Ćwiczenie 11B

Wyznaczanie momentu magnetycznego obwodu w polu magnetycznym

11B.1. Zasada ćwiczenia

Na zamkniętą pętlę przewodnika z prądem, umieszczoną w jednorodnym polu magnetycznym, działa skręcający moment sił. W ćwiczeniu bada się zależność tego momentu sił od indukcji zewnętrznego pola magnetycznego, oraz zależność momentu magnetycznego pętli od płynącego w niej prądu.

11B.2. Wiadomości teoretyczne

Jeżeli przez zamkniętą przewodzącą pętlę przepływa prąd, wytwarza on wokół pętli pole magnetyczne. Podstawową wielkością charakteryzującą to pole jest moment magnetyczny $\vec{p}_m$, mający wymiar $[p_m] = \mathrm{A{\cdot}m^2}$. W przypadku, gdy obwód z prądem jest płaski, wytworzony przezeń moment magnetyczny określa wzór:

$$\vec{p}_m = I\vec{S}, \tag{11B.1}$$

gdzie I jest natężeniem prądu a $\vec{S}$ — wektorem prostopadłym do płaszczyzny obwodu, o wartości równej powierzchni S obejmowanej przez obwód, $|\vec{S}| = S$. Zwrot wektora $\vec{S}$ określa reguła śruby prawoskrętnej.

W obecnym ćwiczeniu obwód z prądem ma postać kołowej pętli o średnicy d, składającej się z n zwojów przewodnika. Moment magnetyczny takiego obwodu, zgodnie ze wzorem (11B.1), jest równy:

$$p_m = \frac{\pi}{4} n I d^2. \tag{11B.2}$$

Gdy obwód z prądem jest umieszczony w zewnętrznym jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $\vec{B}$, działa na niego skręcający moment sił:

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}. \tag{11B.3}$$

Wartość tego momentu sił wynosi:

$$M = p_m B \sin\alpha, \tag{11B.4}$$

gdzie α jest kątem między wektorami $\vec{p}_m$ i $\vec{B}$. Pomiar momentu sił skręcającego obwód może być zatem wykorzystany do określenia momentu magnetycznego obwodu. W przypadku, gdy kąt $\alpha = 90°$, ostatni wzór przyjmuje postać:

$$M = p_m B. \tag{11B.5}$$

W doświadczeniu pole magnetyczne jest wytwarzane przez dwie identyczne krótkie cewki z prądem, ustawione prostopadle do osi przechodzącej przez ich środki. Korzystając z prawa Biota-Savarta-Laplace'a można obliczyć wytworzoną przez cewki indukcję pola magnetycznego na ich osi:

$$B_z = \frac{\mu_0 n' I' R^2}{2} \left\{ \left[R^2 + \left(z - \frac{a}{2} \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[R^2 + \left(z + \frac{a}{2} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\}. \tag{11B.6}$$

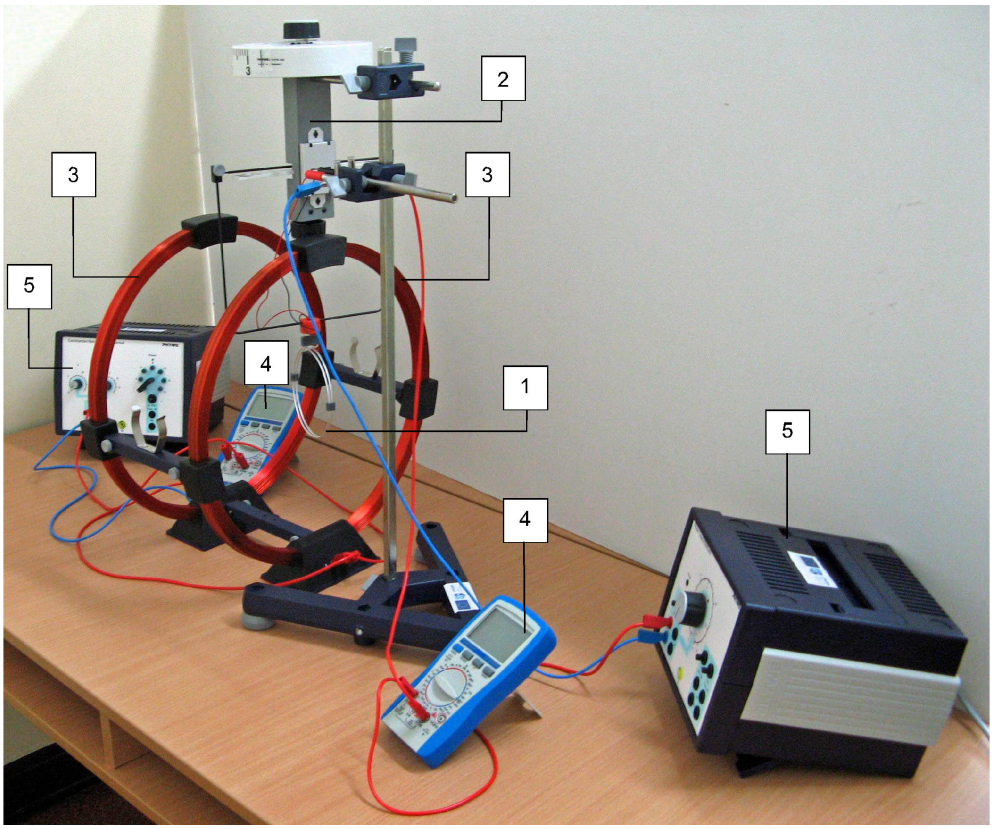
W podanym wzorze $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T·m/A jest przenikalnością magnetyczną próżni, n' oznacza ilość zwojów cewki, I' — natężenie prądu płynącego przez cewki, R — promień cewek, a — ich odległość. Odległość z jest mierzona od punktu leżącego pośrodku cewek, w odległości $a/2$ od płaszczyzny każdej cewki. Można udowodnić, że pole magnetyczne w otoczeniu punktu $z = 0$ jest najbardziej jednorodne w przypadku, gdy $a = R$ (tzw. konfiguracja Helmholtza). Ostatni wzór upraszcza się wówczas do postaci:

$$B = \left(\frac{4}{5} \right)^{3/2} \frac{\mu_0 n' I'}{R} = 0{,}7155 \frac{\mu_0 n' I'}{R}. \tag{11B.7}$$

11B.3. Aparatura pomiarowa

Stosowane w ćwiczeniu urządzenie pomiarowe jest pokazane na rys. 11B.1. Do pomiaru momentu sił obracających obwód służy tzw. waga skręceń. Obwód z prądem jest zawieszony na cienkim sprężystym drucie, którego końce są zamocowane w obrotowych uchwytach. Dolny uchwyt służy do zerowania wagi skręceń przy wyłączonym prądzie w obwodzie lub wyłączonym polu magnetycznym. Należy go obracać do momentu, gdy górna część ramki podtrzymującej obwód ustawi się zgodnie ze znacznikami na nieruchomej belce wagi. Po włączeniu prądu w obwodzie i pola magnetycznego górny uchwyt trzeba obracać do chwili, gdy górna część ramki powróci do poprzedniego położenia. Moment sił wywierany na obwód przez pole magnetyczne jest wtedy zrównoważony przez moment sił skręconego drutu. Naniesiona na górnym uchwycie podziałka, wycechowana w mN, umożliwia pomiar tego momentu. Ramię wypadkowej siły skręcającej drut wynosi 0,1 m. Wartość siły 1 mN na podziałce odpowiada więc wartości momentu siły 0,1 mN·m = 10^{-4} N·m.

Konstrukcja wagi umożliwia również zmianę ustawienia obwodu względem kierunku pola magnetycznego. W tym celu obraca się dolną część walcowego uchwytu obwodu (o czerwonym kolorze) względem jego górnej części. Kąt ustawienia obwodu można odczytać ze znaczników na uchwycie, naniesionych w odstępach 15°. Przewody łączące obwód z zasilaczem powinny swobodnie zwisać. Zerowy punkt wagi skręceń



Rysunek 11B.1. Urządzenie pomiarowe. 1 — kołowa pętla przewodnika, 2 — waga skręceń, 3 — cewki Helmholtza, 4 — mierniki uniwersalne, 5 — zasilacze

powinien być często sprawdzany, ponieważ ruchy obrotowe obwodu mogą przemieścić łączące przewody.

Waga skręceń jest delikatnym, łatwym do uszkodzenia przyrządem. Studenci nie powinni samodzielnie zdejmować obwodu lub zakładać go z powrotem, ani też regulować kąta jego ustawienia.

Obie cewki Helmholtza wytwarzające pole magnetyczne muszą być połączone szeregowo w taki sposób, aby płynął przez nie prąd o jednakowym natężeniu i kierunku. W tym celu gniazdka $1-1$ lub $2-2$ cewek należy połączyć przewodem. Natężenie I' prądu w cewkach Helmholtza nie może przekraczać 3 A.

11B.4. Zadania

1. Wyznaczyć zależność momentu sił skręcających obwód od indukcji zewnętrznego pola magnetycznego i określić moment magnetyczny obwodu.

2. Wyznaczyć zależność momentu magnetycznego obwodu od natężenia płynącego w nim prądu.

11B.5. Przebieg pomiarów i opracowanie wyników

Wszystkie pomiary wykonuje się dla ustalonego kąta ustawienia obwodu względem kierunku pola magnetycznego, $\alpha = 90°$. Płaszczyzna obwodu musi być więc prostopadła do płaszczyzn cewek Helmholtza. W przypadku niewłaściwego ustawienia obwodu studenci powinni poprosić prowadzącego ćwiczenie o skorygowanie ustawienia.

ad 1. Włączyć najpierw zasilacz obwodu, ustalając natężenie prądu na $I = 4$ A. Następnie włączyć zasilacz cewek Helmholtza i zwiększać natężenie I' prądu w cewkach co ok. 0,5 A do 3 A, mierząc za każdym razem moment M sił skręcających obwód. Obliczyć ze wzoru (11B.7) wartości indukcji B pola magnetycznego, odpowiadające wybranym wartościom natężenia prądu I'. Promienie stosowanych w doświadczeniu cewek wynoszą $R = 0{,}2$ m, a liczba ich zwojów $n' = 154$. Wartości I', B i M zapisywać w tabelce.

Po ukończeniu pomiarów sporządzić wykres zależności $M - B$. Zgodnie ze wzorem (11B.5), zależność ta powinna przedstawiać w przybliżeniu linię prostą, określoną ogólnym równaniem:

$$Y = A \cdot X + C, \tag{11B.8}$$

gdzie $X = B$, $Y = M$, $A = p_m$ i $C = 0$. Wartości parametrów A i C prostej i niepewności S_A i S_C parametrów wyznaczyć metodą regresji liniowej, aproksymując doświadczalną zależność $M - B$ funkcją (11B.8). Narysować tę prostą na wykresie. Wartość A jest równa momentowi magnetycznemu obwodu, a wartość S_A — jego niepewności S_{p_m}. Porównać wyznaczoną wartość momentu magnetycznego obwodu z jego wartością teoretyczną, obliczoną ze wzoru (11B.2). Używany w ćwiczeniu obwód ma średnicę $d = 0{,}12$ m i $n = 3$ zwoje.

ad 2. Pomiary wykonywać przy ustalonej wartości natężenia prądu w cewkach Helmholtza, $I' = 3$ A. Natężenie I prądu w obwodzie zwiększać co ok. 0,5 A do maksymalnej wartości 4 A i mierzyć moment sił M, działający na obwód. Wartości momentu magnetycznego obwodu obliczać z przekształconego wzoru (11B.5):

$$p_m = \frac{M}{B}. \tag{11B.9}$$

Wartość indukcji B pola magnetycznego wyznaczyć ze wzoru (11B.7). Zapisywać w tabelce wartości natężenia prądu I, momentu skręcającego M i momentu magnetycznego p_m. Sporządzić wykres zależności $p_m - I$, który, jak wynika ze wzoru (11B.2), powinien być w przybliżeniu prostoliniowy. Obliczyć metodą regresji liniowej współczynniki A i C prostej określonej wzorem (11B.8), w którym teraz $X = I$ i $Y = p_m$, oraz niepewności S_A i S_C współczynników. Narysować prostą na wykresie.

11B.6. Wymagane wiadomości

1. Wektor indukcji pola magnetycznego — jego definicja, jednostka.
2. Siła działająca na przewodnik z prądem w polu magnetycznym.
3. Wyprowadzenie wzorów (11B.1) i (11B.3), określających moment magnetyczny i skręcający moment sił, dla przypadku prostokątnej ramki z prądem.
4. Pole magnetyczne przewodników z prądem — prawo Biota-Savarta-Laplace'a.
5. Wyprowadzenie wzoru, określającego indukcję pola magnetycznego obwodu kołowego na jego osi, na podstawie prawa Biota-Savarta-Laplace'a.
6. Urządzenia, wykorzystujące oddziaływanie pola magnetycznego na przewodniki z prądem.

11B.7. Literatura

[1] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker — Podstawy fizyki, t. 3, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
[2] Cz. Bobrowski — Fizyka — krótki kurs, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.