

E8. BADANIE ZJAWISKA INDUKCJI FARADAYA

Marek Pękała i Bożena Janowska-Dmoch

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej, odkryte przez Michaela Faradaya w 1831 r., dowodzi, że elektryczność i magnetyzm są ze sobą ściśle związane. Istotą zjawiska jest indukowanie pola elektrycznego wywołane zmianami pola magnetycznego. Indukowane pole elektryczne powoduje powstanie w obwodzie różnicy potencjałów zwanej siłą elektromotoryczną indukcji, lub w skrócie SEM, która w zamkniętym obwodzie elektrycznym spowoduje przepływ prądu indukcyjnego. Sformułowane przez Faradaya prawo indukcji elektromagnetycznej, zwane także prawem indukcji Faradaya, należy do podstawowych praw elektrodynamiki. Prawo to mówi, że powstająca w obwodzie siła elektromotoryczna (SEM) jest równa ujemnej pochodnej po czasie strumienia pola magnetycznego Φ_B przenikającego przez obwód

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Cel

Celem pomiarów jest :

- wyznaczenie zależności siły elektromotorycznej indukcji od częstotliwości f zmian pola magnetycznego;
- wyznaczenie charakterystyk obciążeniowych układu.

Wymagania

siła elektromotoryczna, siła elektromotoryczna indukcji, prawo indukcji Faradaya, prąd elektryczny zmienny, potencjał, napięcie, natężenie, opór omowy, opór indukcyjny, zawada, opór wewnętrzny źródła napięcia, moc prądu
prawa Ohma i Kirchhoffa

Literatura

D. Halliday, R. Resnick, Fizyka, tom II, PWN

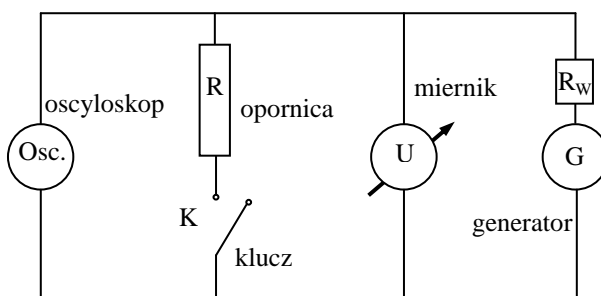
E.M. Purcell, Elektryczność i magnetyzm, Kurs berkeleyjski tom II, PWN.

D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, tom III, PWN

K. Zboiński, Laboratorium z fizyki, Liber.

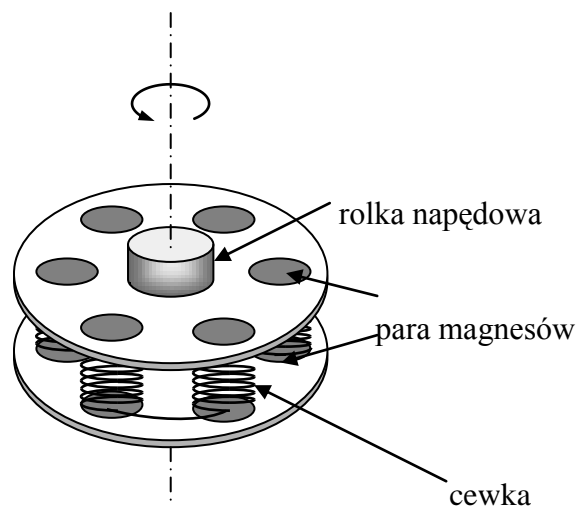
Opis układu

Układ pomiarowy składa się z następujących przyrządów: laboratoryjnego generatora zmiennego napięcia G, oscyloskopu Osc., opornika dekadowego R, miernika uniwersalnego U i klucza K.



Generator składa się z 6 cewek, umieszczonych w narożach sześciokąta i połączonych szeregowo oraz z 6 par magnesów ferrytowych zamocowanych na obrotowej szpuli.

Magnesy są rozmieszczone po dwa, jeden w górnej drugi w dolnej części szpuli, i są zwrócone biegunami przeciwnymi do siebie. W czasie obrotu szpuli każda para magnesów przechodzi nad i pod każdą z cewek. Szpula z magnesami jest wprawiana w ruch obrotowy silnikiem elektrycznym połączonym ze szpulą paskami gumowymi poprzez przekładnię, która umożliwia skokową zmianę częstotliwości obrotów szpuli.



Wirująca szpula z magnesami wywołuje zmiany strumienia magnetycznego w cewkach i powstawanie siły elektromotorycznej indukcji proporcjonalnej do częstotliwości szpuli.

Zmiany w czasie generowanego napięcia możemy obserwować na ekranie oscyloskopu. Gdy klucz jest otwarty, mierzymy napięcie bliskie generowanej SEM. Po zamknięciu klucza na mierniku odczytujemy spadek napięcia U_z na oporniku.

Wykonanie ćwiczenia

Wyniki wszystkich pomiarów muszą być zapisane w sprawozdaniu, opatrzone odpowiednimi jednostkami i podpisane przez asystenta.

Pomiar generowanego napięcia w funkcji częstotliwości f

- Łączymy obwód elektryczny.
- Po sprawdzeniu obwodu przez asystenta i włączeniu zasilania przyrządów obserwujemy na ekranie oscyloskopu przebiegi czasowe generowanej siły elektromotorycznej.
- Ustawiamy zakres miernika uniwersalnego na 20V i naciskamy na przełącznik AC – pomiary dla prądów zmiennych. Przyciskiem FUNCTION wybieramy funkcję jednoczesnego wyświetlania mierzonego napięcia i częstotliwości f .
- Przekładnia mechaniczna pozwala zmieniać prędkości obrotu szpuli. Pomiary powtarzamy kilkakrotnie.
- Dla każdej częstotliwości f obrotu szpuli z magnesami notujemy **przy zamkniętym kluczu** spadki napięcia na oporze zewnętrznym U_z , zmieniając opór zewnętrzny R co 10Ω w zakresie $20 \div 300 \Omega$ i co 50Ω w zakresie $300 \div 1000 \Omega$. Pomiary powtarzamy kilkakrotnie.

Propozycja zapisu wyników:

Częstotliwość f [jednostka], $\Delta f = ..$	Opór R [jednostka], $\Delta R = ..$	Napięcie U_Z [jednostka], $\Delta U_Z = ..$	Prąd $I = U_Z/R$ [jednostka], $\Delta I = ..$	Moc $P = RI^2$ [jednostka], $\Delta P = ..$

gdzie Δf , ΔR , ΔU są błędami systematycznymi wynikającymi z dokładności (klasy) przyrządu.

Opracowanie wyników

1. Dla każdej częstotliwości f obrotów na papierze milimetrowym lub przy pomocy programu komputerowego sporządzamy wykres zależności spadku napięcia $U_Z(R)$ na oporze zewnętrznym od wartości oporu. Na wykresie zaznaczamy również przedziały błędów.

2. Korzystając z prawa Ohma, obliczamy dla każdego oporu natężenie prądu $I = U_Z/R$ płynącego w obwodzie. Błąd ΔI wyznaczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych.

3.1. Korzystając z drugiego prawa Kirchhoffa ($\mathcal{E} - I R - I R_w = 0$) sporządzamy wykresy zależności napięcia $U_Z(I) = I/R$ na oporze zewnętrznym R od natężenia prądu I . Na wykresie zaznaczamy również przedziały błędów.

3.2. Sprawdzamy, czy spełniona jest zależność

$$U_Z(I) = I R = \mathcal{E} - I R_w$$

gdzie \mathcal{E} oznacza generowaną siłę elektromotoryczną a R_w – opór wewnętrzny generatora napięcia.

3.3. Przez punkty pomiarowe prowadzi się dwie proste o skrajnie różnych nachyleniach, odpowiadające powyższej zależności, ale mieszczące się w zakresie błędów.

3.4. Przecięcie prostych z osią napięcia pozwala wyznaczyć średnią wartość $\mathcal{E} \pm \Delta \mathcal{E}$.

3.5. Współczynniki nachylenia obu prostych obliczone np. pomiędzy minimalną I_1 i maksymalną I_2 wartością natężenia

$$R_w = [U_Z(I_1) - U_Z(I_2)] / [I_1 - I_2]$$

pozwalają wyznaczyć średnią wartość oporu wewnętrznego generatora $R_w \pm \Delta R_w$.

3.6. Inną metodą wyznaczenia siły elektromotorycznej \mathcal{E} i oporu wewnętrznego R_w jest metoda najmniejszych kwadratów (regresji liniowej). Numerycznie lub rachunkowo wyznaczamy współczynniki A i B prostej $U_Z(I) = A - B I$ najlepiej dopasowane do punktów pomiarowych. Nanosimy te proste na wykres. Wyznaczamy również błędy ΔA i ΔB . Wartość współczynnika A odpowiada wartości siły elektromotorycznej \mathcal{E} . Wyznaczone wartości SEM nanosimy na wykres $U(v)$. Współczynnik nachylenia B jest równy oporowi wewnętrznemu generatora R_w .

4. Wykonujemy wykres siły elektromotorycznej \mathcal{E} w funkcji częstotliwości f i sprawdzamy, czy spełnione jest prawo indukcji Faradaya.

5.1. Obliczamy moc P ze wzoru $P = RI^2$ wydzieloną na oporze zewnętrznym w zależności od oporu R oraz błąd ΔP wyznaczony metodą propagacji niepewności pomiarowych.

5.2. Sporządzamy wykres mocy $P(R)$ w zależności od wartości oporu R . Na wykresie zaznaczamy również przedziały błędów ΔP .

5.3. Na wykresach $P(R)$ znajdujemy położenie maksimum i sprawdzamy, czy odpowiada ono wartości oporu wewnętrznego generatora R_w , ponieważ:

$$P = U_z I = \left(\varepsilon - \frac{R_w \varepsilon}{R_w + R} \right) \frac{\varepsilon}{R_w + R} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R_w + R)^2} \quad \text{gdzie: } I = \frac{\varepsilon}{R_w + R}$$

Ekstremum tej zależności jest przy:

$$\frac{dP}{dR} = \frac{\varepsilon^2}{(R_w + R)^2} + \frac{-2\varepsilon^2 R}{(R_w + R)^3} = 0 \quad \text{czyli przy } R_w + R = 2R \Rightarrow R_w = R$$

6. Wykonujemy wykres mocy maksymalnej P_{MAX} w funkcji kwadratu częstotliwości f^2 ($P_{MAX}(f^2)$) lub wykres pierwiastka mocy maksymalnej P_{MAX} w funkcji częstotliwości f ($P_{MAX}^{1/2}(f)$).

Uzasadnij, dlaczego zależność P_{MAX} jest proporcjonalna do f^2 .

7. We wnioskach spróbujmy ocenić i uzasadnić:

- czy wyznaczona zależność generowanego napięcia od częstotliwości obrotów szpuli potwierdza prawo indukcji Faradaya;
- czy wartość oporu wewnętrznego generatora R_w wyznaczona z prostoliniowej części wykresu $U(I)$ jest zgodna, w granicach niepewności pomiarowych z oporem odczytanym z wykresu $P(R)$,
- o czym informują nas charakterystyki obciążeniowe generatora.
- Przy jakim oporze moc wydzielona na oporze zewnętrznym jest największa?