

Ćwiczenie 10

Badanie przyciągania przewodników z prądem

Wyznaczanie siły występującej pomiędzy przewodnikami z prądem

10.1. Wstęp

Dwa przewodniki, przez które płynie prąd, mogą się wzajemnie przyciągać lub odpychać. Zachowanie to uzasadnione jest podstawowymi zjawiskami i prawami elektromagnetyzmu, do których zaliczyć możemy m.in. **siłę Lorentza**:

$$F = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (10.1)$$

zapisywaną niekiedy w postaci:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \quad (10.2)$$

oraz **prawo Ampera**:

$$\oint Bdl = \mu_0 I \quad (10.3)$$

Z prawa Ampera można wyprowadzić wzór na pole magnetyczne generowane przez nieskończenie długi przewodnik z prądem. Wyprowadzenie to można przeprowadzić odnosząc się do poniższego rysunku:

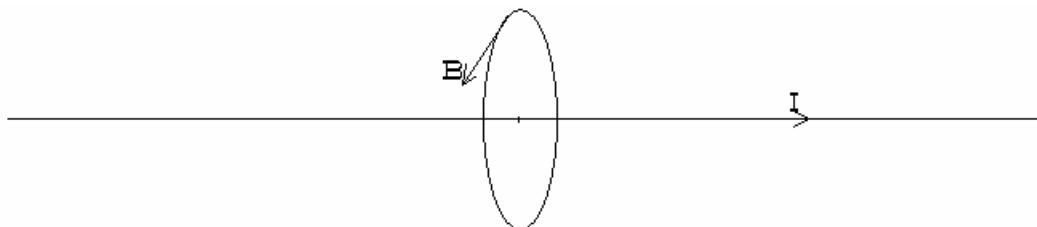


Fig. 10.1. Schemat prawa Ampera

Wykonamy całkowanie krzywoliniowe po okręgu. Ponieważ przewodnik jest nieskończonym, a okrąg symetryczny, można założyć, że pole magnetyczne na obwodzie jest stałe podczas całkowania. Wynika to z samej symetrii zjawiska: jeśli obrócilibyśmy układ wokół przewodnika, to nie wyglądałby on inaczej od oryginalnego. Z tego wynika, że B musi być takie same we wszystkich punktach na obwodzie, a nawet w ten sam sposób skierowane względem nieskończonej małej części obwodu (elementu całkowania) dl . Wiedząc to, możemy uprościć powyższą całkę:

$$B \oint dl = \mu_0 I \quad (10.4)$$

Należy zauważyć, że opuściliśmy znak iloczynu skalarnego oraz symbole wektorów. Mogliśmy to uczynić, ponieważ można przedstawić iloczyn skalarny jako iloczyn długości wektorów pomnożonych przez cosinus kąta między nimi. Ponieważ kąt w naszym przypadku wynosi 0, to w powyższej całce został nam tylko iloczyn długości wektorów.

Powstaje teraz pytanie, jaka jest całka z dl po okręgu? Jest to po prostu jego obwód równy $2\pi r$.

W ten sposób otrzymujemy:

$$2\pi r B = \mu_0 I \quad (10.5)$$

A to daje w prosty sposób wzór na B ”

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (10.6)$$

Podstawiając otrzymane wyrażenie na B do wzoru na siłę Lorentza, uzyskamy równanie na siłę odpychania bądź przyciągania się dwóch przewodników z prądem:

$$\vec{F} = \frac{\mu_0}{2\pi} I_1 I_2 l \quad (10.7)$$

Proszę zwrócić uwagę, że w równaniu występują dwa różne natężenia prądu. Jedno pochodzi z definicji siły Lorentza i jest równe natężeniu w przewodniku, na który działa siła pochodząca z pola magnetycznego, natomiast drugie jest natężeniem w drugim przewodniku, w tym, który generuje pole magnetyczne zgodnie z prawem Ampere'a.

Siła w powyższym rozumowaniu działa na pierwszy przewodnik, ale ponieważ to rozumowanie można odwrócić, taka sama siła działa także na drugi tzn. pole magnetyczne jest generowane przez pierwszy przewodnik, podczas gdy na drugi działa wynikająca z niego siła.

Jak wynika z równania 10.7 oddziaływanie pomiędzy przewodnikami zależy od wartości natężeń prądów płynących przez owe przewodniki. Natężenia takie często oblicza się na ćwiczeniach z fizyki, lecz rzadko zwraca się uwagę na to, że muszą one być naprawdę ogromne. W układzie laboratoryjnym, stosujemy natężenie maksymalne rzędu $I=80A$, które umożliwia jedynie niewielkie przyciągnięcie przewodników. Początkowo próbowaliśmy się podłączyć przewodniki do baterii 9V. Otrzymanym wynikiem było tylko lekkie zadrganie bardzo cienkich przewodów, które może być wywołane nawet przez wiatr.

Drugim parametrem, istotnym dla naszego zjawiska jest długość oddziaływujących przewodników z prądem, która wyznacza, jak duży obszar przewodników podlega działaniu siły. Im większy ten obszar, tym siła większa.

Trzecim i ostatnim parametrem jest odległość r między przewodnikami. Jak można zauważyć z równania 10.7 wartość siły jest odwrotnie proporcjonalna do niej.

Należy również pamiętać, że znak siły zależy od znaków natężeń prądu. Wobec tego dla prądów zgodnie płynących w przewodniku, siła jest dodatnia i przewodniki się przyciągają. W przeciwnym wypadku, siła jest ujemna, a przewodniki się odpychają.

10.2. Pomiary

W laboratorium dysponujemy następującym układem eksperymentalnym do badania odpychania/przyciągania przewodników z prądem:

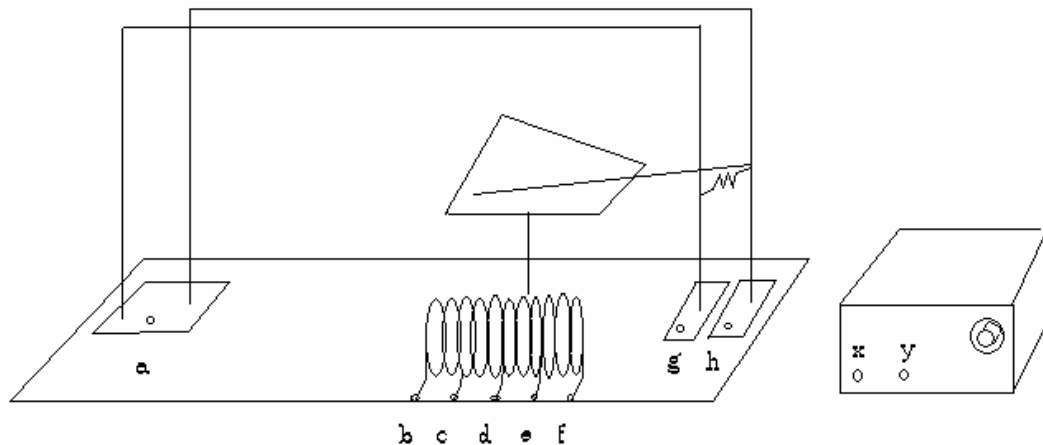


Fig. 10.2. Układ eksperymentalny

Na schemacie widać przewodniki z gniazdami a, g i h; solenoid służący za opornik z gniazdami b, c, d, e, f oraz zasilacz z gniazdami x i y.

W zestawie jest również wskaźnik i skala z podziałką. Zasilacz w połączeniu g-x, h-y daje natężenie prądu 80A. Jest to **bardzo duże natężenie**, od którego przewodniki szybko się nagrzewają. Po kilku sekundach możliwe jest **spalenie** zasilacza. Dlatego **nie wolno** włączać zasilacza na więcej niż **pięć sekund**. Zasilacz włącza się przez naciśnięcie guzika, a wyłącza po jego zwolnieniu.

W tym momencie należy dodać zwrócić uwagę na temat bezpieczeństwa przy przeprowadzeniu tego doświadczenia. Dopóki ktoś nie włoży palców pod pokrywę zasilacza, doświadczenie jest bezpieczne, ponieważ uzyskiwane napięcie nie przekracza 10V. Zasilacz ten nie potrafi generować wyższych napięć ze względów konstrukcyjnych. Napięcie takie, zdolne wygenerować w zwartej pętli przewodnika o oporze tylko kilku ohmów natężenie prądu równe 80A, nie jest w stanie, przyłożone

do ciała ludzkiego o oporności setek kiloomów, wywołać dużego prądu. Z prawa Ohma, prąd przepływający przez ciało osiąga wartość rzędu 0.1mA i jest zupełnie bezpieczny.

W zestawie występuje również solenoid. Wprowadzono go w celu umożliwienia zmieniania wartości prądu, płynącego przez przewodniki. Po włączeniu go w obwód, część napięcia generowanego przez zasilacz tracona jest solenoidzie i w ten sposób, zgodnie z prawem Ohm, napięcie wymuszające przepływ prądu w przewodnikach g-a-h staje się mniejsze.

W badanym układzie w zasadzie można mierzyć jedynie zachowanie odpychające. Jednak możemy zobaczyć również przyciąganie się przewodników. W tym celu, musimy połączyć układ tak, by natężenia prądów w obu przewodnikach były skierowane w tą samą stronę, np. łącząc x-a i g-h-y.

Zachowanie odpychające bada się w połączeniu x-(b,c,d,e,f), y-h, f-g. Oczywiście w połączeniu x-b odpychanie jest najmniejsze, a a w połączeniu x-f, lub bezpośrednio x-g odpychanie (a więc i natężenie prądu) jest największe.

W pomiarach należy notować różnicę między pozycją spoczynkową i aktywną wskaźnika. **Nigdy nie włączaj zasilania na więcej niż 5 sekund**, gdyż zasilacz może się zapalić z przegrzania. Zdarzył się już raz taki przypadek, że podczas doświadczenia włączono zasilacz na 8 sekund i skończyło się to uszkodzeniem przyrządu.

Program ćwiczenia:

1. Zaobserwuj przyciąganie się przewodników z prądem.
2. Zmierz odpychanie we wszelkich możliwych połączeniach x z (b, c, d, e, f).
3. Powtórz pomiary dziesięciokrotnie by wyeliminować błędy. (W doświadczeniu okaże się, że wskaźnik w przeciągu 5 sekund nie może się w pełni ustabilizować i odczyty obarczone są pewnym błędem, W pojedynczym pomiarze błędy popełniane są w różnych kierunkach, ale dzięki przeprowadzeniu kilku powtórzeń, uśredniają się do zera).

4. Napięcia w podanych podłączeniach wynoszą odpowiednio: fh-2,2 V, eh-1,6 V, dh-1,1 V, ch-0,8 V, bh-0,7 V, a $I_{zw}=80$ A (połączenie fh). Jeśli natężenie prądu w połączeniu x-f wynosi 80A (amplituda równa się w przybliżeniu 115A), można wyliczyć oporność pętli przewodników. Wykorzystując obliczony opór, należy następnie wyliczyć z napięć natężenia prądów w pozostałych połączeniach.
5. Zmierz wymiary przewodników (**długość, wysokość**), odległość spoczynkową między nimi, współczynnik skalowania między jednostkami na skali (ze strzałką) a prawdziwą odległością w milimetrach. Masa pojedynczego przewodnika wynosi 0.065kg..
6. Zmierz współczynnik elastyczności przewodnika w naszym układzie używając dynamometru.

Wyniki pomiarów należy zamieścić w poniższych tabelach 10.1 i 10.2

Tabela 10.1

N_o	B	c	D	E	f
1	X_{b1}				
2	.				
3	.				
.	.				
10	X_{b10}				

Tabela 10.2

	B	c	D	e	f
U					
I					

10.3 Komputerowa symulacja eksperymentu.

Włącz program 'przewodniki.jar'

Program posiada kilka przycisków, które pozwalają narysować wykres siły występującej w układzie oraz odstęp między przewodnikami. Naciśnij na oba te przyciski w celu wygenerowania wykresów.

Następnie wykonaj eksperyment:

- Sprawdź wpływ prądu zmiennego na wyniki: postaraj się zmienić częstotliwość prądu – ustaw ją mniejszą niż 50Hz (i.e. 0.1Hz, 10Hz, 0Hz).
- Sprawdź wpływ współczynnika elastyczności: ustaw go na 1,100.
- Sprawdź wpływ bezwładności przewodników: ustaw ich masę na 0,65kg i 0,0065kg. Później wróć do wartości początkowej 0,065kg.
- Sprawdź wpływ wartości natężenia prądu w przewodnikach. Ustaw amplitudę prądu na 1000A, następnie na 1A.
- Przeczytaj na tamt algorytmu Verleta **in the “about” menu option of the program**

10.4. Wyniki, obliczenia, analiza niepewności pomiaru

Opracuj wyniki doświadczenia, przeanalizuj zależność przemieszczenia wskaźnika od prądu płynącego w przewodnikach. Sprawdź czy jest ona zgodna z formułą analityczną na siłę przyciągania przy założeniu, że wychylenie wskaźnika powstrzymywane jest jedynie siłą Hooke'a $F = -kx$. Skomentuj to. Zauważ, że we wzorze na siłę Hooke'a mamy przemieszczenie x , a odległość r w wzorze 10.7 jest sumą odległości spoczynkowej między przewodnikami oraz dwa razy przemieszczenia x ($2x$)

Porównaj natężenie prądu w przewodnikach z natężeniami prądu, spotykanymi w urządzeniach domowych. Które z wartości są porównywalne?

Oblicz siłę odpychania i oszacuj niepewność jej pomiaru obliczając niepewność pomiaru złożonego:

$$dF = \sqrt{\left|\frac{\partial F}{\partial I_1}\right|^2 dI_1^2 + \left|\frac{\partial F}{\partial I_2}\right|^2 dI_2^2 + \left|\frac{\partial F}{\partial r}\right|^2 dr^2 + \left|\frac{\partial F}{\partial l}\right|^2 dl^2} \quad (10.8)$$

Oblicz stałą siły oraz oszacuj niepewność jej wyznaczenia dla każdego połączenia używając odchylenia standardowego

10.5. Pytania

1. Skomentuj siłę Lorentza
2. Skomentuj prawo Ampera
3. Wyprowadź równanie na siłę występującą pomiędzy dwoma przewodnikami z prądem
4. Omów prawo Ohma
5. Jak straty mocy w przewodnikach zależą od natężenia prądu płynącego przez nie
6. Skomentuj prawo Hooke'a
7. Why is the high current safe to your body

10.5. References

1. Resnick R., Halliday D., Fizyka, Tom 2, PWN, Warszawa, 1989
2. Szydłowski H., Pracownia fizyczna, PWN, Warszawa, 1994
3. Young H.D., Freedman R.A., University Physics with Modern Physics, Addison-Wesley Publishing Company, 2000