm, kilkadziesiąt metrów drutu miedzianego o średnicy 0,1–0,2 mm w izolacji z emalii, plastikową szpulkę, np. od plastra medycznego, czerwoną i zieloną diodę LED, miedzianą lub aluminiową rurkę o długości około 1 m i średnicy wewnętrznej o 2–3 mm większej niż średnica magnesu oraz o możliwie grubej ścianie, rurkę plastikową o takich samych rozmiarach oraz klej epoksydowy. Przydadzą się też spotykane niemal w każdym domu narzędzia – piłka z brzeszczotami do drewna i metalu, wiertarka i lutownica.



Rys. 1. Budowa przyrządu okularowego; 1 – pierścien miedziany, 2 – pierścien miedziany z przecięciem, 3 – listewka, 4 – zagłębienie, 5 – igła, 6 – słupek, 7 – deseczka.

Pracę rozpoczynamy od zbudowania prostego przyrządu przedstawionego na rysunku 1. Z rurki miedzianej lub aluminiowej odcinamy dwa pierścienie o szerokości około 1 cm i jeden z nich przecinamy na obwodzie. Oba pierścienie przyklejamy symetrycznie klejem epoksydowym do listewki o długości około 30 cm blisko jej końców. W połowie długości listewki nawiercamy małe zagłębienie. Na końcu innego kawałka listewki wiercimy otworek, skierowany podłużnie i mocujemy w nim za pomocą kleju koniec igły zakończony otworkiem. Drugi koniec tej listewki łączymy z deseczką. W ten sposób otrzymujemy podstawkę z ostrzem igły, na którym opieramy listewkę z pierścieniami. Ostrze powinno wchodzić w zagłębienie, a listewka zajmować pozycję poziomą i swobodnie się obracać. Ewentualne pochylenie listewki usuwamy, dociążając (np. klejem) unoszący się koniec. Gotowy przyrząd bardzo przypomina binokle, czyli używane dawno temu okulary – stąd jego nazwa.

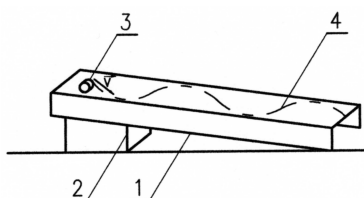
Czas na pierwsze doświadczenia. Do nieruchomego pierścienia bez przecięcia zbliżamy magnes, ustawiając jego płaską powierzchnię równoległą do płaszczyzny pierścienia. Zauważamy, że pierścien odsuwa się od magnesu. Gdy magnes odsuwamy od pierścienia, wtedy podąża on za magnesem. To samo wykonujemy dla pierścienia z przecięciem. Tym razem, zarówno przy zbliżaniu, jak i oddalaniu magnesu, pierścien pozostaje nieruchomy. Odwracamy magnes i powtarzamy doświadczenie podczas zbliżania i oddalania przeciwnego bieguna. Efekty są takie same. Dlaczego tak się dzieje? W odpowiednich tablicach fizycznych możemy sprawdzić, że miedź jest diamagnetykiem, więc powinna być wypychana z silniejszego pola, istniejącego w sąsiedztwie zbliżanego magnesu. No dobrze, ale dlaczego podczas oddalania magnesu obserwujemy przyciąganie pełnego pierścienia, a pierścien z przecięciem pozostaje nieruchomy? Przecież zawiera on prawie taką samą ilość miedzi? Przyczyną tych efektów jest indukowany w pierścieniu prąd elektryczny. Jego kierunek przepływu określa reguła Lenza. Zgodnie z nią kierunek indukowanego prądu jest taki, że pole magnetyczne, wytworzone przez ten prąd, przeciwdziała zmianom pola magnetycznego, które przyczyniły się do powstania tego prądu. Niech, na przykład, do pierścienia będzie zbliżany północny biegun magnesu. Wtedy przepływ prądu indukowanego w pierścieniu odbywa się w takim kierunku, żeby od strony magnesu wytworzony został też biegun północny. Jednocześnie bieguny odpychają się i pierścien jest odsuwany od magnesu. Pierścien możemy tutaj traktować jako krótki magnes. W przeciętym pierścieniu prąd nie płynął,



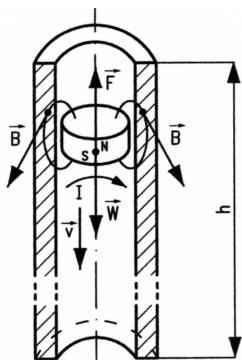
Rys. 2. Modyfikacja przyrządu okularowego; 1 – cewka, 2 – listewka, 3 – wgłębienie, 4 – przeciwciężarek, 5 – igła, 6 – słupek, 7 – deseczka, c, z – diody LED odpowiednio: czerwona i zielona.

więc pierścień ten pozostawał nieruchomy. Oddziaływanie diamagnetyczne między pierścieniami i magnesem też istnieje, ale jest ono zbyt słabe i nie zdoła powodować zauważalnych efektów. Żeby doświadczenie było bardziej zadziwiające, szczelina w przeciętym pierścieniu powinna być jak najmniej widoczna – można ją zamaskować przez wsunięcie przyciętego kawałka tektury.

Czytelnikowi pozostawiamy szczegółowe zbadanie, jakie są relacje między kierunkiem ruchu wybranego bieguna magnesu i kierunkiem przepływu prądu w układzie na rysunku 2, sygnalizowanym odpowiednim kolorem świecącej diody oraz jak zależy to od kierunku włączenia diody i nawinięcia cewki. Dodajmy tylko, że dioda czerwona może świecić jaśniej lub zapalać się wcześniej, ponieważ jest wykonana z innego półprzewodnika (o niższej przerwie energetycznej). Dociekliwy Czytelnik zapyta też, czy zamiast nawijać cewkę można przyłączyć diody bezpośrednio do końców przeciętego pierścienia i zaobserwować świecenie? Niestety, to doświadczenie się nie uda, ponieważ napięcie indukowane w pojedynczym zwoju, którym jest pierścień, wynosi kilka mV, a dioda do zaświecenia potrzebuje napięcia około 1,5 V lub wyższego.



Rys. 3. Sposób przygotowania równi pochyłej; 1 – ceownik aluminiowy, 2 – podstawka, 3 – magnes neodymowy, 4 – tor magnesu, \vec{v} – początkowa prędkość magnesu.



Rys. 4. Siły działające na magnes poruszający się w rurce: h – długość rurki, \vec{W} – ciężar magnesu, \vec{B} – indukcja pola magnetycznego, I – natężenie indukowanego prądu, \vec{F} – siła elektrodynamiczna, \vec{v} – prędkość magnesu, N, S – bieguny magnesu.

Zmiany kierunku prądu pozwala wykazać zmodyfikowana wersja przyrządu okularowego, którą pokazuje rysunek 2. Zamiast pierścieni do listewki przyklejone są cewka i przeciwcieżar. Cewkę wykonujemy, nawijając kilkaset zwojów miedzianego izolowanego drutu na plastikowej szpulce o średnicy wewnętrznej nieco większej niż średnica magnesu. Z końców cewki usuwamy izolację i przylutowujemy do nich końcówki diod, ustawionych w ten sposób, żeby ich kierunki przewodzenia były przeciwne. W tym celu składamy parami dłuższe oraz krótsze końcówki diod i lutujemy je do końców cewki. Następnie cewkę przyklejamy w pobliżu jednego końca listewki, a na drugim końcu mocujemy przeciwcieżarek z nieferromagnetycznego materiału, zapewniający poziomą pozycję listewki. Jeżeli zbliżymy magnes do cewki, to będzie ona odpychana od niego i zaświeci jedna z diod. Podczas oddalania cewka podąża za magnelem i świeci druga dioda. Podobnie jak poprzednio, przyczyną tych efektów są prądy indukowane w cewce i ich oddziaływanie z magnelem.

Układ do wykonania kolejnych doświadczeń jest bardzo prosty (rys. 3). Aluminiowy ceownik odwracamy ramionami w dół i opieramy ukośnie na nieferromagnetycznej podstawie, np. złożonej z kilku książek lub kawałków deseczki. Przy górnym końcu otrzymanej w ten sposób równi pochyłej ustawiamy magnes, tak aby mógł staczać się wzdłuż krawędzi ceownika i puszczamy swobodnie. Magnes stacza się w dół, ale bez trudu można zauważyć, że odbywa się to bardzo powoli – znacznie wolniej niż w przypadku zwykłego krążka. Powtórzmy to doświadczenie, puszczając magnes ustawiony skośnie do krawędzi ceownika. Tym razem magnes zachowuje się jeszcze dziwniej. Wbrew oczekiwaniu magnes nie spada z krawędzi ceownika, tylko zbliżając się do niej, zawraca, poruszając się pomiędzy krawędziami po linii falistej, niczym osobnik po kilku większych drinkach. Przyczyną hamowania magnesu jest jego odpychające oddziaływanie z prądami indukowanymi w ceowniku, podobnie jak w pierścieniach przyrządu okularowego. To oddziaływanie powoduje też zmiany kierunku ruchu magnesu przy zbliżaniu się do krawędzi ceownika. W znajdujących się od dołu ramionach ceownika indukowane są wtedy prądy o większym natężeniu. Zgodnie z podaną regułą Lenza, gdy zbliża się, na przykład, północny biegun magnesu, to prąd płynie w takim kierunku, że przed ramieniem też pojawia się biegun północny i magnes jest odpychany.

W ostatniej serii doświadczeń wykorzystamy rurki. Najpierw wkładamy magnes do górnego końca pionowo ustawionej rurki plastikowej. Zauważamy, że magnes szybko przelatuje przez rurkę. Hamujące działanie oporu powietrza jest prawie niezauważalne. Łatwo obliczyć, ze znanego wzoru $t = \sqrt{2h/g}$ (gdzie $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ to przyspieszenie ziemskie), że czas t spadania magnesu z wysokości $h = 1 \text{ m}$ wynosi 0,45 s. Czas spadania magnesu w plastikowej rurce o długości 1 m jest niewiele większy. Czytelnikowi o szybkim refleksie może jednak uda się go zmierzyć przy użyciu stopera. Powtarzamy to doświadczenie z rurką miedzianą lub aluminiową (rys. 4). Tym razem czas spadania magnesu wielokrotnie wzrasta i może wynieść nawet ponad 20 s. Taki czas bez trudu daje się zmierzyć stoperem. Dla grubociennej rurki miedzianej czas ten bywa jeszcze większy i oglądający doświadczenie mogą pomyśleć, że pijany magnes zasnął w rurce. W rzeczywistości ciężar magnesu jest równoważony przez siłę elektrodynamiczną, spowodowaną przepływem prądu elektrycznego w ściankach rurki. Prąd ten jest indukowany wskutek ruchu magnesu i osiąga duże natężenie dzięki małej oporności właściwej miedzi lub aluminium i grubej ściance rurki. Ruch magnesu jest więc praktycznie jednostajny, poza początkowym i końcowym odcinkiem rurki. Tam, na granicy powietrza i metalu, siła elektrodynamiczna słabnie.