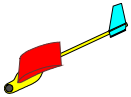
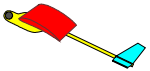
Materiały do wykładu



Fizyka w doświadczeniach



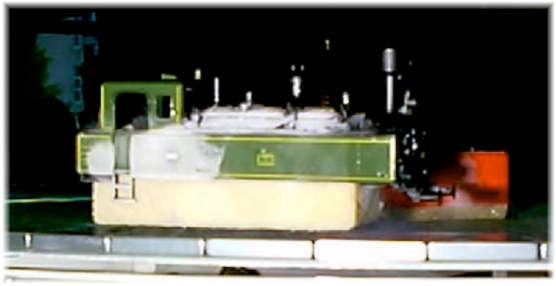
Krzysztof Korona

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

2010-25

Materiały do celów dydaktycznych przeznaczone dla studentów Uniwersytetu Warszawskiego,
Wykorzystanie ich w innych celach jest możliwe pod warunkiem uzyskania zgody autora.

8. Magnetyzm



Rys. 8.1 Pociąg na poduszce magnetycznej

8.1 Wstęp

Plan

1. Wstęp
2. Pole magnetyczne
3. Magnetyzm a elektryczność
4. Właściwości magnetyczne substancji
5. Prądnice
6. Silniki elektryczne
7. Podsumowanie

8.2 Pole magnetyczne

Prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne.

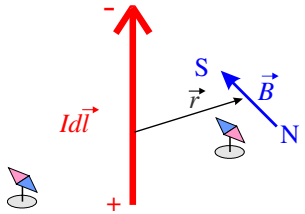
Ustawiamy igłę magnetyczną w pobliżu przewodu, a następnie przepuszczamy prąd przez ten przewód. Igła obraca się, co pokazuje, że płynący prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne.

Prawo Biota-Savarta (sformułowane w 1820 r.) podaje wartość natężenia pola magnetycznego wytwarzanego przez przewodnik, w którym płynie prąd o natężeniu *I*.

$$dH = \frac{I \cdot dl}{4\pi r^2}, \qquad (8.1)$$

H oznacza tutaj natężenie pola magnetycznego, a *dH* przyczynek do tego natężenia dawany przez odcinek przewodu o długości *dl* znajdujący się w odległości *r*.

Jednostką natężenia pola magnetycznego jest A/m.



Rys. 8.2 Pole magnetyczne od przewodu z prądem, wskazywane przez igłę kompasu.

Wielkość pola magnetycznego opisujemy podając natężenie pola magnetycznego *H* lub indukcję pola magnetycznego *B*. Z dala od

materiałów magnetycznych, związek między tymi dwoma wielkościami jest liniowy:

$$B = \mu_0 H, \qquad (8.2)$$

gdzie μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni = $4\pi * 10^{-7}$ Vs/Am.

Na podstawie prawa Biota–Savarta można obliczyć wartość indukcji wytwarzanej przez przewodnik z prądem:

$$dB = \frac{\mu_0 I \cdot dl}{4\pi r^2}, \qquad (8.3)$$

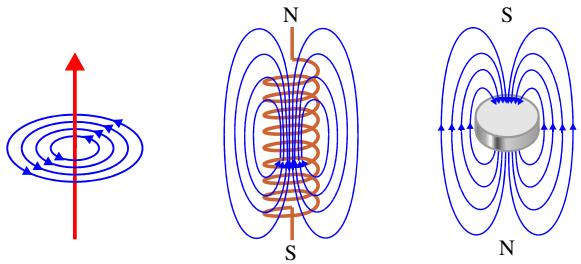
Jednostką indukcji magnetycznej jest tesla, T. Jednostkę tę możemy wyrazić przez inne jednostki układu SI: 1 T = 1 Vs/m^2.

Przykłady pól magnetycznych:
- pole magnetyczne Ziemi: $5*10^{-5}$ T,
- elektromagnes szkolny ok. 1 T,
- elektromagnes 20 MW: 40 T,
- magnesy implozyjne: 500 T,
- gwiazda neutronowa: 10^8 T,
- pole od przewodu z prądem:
  I = 1 A, *r* = 1 cm, *dl* = 0.1 m, **B = 10^{-4} T**

Linie sił pola magnetycznego

Aby zobrazować kierunek działania pola magnetycznego stosujemy krzywe zwane liniami sił pola magnetycznego. W przeciwieństwie do pola elektrycznego, gdzie linie wychodziły z ładunków dodatnich i kończyły się na ładunkach ujemnych linie sił pola magnetycznego, są zamkniętymi pętlami. Nie istnieją swobodne ładunki (monopole) magnetyczne. Znamy tylko dipole magnetyczne.

Na zewnątrz magnesu, linie biegną od bieguna N do S. Wewnątrz od S do N.



Rys. 8.3 Linie sił pola magnetycznego wytwarzanego przez różne źródła.

Linie sił pola magnetycznego można uwidocznić przy pomocy opiłków.

Linie sił pola magnetycznego (!)

Przyrządy i materiały

- magnes, bateria 4,5 V, przewód miedziany,
- opiłki żelazne,
- w wersji dwuwymiarowej cienka płytka,
- w wersji trójwymiarowej, naczynie szklane i gliceryna.

Przebieg doświadczenia

Opiłki sypiemy na płytkę umieszczona w polu magnetycznym i potrząsamy przez chwilę, tak aby mogły się swobodnie przemieszczać. Żelazne opiłki umieszczone w polu magnetycznym ulegają namagnesowaniu. Jeden koniec każdego z nich staje się biegunem N, a drugi S. Opiłki przyciągają się i łączą przeciwnymi biegunami tworząc długie łańcuchy. Łańcuchy te układają się wzdłuż linii pola magnetycznego. W wersji trójwymiarowej, opiłki tworzą łańcuchy

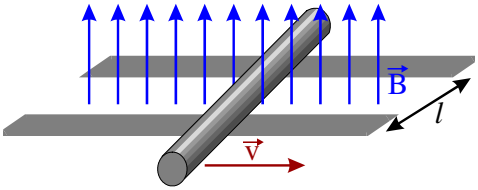
zawieszone w glicerynie.

Rys. 8.4 Opiłki zawieszone w glicerynie.

Linie sił tworzą gałęzie wychodzące z biegunów. Bliższe gałęzie łączą się ze sobą. Można wyobrazić sobie, że gdyby opiłków było dostatecznie dużo, to wszystkie linie połączyły by się tworząc krzywe zamknięte. Stanowi to istotna różnicę w porównaniu do pola elektrycznego, gdzie linie sił wychodziły z ładunków biegły do innych ładunków. Pole magnetyczne nie ma ładunków i stąd krzywe muszą się zamykać.

8.3 Magnetyzm a elektryczność

Na wykładzie wykonaliśmy prosty eksperyment polegający na toczeniu walca po szynach. Walec znajdował się w polu magnetycznym wytworzonym przez magnesy umieszczone pod i nad szynami. Do szyn podłączyliśmy galwanometr. Galwanometr pokazał, ze poruszający się walec wytwarzał prąd elektryczny. Prąd elektryczny zależał niewątpliwie od pola magnetycznego, ale też od prędkości walca. nieruchomy układ nie dawał napięcia. Wnioskujemy zatem, że to zmiana położenia w polu magnetycznym jest przyczyną powstania napięcia. Jeżeli uwzględnimy, że napięcie zależy także od szerokości obwodu l, to otrzymamy wniosek, że przyczyną efektu są zmiany powierzchni obwodu ($dS/dt = l \cdot v$). Iloczyn powierzchni S i pola B daje wielkość fizyczną zwaną strumieniem pola magnetycznego.



Rys. 8.5 Poruszający się walec wytwarza napięcie.

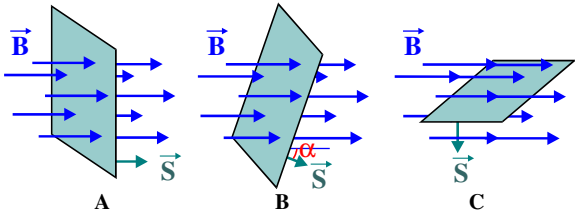
Ruch w polu magnetycznym powoduje indukcję, czyli powstanie napięcia i prądu elektrycznego. Efekt ten w 1831 roku opisał w sposób ścisły Michael Faraday (1791 - 1867) - wybitny naukowiec angielski.
Oprócz indukcji Michael Faraday odkrył także: paramagnetyzm, optyczne zjawisko Faradaya, prawa elektrolizy i benzen. Zbudował też silnik i prądnicę elektryczną.

Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya (!)

Siła elektromotoryczna indukcji jest równa zmianie strumienia magnetycznego w jednostce czasu (ze znakiem minus).

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \qquad (8.4)$$

Strumień pola magnetycznego, Φ_B, jest proporcjonalny do liczby linii pola magnetycznego przenikających przez daną powierzchnię.



Rys. 8.6 Strumień pola magnetycznego dla różnych położeń ramki.

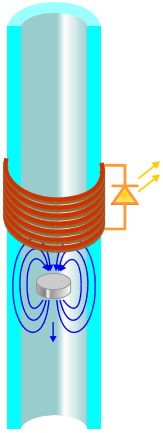
Strumień pola magnetycznego liczymy jako iloczyn indukcji pola, B, i pola powierzchni prostopadłej do tego pola: $\Phi_B = B \cdot S_\perp$. Jeżeli powierzchni przypiszemy kierunek prostopadły do tej powierzchni, to równanie na strumień pola możemy zapisać w postaci wektorowej:

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} \qquad (8.5)$$

Jednostką strumienia pola magnetycznego jest $T{*}m^2$ [= $V{*}s$].
Jak widać na rysunku 8.6, gdy powierzchnia jest prostopadła do pola, wtedy strumień wynosi B·S, a gdy jest równoległa - strumień spada do zera. Oznacza to, że obracając płaski obwód elektryczny w polu magnetycznym zmieniamy strumień pola, a więc możemy

wyindukować w nim prąd.
Z drugiej strony, jeżeli wprawimy w ruch pole magnetyczne, na przykład, spuszczając magnes, to powinniśmy móc otrzymać prąd. Tak się stanie jeżeli magnes spadając przeleci przez jakiś obwód elektryczny, jak na przykład w przedstawionym obok doświadczeniu.

Na wykładzie pokazany był eksperyment z magnesem spadającym w rurze, na którą nawinięte było uzwojenie. Gdy magnes mijał uzwojenie, w obwodzie indukowało się napięcie zasilające diody świecące.



Rys. 8.7 Magnes spadający w rurze wytwarza napięcie zasilające diody.

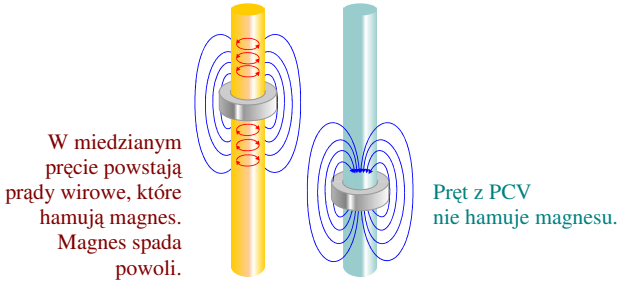
Spadanie magnesów na prętach

Przyrządy i materiały

- Silne magnesy (najlepiej neodymowe) w kształcie pierścieni (lub dysków dopasowanych do rur).
- Stoper
- Dwa pręty (lub dwie rury): jeden przewodzący (z miedzi lub aluminium), drugi wykonana z izolatora (szkło, pleksi, PCV). Pręty powinny mieć średnice niewiele mniejsze od wewnętrznej średnicy magnesu.

Przebieg doświadczenia

Pręty (rury) ustawiamy pionowo. Magnesy pierścieniowe zakładamy na pręty, a w wersji z rurami wkładamy do rur. Puszczamy i mierzymy czas spadania stoperem.
Okazuje się, że w rurze izolującej magnes spada prawie swobodnie. Natomiast czas spadku na pręcie przewodzącym jest nawet kilkakrotnie dłuższy.



Rys. 8.8 Spadanie magnesów na prętach

Dzieje się tak, ponieważ na przewodzącym (miedzianym) pręcie magnes hamowany jest przez prądy wirowe (rys. 8.8). Ruch magnesu powoduje zmiany strumienia pola magnetycznego i w konsekwencji indukcję prądu w przewodzącym pręcie. Prąd ten wytwarza pole magnetyczne, które działa hamująco na magnes.

Reguła Lenza

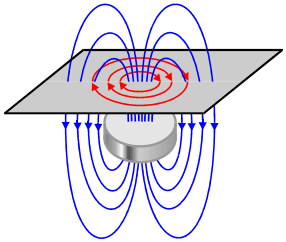
O tym, że pole musi mieć taki kierunek, aby hamowało ruch magnesu decyduje reguła przekory. Reguła ta może być sformułowana w postaci reguły Lenza:

Reguła Lenza

Prąd indukcyjny ma taki kierunek, żeby przeciwstawić się zachodzącej zmianie pola magnetycznego.

Prądy wirowe (!)

Ruchu pola magnetycznego względem przewodnika powoduje powstanie prądów wirowych w przewodniku.



Rys. 8.9 Ruch magnesu wytwarza prądy wirowe

Prądy te powodują powstanie sił pomiędzy przewodnikiem, a magnesem. Na wykładzie pokazaliśmy, ze siły te potrafią, na przykład, wyhamować wahadło, alby rozpędzić miedzianą tarczę.

Unifikacja oddziaływań elementarnych

Z powyższych eksperymentów i rozważań wynika, że oddziaływanie elektryczne i magnetyczne wiążą się ze sobą w jedno oddziaływanie elektromagnetyczne. takie rozumowanie nazywa się unifikacja oddziaływań.

Oprócz oddziaływań elektrycznego i magnetycznego znamy jeszcze oddziaływania jądrowe: "silne" i "słabe".

Oddziaływanie silne zachodzi pomiędzy hadronami - cząstkami

składającymi się z kwarków i obdarzonymi ładunkiem kolorowym. Do hadronów zaliczamy m. in. protony, neutrony i piony. Oddziaływanie silne przenoszone jest przez gluony.

Oddziaływanie słabe zachodzi pomiędzy wszystkimi cząstkami, ale szczególnie ważne są dla cząstek, które nie mają ani ładunków elektrycznych, ani nie mogą oddziaływać silnie. Oddziaływanie to przenoszone jest przez bozony pośredniczące: W^+, W^-, Z^0.

Wiemy, że prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne, a zmiany pola magnetycznego generują prąd. Oznacza to, że te dwa zjawiska możemy sprowadzić do jednego wspólnego: elektromagnetyzmu. Takie podejście nazywamy unifikacją.

1. Unifikacja oddziaływań elektrycznego i magnetycznego została dokonana dzięki omówionym powyżej prawom. Pole elektryczne wytwarza pole magnetyczne i na odwrót. Oddziaływania te przenoszone są przez fotony γ. Oddziaływania te maja nieskończony zasięg ponieważ fotony mają zerowa masę.
2. Unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i słabych opiera się na obserwacji, że oddziaływania te mają podobna siłę ale przenoszone są przez cztery różne, spokrewnione cząstki (bozony): γ, W^+, W^-, Z^0. Bozony γ, przenoszą tylko oddziaływania elektromagnetyczne, mają zerowa masę, a więc nieskończony zasięg, natomiast bozony pośredniczące W^+, W^-, Z^0 obdarzone są masą, co powoduje, że zasięg oddziaływań słabych ograniczony jest do 10^{-15} m.
3. Unifikacja oddziaływań elektro-słabych i silnych (wielka unifikacja) zakłada, że kwarki i leptony obdarzone są trzema barwami silnymi i dwoma elektro-słabymi. Odpowiednie dodawanie barw pozwala obliczyć, czy cząstka może oddziaływać elektrycznie, słabo bądź silnie. Przenoszone są przez 8 gluonów i 4 bozony elektro-słabe.

8.4 Właściwości magnetyczne substancji

Właściwości magnetyczne substancji (!)

Indukcja magnetyczna B może być zmieniana przez **przenikalność magnetyczną** μ materiału.

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \qquad (8.6)$$

W zależności od wartości μ materiały mają różne właściwości magnetyczne.

Diamagnetyki:

Diamagnetyki mają przenikalność magnetyczną $0 < \mu < 1$.
Substancje te są wypychane z pola magnetycznego.
Przykłady: grafit, bizmut, złoto, woda, nadprzewodniki.

Paramagnetyki:

Paramagnetyki mają przenikalność magnetyczną $1 < \mu < 1{,}1$.
Substancje te są wciągane do pola magnetycznego.
Przykłady: chrom, glin, tytan, platyna, tlen, NO.

Ferromagnetyki:

Ferromagnetyki mają przenikalność magnetyczną $\mu >> 1$.
Substancje te posiadają wbudowane pole magnetyczne.
Przykłady: kobalt, ferryty ($BaFe_{12}O_{19}$), ceramika neodymowa.

Nadprzewodniki

Nadprzewodnik ma praktycznie zerowy opór. Dzięki temu prąd wzbudzony przez pole magnetyczne nie zanika. Prądy wirowe w nadprzewodniku płyną bez strat i powodują, że nadprzewodnik jest praktycznie unieruchamiany przez pole magnetyczne.

Rys. 8.10 Nadprzewodnik unoszący się ponad magnesami

Wyjaśnia to dlaczego nadprzewodnik umieszczony nad magnesami lewituje.

Można też jednak zaobserwować, że ciepły nadprzewodnik położony na magnesie i polany ciekłym azotem, unosi się w trakcie schładzania.

Prądy wirowe powinny uniemożliwiać nadprzewodnikowi nie tylko wchodzenie do pola, ale także wychodzenie z niego.

Dlaczego zatem ucieka on z pola?

Decydująca rolę odgrywa tu efekt wypychania diamagnetyka z pola magnetycznego (zwany efektem Meissnera). Nadprzewodnik jest bowiem doskonałym diamagnetykiem o przenikalności μ praktycznie równej zero.

Rys. 8.11 W nadprzewodniku elektrony mogą wiązać się w pary, dzieje się tak dzięki fononom.

Czy dwie właściwości nadprzewodnika: przewodzenie bez strat i wypychanie diamagnetyczne wiążą się ze sobą?

Faza nadprzewodząca pojawia się dzięki powstawaniu par Coopera. Pary te składają się z 2 elektronów związanych poprzez oddziaływanie z fononem (rys. 8.11). Fonony to kwanty (cząsteczki) dźwięku. Pary Coopera są bozonami (tak jak fotony i fonony). Mogą kondensować i poruszać się bez rozpraszania, co w efekcie daje spadek oporu. Z kolei diamagneyzm też zawdzięczamy parom Coopera, gdyż pole magnetyczne zwiększałoby energię par i dlatego jest wypychane z nadprzewodnika.

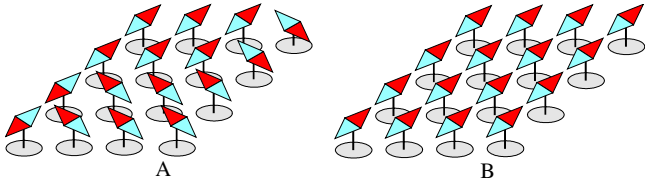
Nadprzewodniki klasyczne są powyżej temperatury przejścia przewodnikami. Zaliczamy do nich niektóre czyste metale Hg, Pb itd oraz ich stopy np. Nb_3Sn $T_c = 20$ K. Dają się dobrze opisać teorią par Coopera (BCS). Nadprzewodniki wysokotemperaturowe to często materiały tlenkowe np. YBaCuO o słabym przewodnictwie powyżej temperatury przejścia, ale osiągające temperatury $T_c > 150$ K.

Nadprzewodniki wykorzystuje się do budowy silnych elektromagnesów (do 10 T) oraz konstrukcji pociągów na poduszce magnetycznej.

Budowa ferromagnetyków

Źródłem momentów magnetycznych są spiny elektronów oraz orbitalne momenty magnetyczne. W szczególności duży wkład dają elektrony na powłokach d (np. w żelazie i manganie) i f (np. w neodymie).

Wewnątrz ferromagnetyków występują domeny magnetyczne złożone z uporządkowanych atomowych momentów magnetycznych. Gdy oddziaływanie pomiędzy domenami magnetycznymi w materiale jest zbyt słabe lub gdy temperatura jest zbyt wysoka, domen nie daje się uporządkować (rys. 8.12A).



Rys. 8.12 Model ferromagnetyka z igiełek magnetycznych.
A) Słabo oddziałujące igiełki nie porządkują się.
B) Silnie oddziałujące igiełki porządkują się wzmacniając pole.

Mamy wtedy do czynienia z paramagnetykiem. W nienamagnesowanym ferromagnetyku domeny również są nieuporządkowane, ale pod wpływem pola porządkują się (rys. 8.12B). Uporządkowane domeny dodają swoje pole do pola zewnętrznego i tym samym wzmacniają je. Efekt ten odpowiada dużej wartości przenikalności magnetycznej μ – rzędu kilku tysięcy.

Ferromagnetyk staje się paramagnetykiem, gdy zostanie rozgrzany powyżej **temperatury Curie**. Nazwa "temperatura Curie" pochodzi od nazwiska Piotra Curie, który badał zjawiska magnetyczne.

Przykładowe temperatury Curie:

żelazo	Fe	768°C
nikiel	Ni	360°C
arsenek manganu	MnAs	35°C

Rozgrzewanie gwoździa przyczepionego do magnesu (!)

Przyrządy i materiały

- gwóźdź stalowy,
- magnes i stojaki,
- palnik.

Przebieg doświadczenia

Stalowy (ferromagnetyczny) gwóźdź zawieszamy na cienkim drucie, na stojaku. Obok umieszczamy magnes, tak aby przyciągał gwóźdź, ale nie dotykał do niego.

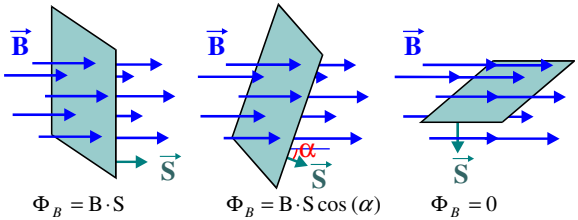
Następnie grzejemy gwóźdź palnikiem. Mocno rozgrzany metal zaczyna świecić. Po przekroczeniu temperatury Curie ferromagnetyk traci swoje właściwości i staje się paramagnetykiem. Gdy gwóźdź osiągnie temperaturę Curie, odpada od magnesu.

Na wykładzie rozgrzewaliśmy także rurkę zrobioną z niklu. Rurka ta znacznie szybciej niż gwóźdź odpadała od magnesu, ponieważ nikiel ma temperaturę Curie tylko 360°C , a więc znacznie niższą niż żelazo.

8.5 Prądnice

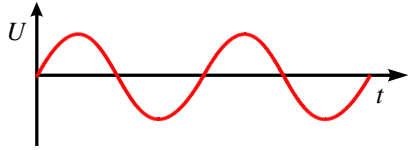
Magnetyczne źródła prądu elektrycznego (!)

Prawo indukcji Faradaya podpowiada nam, w jaki sposób możemy wytwarzać prąd elektryczny. Należy w tym celu umieścić ramkę z nawiniętym na nią drutem w polu magnetycznym i obracać ją.



Rys. 8.13 Strumień pola magnetycznego dla różnych położeń ramki.

Na skutek obracania, strumień pola magnetycznego przepływający przez uzwojenie będzie się zmieniał jak cosinus kąta, $\alpha = \omega t$. Zmiany strumienia będą indukowały w obwodzie prąd elektryczny.



Rys. 8.14 Prąd przemienny $U = U_0 \sin(\omega t)$.

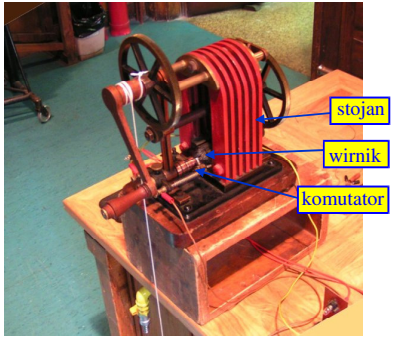
Zmiany funkcji cos(ωt) są proporcjonalne do prędkości kątowej ω oraz do funkcji sin(ωt).

Wykorzystując równanie (8.4) otrzymujemy zależność napięcia (siły elektromotorycznej) od czasu:

$$U = BS\omega\sin(\omega t) \qquad (8.7)$$

Wykres napięcia przedstawiony jest na rysunku 8.14. Taka zależność opisuje między innymi napięcie prądu przemiennego używanego w naszych domach. Napięcie to ma częstość f = 50 Hz, czyli częstość kątową $\omega = 314\ s^{-1}$.

Urządzenie do wytwarzania prądu elektrycznego, prądnica, składa się z wirującej ramki zwanej wirnikiem i ze stojana, w którym umieszczony jest magnes stały lub elektromagnes. Jeżeli chcemy otrzymać prąd o określonym kierunku przepływu, musimy zastosować komutator. Komutator znajduje się na osi wirnika i przełącza połączenia pomiędzy wirnikiem a zewnętrznym obwodem w zależności od położenia wirnika, prostując generowany prąd.



Rys. 8.15 Prądnica z widocznym podstawowymi elementami.

Przesuwając uzwojenie względem magnesu pokonujemy opór pola magnetycznego. Występowanie takiego oporu pokazaliśmy choćby w doświadczeniu z prądami wirowymi. Działając przeciw tej sile wykonujemy pracę, a jednocześnie wytwarzamy prąd elektryczny. Tym samym zamieniamy energię mechaniczną na elektryczną.

Energia elektryczna

Wiemy już, że natężenie prądu, I, to ładunek przepływający w jednostce czasu.

Jednostką natężenia jest amper: A = C/s.

Wiemy także, że napięcie elektryczne, U, to energia przypadająca na jednostkę ładunku. (Jednostka V = J/C)

Iloczyn napięcia i natężenia daje zatem energię na jednostkę czasu, a więc **moc prądu**, P:

$$P = I \cdot U, \qquad (8.7)$$

Jednostką mocy jest wat [W]:

$$1\ W = 1\ V \cdot A = 1\ J/C \cdot C/s = 1\ J/s.$$

Energię przenoszona przez prąd można obliczyć jako iloczyn mocy i czasu: $E = P \cdot t$.

Praktyczną jednostką energii elektrycznej jest kilowatogodzina:

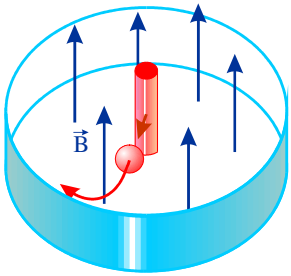
1 kWh = 1000 W · 3600 s = 3,6 MJ.

8.6 Silniki elektryczne

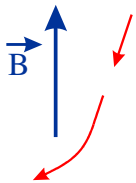
Siła Lorentza (!)

Na ładunek poruszający się w polu magnetycznym działa siła zwana siłą Lorentza. Siła ta może powodować odchylenie toru pojedynczego ładunku, a w przypadku strumienia jonów w cieczy może wprawić w ruch obrotowy całą ciecz.

Doświadczenie z wprawianiem w ruch wirowy cieczy, przez którą płynie prąd (rys. 8.16) przedstawiane było na wykładzie.



Rys. 8.16 Wirowanie elektrolitu



Rys. 8.17 Ładunek w polu magnetycznym

Wartość siła Lorentza jest proporcjonalna do prędkości ładunku, v, i indukcji pola magnetycznego, B, a jej kierunek jest prostopadły do kierunku prędkości i kierunku pola magnetycznego (rys. 8.17).

Zapisujemy to przy pomocy następującego równania:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \qquad (8.8)$$

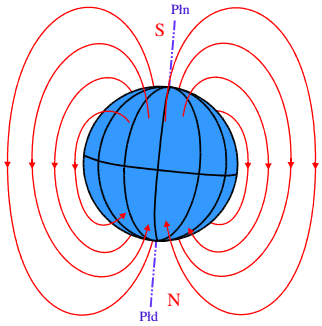
Równanie to zawiera iloczyn wektorowy analogicznie jak, na przykład,

równanie na moment siły (1.5). A zatem kierunek wektora siły Lorentza jest ustalany przy pomocy reguły śruby prawoskrętnej.

Cząstki w polu magnetycznym Ziemi

Im szybciej porusza się cząstka, tym większa siła na nią działa.

Pole magnetyczne Ziemi wynoszące 30 - 60 μT wystarczy, aby powstrzymać cząstki wiatru słonecznego rozpędzone do prędkości bliskich prędkości światła. Tory cząstek lecących w odległości tysięcy kilometrów od Ziemi są odchylane, a te które bardziej się zbliżą do Ziemi, zaczynają wirować i spływać w kierunku biegunów. Zjonizowane cząstki wpadające w pobliżu biegunów w atmosferę Ziemi świecą wytwarzając zorzę polarną.



Rys. 8.18 Pole magnetyczne Ziemi

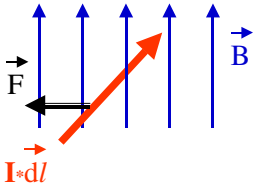
Warto wiedzieć, że pole magnetyczne w okolicach Warszawy wynosi około 50 μT.

Południowy biegun magnetyczny znajduje się w okolicach północnego bieguna geograficznego. Bieguny geomagnetyczne są odchylone o 20° -

30° od biegunów magnetycznych i krążą przesuwając się o 15 km/rok (w ciągu ostatnich lat przyspieszyły).

Siła elektrodynamiczna:

Przepuszczając prąd przez walec spoczywający na szynach w polu magnetycznym, obserwujemy, ze zaczyna się on poruszać. Kierunek ruchu zależy od kierunku prądu i kierunku pola magnetycznego.



Rys. 8.19 Przewodnik z prądem w polu magnetycznym

Na przewodnik z prądem, I, znajdujący się w polu magnetycznym, B, działa siła elektrodynamiczna dana wzorem:

$$\vec{F} = \mathrm{I} \cdot \mathrm{d}\vec{l} \times \vec{\mathrm{B}}\,, \qquad (8.9)$$

Gdzie d*l* to długość odcinek przewodnika. Wielkość tę traktujemy jak wektor o kierunku odpowiadającym kierunkowi przepływu prądu.
Dzięki sile elektrodynamicznej możemy wytworzyć siłę działającą na makroskopowe obiekty zasilane prądem, możemy zatem zamienić energię elektryczną na pracę.

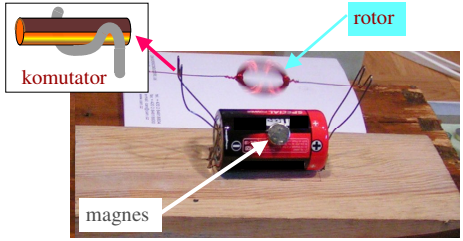
Urządzenie zamieniające energię elektryczną na pracę nazywamy **silnikiem elektrycznym**.

Prosty silnik elektryczny (!)

Przyrządy i materiały
- bateria,
- magnes,
- drut miedziany w izolacji (tzw. transformatorowy)

Przebieg doświadczenia

Do dwóch elektrod baterii należy przymocować (najlepiej przylutować) dwa kawałki odizolowanego drutu, które będą wspornikami rotora. Do baterii mocujemy też magnes (do przymocowania wystarczy jego własna siła magnetyczna).



Rys. 8.20 Przewodnik z prądem w polu magnetycznym

Rotor wykonujemy zwijając z drutu kilkadziesiąt pętli, a następnie wystające końce częściowo odizolowujemy. Izolacja powinna być zdjęta tylko z połowy obwodu drutu. Oba końce powinny mieć odizolowaną tę samą połowę. Rotor zawieszamy na wspornikach tak, jak na zdjęciu 8.20.
Przepływ prądu w rotorze wytwarza siłę elektrodynamiczną wprawiając rotor w ruch.

Gdy rotor obróci się o 180°, siła elektrodynamiczna powinna zacząć go hamować, ale w tym momencie komutator obraca się na zaizolowaną stronę drutu, przerywając przepływ prądu i siła elektrodynamiczna znika.
Rotor obraca się dalej na skutek bezwładności. Po obrocie o kolejne 180°, komutator włącza prąd i rotor jest obracany dalej do przodu.

Poprzednio pokazane zostało, jak przy pomocy prądnicy pracę można zamienić na energię elektryczną. Następnie zobaczyliśmy, że energię elektryczną można, przy pomocy silnika, zamienić na pracę. Obie te przemiany można wykonać teoretycznie ze 100% sprawnością. Oznacza to, że suma energii mechanicznej i elektrycznej w danym układzie jest stała (czyli zachowana).

8.7 Podsumowanie

Źródłem pola magnetycznego może być przepływ prądu (pole opisuje prawo Biota-Savarta, wykorzystujemy w elektromagnesach) lub moment magnetyczny atomu (np. w magnesach stałych).

Prawo indukcji Faradaya:
Siła elektromotoryczna indukcji jest równa zmianie strumienia magnetycznego w jednostce czasu.

Zmiany pola magnetycznego indukują pole lub prąd, o kierunku danym **regułą Lenza**:
Prąd indukcyjny ma taki kierunek, żeby przeciwstawić się zachodzącej zmianie pola magnetycznego.

Związek między **indukcją pola magnetycznego** B, a **natężeniem pola magnetycznego** H zadany jest przez **przenikalność magnetyczną** próżni μ_0 i materiału μ: $B = \mu_0\mu H$.
Ze względu na właściwości magnetyczne wprowadzony jest następujący podział substancji:
- diamagnetyki, $\mu < 1$,
- paramagnetyki, $\mu > 1$,
- ferromagnetyki, $\mu >> 1$,.

Na ładunek poruszający się w polu magnetycznym działa **siła Lorentza**. Wartość tej siły jest proporcjonalna do prędkości ładunku i indukcji pola magnetycznego, a jej kierunek jest prostopadły do kierunku prędkości i kierunku pola magnetycznego.
Na przewodnik z prądem znajdujący się w polu magnetycznym działa **siła elektrodynamiczna**. Wartość tej siły jest proporcjonalna do natężenia prądu i indukcji pola magnetycznego.