

Badanie oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem

Cele ćwiczenia

- Zapoznanie się ze zjawiskiem oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem
- Wyznaczenie zależności siły elektrodynamicznej od natężenia prądu płynącego w ramce z drutu oraz od ilości uzwojeń ramki
- Wyznaczenie średniej wartości indukcji pola magnetycznego pomiędzy biegunami magnesu

Wprowadzenie

Oddziaływanie pola magnetycznego na przewodnik z prądem jest zjawiskiem powszechnie wykorzystywanym w technice. Przykładem takiego zastosowania są silniki elektryczne napędzające m.in. tramwaje, pralki, suszarki do włosów, wycieraczki samochodowe, zabawki. Zdolność do wykonania pracy przez silnik elektryczny wynika z pojawienia się siły (tzw. siły elektrodynamicznej) działającej na przewodnik z prądem znajdujący się w polu magnetycznym. Zanim jednak zaczniemy omawianie siły elektrodynamicznej, zajmijmy się siłą działającą na naładowaną cząsteczkę poruszającą się w polu magnetycznym.

Siła Lorentza

W licznych doświadczeniach z cząsteczkami obdarzonymi ładunkiem elektrycznym poruszającymi się w polu magnetycznym zaobserwowano występowanie siły powodującej zakrzywienie ich toru. Holenderski fizyk Hendrik Lorentz jako pierwszy zapisał następującą formułę opisującą tę siłę (tzw. siłę Lorentza)

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (1)$$

gdzie: q - ładunek cząsteczki, \vec{v} - wektor prędkości cząsteczki, \vec{B} - wektor indukcji pola magnetycznego. Zapisując ten sam wzór w postaci skalarnej, otrzymamy wartość siły działającej na cząsteczkę

$$F_L = qvB \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

gdzie α oznacza kąt pomiędzy wektorami \vec{v} i \vec{B} .

Analizując wzory (1) i (2), łatwo zauważyć, że siła F_L jest równa zero, gdy naładowana cząsteczka nie porusza się lub porusza się wzdłuż kierunku linii pola magnetycznego, natomiast jest maksymalna, gdy cząsteczka porusza się prostopadle do kierunku linii pola magnetycznego. Kierunek siły Lorentza jest zawsze prostopadły do płaszczyzny utworzonej przez wektory \vec{v} i \vec{B} , a zwrot zależy od znaku ładunku (rys. 1a).

Siła elektrodynamiczna

Konsekwencją występowania siły Lorentza jest siła działająca w polu magnetycznym na przewodnik z prądem. Na rys. 1b przedstawiono fragment przewodnika, w którym przepływ prądu jest spowodowany ruchem elektronów swobodnych. W odcinku o długości l w danej chwili przepływa n elektronów o ładunku e i średniej prędkości unoszenia v_u . Na każdy elektron działa siła Lorentza (rys. 1 a, b) o wartości

$$F_L = e v_u B \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

Sumaryczna siła działająca na ładunki w odcinku przewodnika o długości l wynosi więc

$$F_{ED} = n e v_u B \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Suma ładunków swobodnych znajdujących się w odcinku przewodnika wynosi $q = ne$, a czas przepływu elektronu przez odcinek o długości l wynosi $t = l/v_u$, zatem korzystając z zależności na natężenie prądu $I = q/t$, otrzymamy równanie

$$I = \frac{n e v_u}{l}. \quad (5)$$

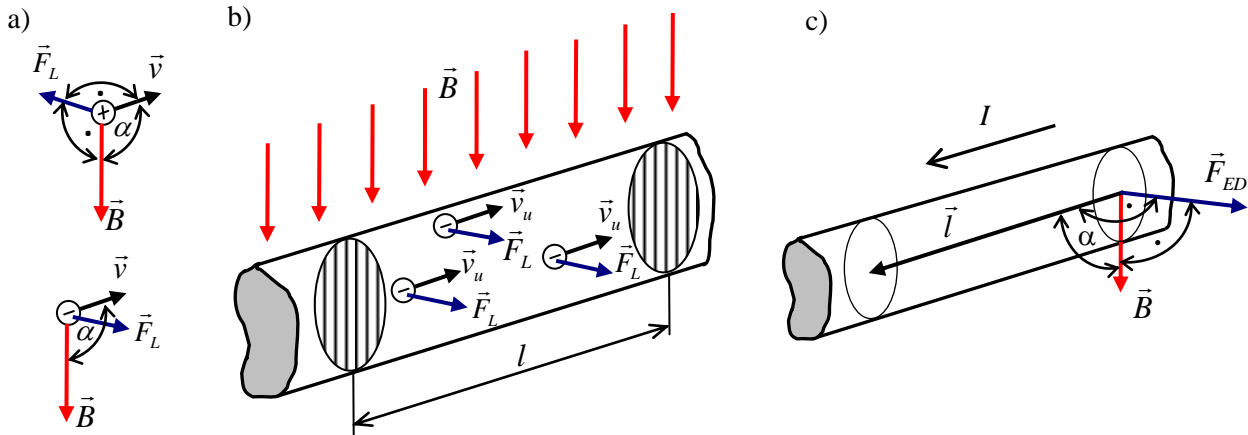
Na podstawie wzorów (4) i (5) można zapisać zależność

$$F_{ED} = IlB \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

lub w postaci wektorowej

$$\vec{F}_{ED} = I(\vec{l} \times \vec{B}). \quad (7)$$

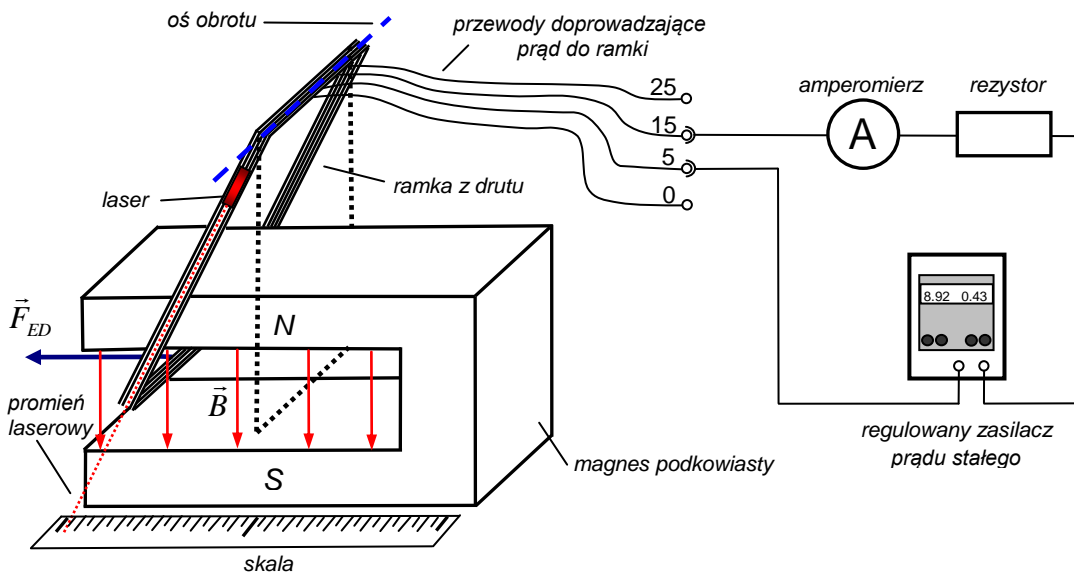
Wzór (6) opisuje wartość siły elektrodynamicznej. Wektor \vec{l} ma kierunek i zwrot zgodny z kierunkiem przepływu prądu w przewodniku (przepływ ten jest przeciwny do kierunku ruchu elektronów). Kąt α we wzorze (6) jest to kąt pomiędzy wektorem odcinka przewodnika \vec{l} a wektorem indukcji pola magnetycznego \vec{B} (rys. 1c).



Rys. 1. a) wzajemna orientacja wektorów: \vec{v} - prędkości cząsteczki naładowanej, \vec{B} - indukcji magnetycznej i \vec{F}_L - siły Lorentza, b) kierunek siły działającej na poszczególne elektrony w wycinku przewodnika z prądem umieszczonego w polu magnetycznym, c) kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej \vec{F}_{ED} działającej na odcinek przewodnika z prądem o natężeniu I (strzałka pod I oznacza kierunek i zwrot przepływu prądu)

Opis stanowiska pomiarowego

Na stanowisku pomiarowym (rys. 2) znajduje się magnes podkowiasty wytwarzający bardzo silne pole magnetyczne (Uwaga! Nie zbliżaj metalowych przedmiotów i elektroniki!). Nad nim na obrotowej osi została zawieszona prostokątna ramka z drutu tak, aby jej dolny bok znajdował się pomiędzy biegunami magnesu.



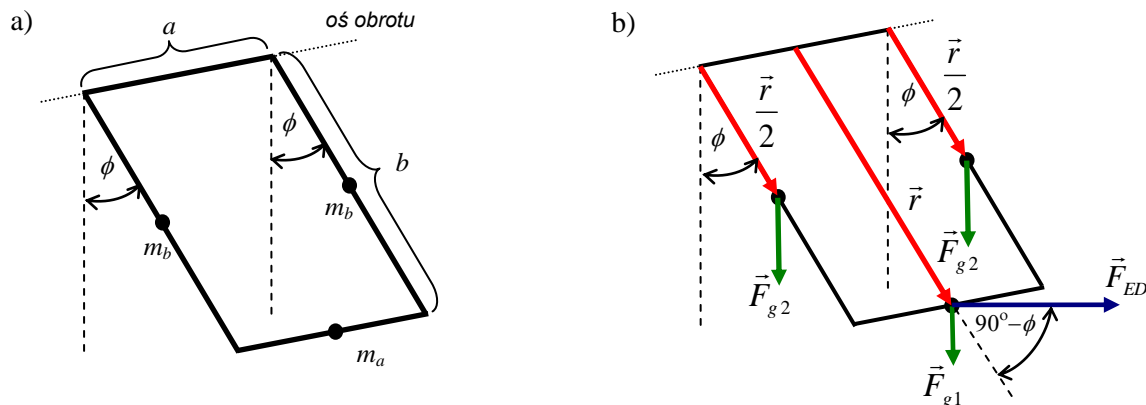
Rys. 2. Schemat ćwiczenia. W powyższym przykładzie prąd płynie przez 10 uzwojeń ramki ($15 - 5 = 10$)

Ramka, która powstała z nawinięcia 25 uzwojeń drutu miedzianego, posiada odczepy po 5, 15 i 25 uzwojeniach. Umożliwia to podłączenie źródła prądu do 5, 10, 15, 20 lub 25 uzwojeń ramki w zależności od sposobu podłączenia przewodów. Źródłem prądu w obwodzie jest regulowany zasilacz prądu stałego. W obwodzie elektrycznym włączone są również: amperomierz umożliwiający precyzyjny pomiar natężenia prądu

oraz rezystor chroniący ramkę przed przegrzaniem. Do ramki zamocowano miniaturowy laser, którego promień służy jako wskaźnik umożliwiający odczyt na skali znajdującej się pod ramką.

Metoda wyznaczania siły elektrodynamicznej

Chcąc wyznaczyć siłę elektrodynamiczną działającą na dolny bok ramki, musimy rozważyć momenty sił występujące po wychyleniu ramki z położenia równowagi. Momenty te będą związane z siłami: grawitacji oraz elektrodynamiczną. Na rysunku 3a przedstawiono schematycznie prostokątną ramkę o bokach a i b wychyloną z położenia równowagi o kąt ϕ . Na trzech bokach zaznaczono ich środki mas m_a i m_b . Rysunek 3b przedstawia siły ciężkości działające na środki mas poszczególnych boków oraz siłę elektrodynamiczną. Poza tym zaznaczono wektory ramion r związane z poszczególnymi siłami.



Rys. 3 Ramka z drutu a) schemat ramki z zaznaczonymi środkami mas poszczególnych boków, b) wektory ramienia siły oraz sił.

Aby ramka pozostawała w równowadze, momenty sił działające na nią powinny się równoważyć

$$\vec{r} \times \vec{F}_{g1} + \frac{\vec{r}}{2} \times \vec{F}_{g2} + \frac{\vec{r}}{2} \times \vec{F}_{g2} + \vec{r} \times \vec{F}_{ED} = 0. \quad (8)$$

Wartości sił grawitacji możemy wyliczyć mnożąc masę poszczególnych boków ramki $m_{a,b}$ przez przyspieszenie ziemskie g ($F_g = mg$), natomiast wartość wektora ramienia r jest równa długości boku b . Korzystając z powyższych równań oraz zależności trygonometrycznych możemy zapisać skalarnie

$$(b \sin \phi) m_a g + 2 \left(\frac{b}{2} \sin \phi \right) m_b g - (b \sin(90^\circ - \phi)) F_{ED} = 0. \quad (9)$$

Po przekształceniach uzyskamy następujący wzór na siłę elektrodynamiczną

$$F_{ED} = (m_a + m_b) g \cdot \operatorname{tg} \phi. \quad (10)$$

Ponieważ masa całej ramki m jest równa sumie mas jej poszczególnych boków $m = 2m_a + 2m_b$, możemy ostatecznie napisać

$$F_{ED} = \frac{1}{2} m g \cdot \operatorname{tg} \phi. \quad (11)$$

Znajomość masy ramki, przyspieszenia ziemskiego oraz tangensa kąta odchylenia ramki umożliwia więc wyznaczenie siły elektrodynamicznej. W opisywanym ćwiczeniu do wyznaczenia $\operatorname{tg} \phi$ posłuży nam promień światła emitowany przez laser oraz skala z podziałką milimetrową (rys. 2 i 4).

Na rys. 4 widać, że $\operatorname{tg} \phi$ będzie równy stosunkowi długości odcinka x odczytanej ze skali do odległości osi obrotu od środka skali d . Tym samym wartość siły elektrodynamicznej będzie równa

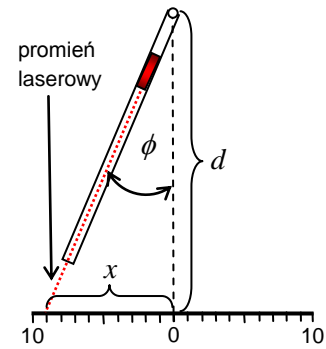
$$F_{ED} = \frac{1}{2} m g \frac{x}{d}. \quad (12)$$

Łatwo zauważyć, że wielkości m , g i d są stałe a więc wprowadzając współczynnik $c = mg/2d$, ostatecznie możemy napisać, że

$$F_{ED} = cx. \quad (13)$$

Jak widać siła elektrodynamiczna jest wprost proporcjonalna do wskazań na skali x . Wyznaczony doświadczalnie współczynnik proporcjonalności $c = (2,65 \pm 0,05) N/m$.

W powyższych rozważaniach założono, że moment siły grawitacji działający na miniaturowy laser jest zaniedbywalnie mały.



Rys. 4. Schemat pomocny do wyznaczenia $\text{tg } \phi$

Wyznaczenie wartości indukcji pola magnetycznego pomiędzy biegunami magnesu

W opisanym doświadczeniu widać, że kierunek przepływu prądu w dolnym boku ramki jest prostopadły do kierunku linii pola magnetycznego ($\alpha = 90^\circ$). Wzór (6) można więc zapisać w postaci

$$F_{ED} = IlB, \quad (14)$$

gdzie l jest całkowitą długością przewodnika z prądem oddziałującego z polem magnetycznym. Długość tę można wyznaczyć, mnożąc liczbę uzwojeń i długość dolnego boku ramki, $l = na$, gdzie $a = (13,0 \pm 0,2) \text{ cm}$.

Chcąc wyznaczyć średnią wartość indukcji pola magnetycznego oddziałującego z dolnym bokiem ramki, możemy posłużyć się więc równaniem

$$F_{ED} = BnaI. \quad (15)$$

Dokonując podstawień $y = F_{ED}$, $x = I$ oraz $a_R = Bna$ w powyższym równaniu, uzyskuje się zależność liniową typu $y = a_R x + b$. Jest to zależność liniowa, gdzie wartość a_R jest współczynnikiem kierunkowym prostej. Wykreślając zależność siły elektrodynamicznej w funkcji natężenia prądu płynącego przez ramkę: $F_{ED} = f(I)$, powinno się otrzymać linię prostą. Stosując metodę regresji liniowej do tak otrzymanego wykresu, można wyznaczyć współczynnik nachylenia prostej a_R , a następnie, korzystając ze znanych wartości n i a , wyznaczyć wartość indukcji pola magnetycznego B . Wyliczona wartość indukcji pola magnetycznego jest w rzeczywistości pewną średnią wartością, gdyż pole magnetyczne, w którym porusza się dolny bok ramki nie jest w pełni jednorodne na całej długości boku.

Przebieg ćwiczenia

A. Wyznaczenie zależności siły elektrodynamicznej od natężenia prądu płynącego przez uzwojenia ramki $F_{ED} = f(I)$

1. Połącz układ według schematu przedstawionego na rys. 2, wybierając 5 uzwojeń ramki (przewody dołączone do wejść 0 i 5). Upewnij się, czy pokrętko multimetru jest ustawione w pozycji amperomierza, a następnie włącz zasilacz oraz laser.
2. Regulując zasilacz, zwiększaj natężenie prądu przepływającego przez uzwojenia ramki tak, aby położenie plamki lasera zmieniało się co 1 cm. Każdorazowo zapisuj położenie plamki na skali (1 - 10 cm) oraz odpowiednie wartości natężenia prądu. Ustaw napięcie zasilacza na zero, zamień przewody miejscami i powtórz pomiary dla przeciwnego kierunku przepływu prądu.
3. Podłączając przewody w różnych kombinacjach, powtórz pomiary z pkt.2 dla liczby uzwojeń 10, 15, 20 i 25.
4. Korzystając z równania (13), oblicz wartości siły elektrodynamicznej F_{ED} odpowiadające poszczególnym wychyleniom ramki.
5. Na wspólnym wykresie wykreśl zależności siły elektrodynamicznej od natężenia prądu przepływającego przez uzwojenia ramki $F_{ED} = f(I)$.
6. Zapisz wnioski.

Uwaga! Po każdej zakończonej serii pomiarowej ustaw napięcie zasilacza na zero!

B. Wyznaczenie zależności siły elektrodynamicznej od liczby uzwojeń $F_{ED} = f(n)$

1. Korzystając z uzyskanych wykresów $F_{ED} = f(I)$, odczytaj przybliżone wartości F_{ED} dla jednej stałej wartości prądu z zakresu 0,15 - 0,25 A (np. 0,2 A).
2. Dla $I = \text{const}$. wykreśl zależność siły elektrodynamicznej od liczby uzwojeń ramki $F_{ED} = f(n)$.
3. Zapisz wnioski.

C. Wyznaczenie wartości indukcji pola magnetycznego B pomiędzy biegunami magnesu

1. Wybierz wykres $F_{ED}=f(I)$ najbardziej zbliżony do linii prostej, a następnie, posługując się metodą regresji liniowej, wyznacz jego współczynnik nachylenia prostej a_R oraz błąd.
2. Korzystając z danych oraz wzoru (15), wyznacz wartość indukcji pola magnetycznego ($B = a_R/na$).
3. Wykonaj rachunek jednostek oraz wylicz błąd pomiarowy obliczonej indukcji pola magnetycznego (metodą różniczki logarytmicznej lub zupełnej).