

ĆWICZENIE 4.

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA SAMOINDUKCJI CEWKI. OBWODY RL.

Cel ćwiczenia: Poznanie zjawiska indukcji, samoindukcji oraz praw z nimi związanych, doświadczalne wyznaczenie współczynnika samoindukcji.

Część teoretyczna: Prąd sinusoidalnie zmienny, prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya, zjawisko indukcji własnej, reguła Lenza. Rola zjawiska indukcji w obwodach prądu zmiennego.

Aparatura: Zasilacz prądu zmiennego, mierniki uniwersalne, przystawka rejestrująca Cobra, cewki 150,300, 600 zwojów, oporniki 47Ω, 100Ω.

Wstęp.

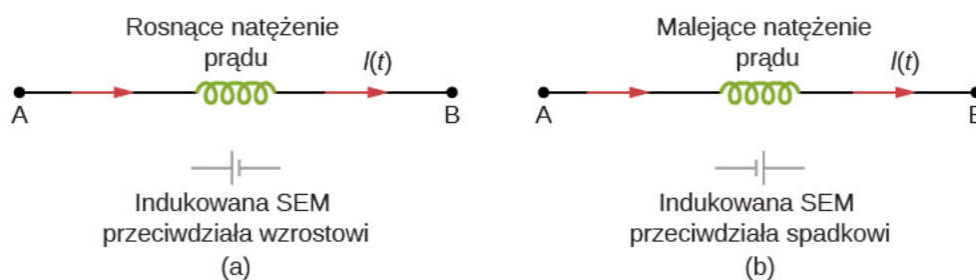
Indukcyjność jest zdolnością urządzenia do indukowania SEM (siły elektromotorycznej) w innym urządzeniu. Ale czy wytworzone pole magnetyczne przez przewodnik może mieć wpływ na prąd płynący w przewodniku, który je wytwarza? Owszem, zjawisko to nosi nazwę **samoindukcji**.

Element obwodu wykazujący samoindukcję nazywany jest cewką indukcyjną.

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$$

Wzór powyższy wyraża w istocie siłę elektromotoryczną SEM powstałą w cewce na skutek zmian natężenia prądu płynącego przez nią, a więc siłę elektromotoryczną indukcji własnej. Wielkość **L** to **współczynnik indukcji własnej (samoindukcji)**. Wartość współczynnika wyrażamy w **henrach H** (henr $H = Vs/A$).

Gdy natężenie prądu płynącego z punktu A do punktu B w układzie na rysunku (a) wzrasta, to indukowana SEM ma kierunek przeciwny do kierunku prądu. Natomiast jeśli natężenie prądu maleje, to SEM indukowana jest w kierunku zgodnym z kierunkiem prądu. Gdy prąd płynący przez cewkę jest stały, nie indukuje się SEM. Kierunek SEM samoindukcji reprezentowany jest na rysunku przez teoretyczną baterię, która byłaby jej źródłem.



Zjawisko samoindukcji odgrywa dużą rolę w obwodach prądu zmiennego. Powoduje, że obwody takie wykazują większy opór niż w analogicznym obwodzie prądu stałego. Efektem tego jest zjawisko, jakby cewka wytwarzała dodatkowy opór dla przepływu prądu zmiennego. Opór ten nazywamy **oporem indukcyjnym** albo biernym i oznaczamy go R_L .

Dla prądu zmiennego o pulsacji $\omega = 2\pi f$:

$$R_L = \omega L$$

Jeśli rozpatrywana cewka ma jednocześnie zwykły opór omowy R (wynikający z grubości, długości i materiału), oba opory R i R_L należy traktować łącznie.

Nie można ich jednak po prostu dodać jak w połączeniach szeregowych, bowiem na cewce następuje przesunięcie fazowe między natężeniem i napięciem.

Stosunek napięcia do natężenia prądu w takim przypadku jest tzw. **zawadą** Z , czyli oporem całkowitym w obwodzie prądu zmiennego, równym:

$$Z = \sqrt{R^2 + R_L^2} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Z powyższego wzoru wynika, że gdy częstotliwość prądu wynosi zero a więc pulsacja $\omega = 0$ to $Z = R$. Dla prądu stałego nie ma różnicy między zwykłym oporem omowym R a zawadą Z . Cewka dla prądu stałego jest zwykłym opornikiem, a jedynym efektem towarzyszącym przepływowi prądu jest stałe, skierowane wzdłuż jej osi, pole magnetyczne, przez co staje się ona elektromagnesem.

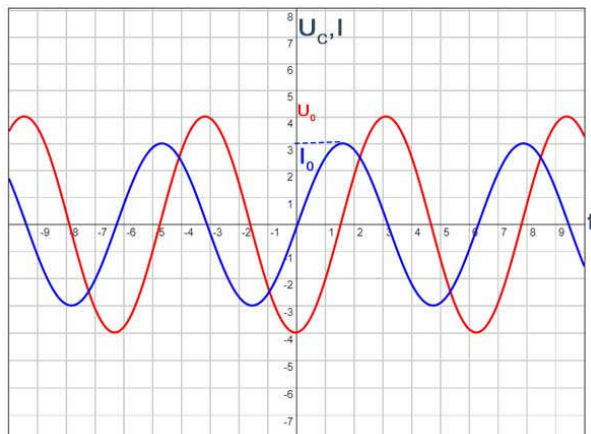
Przekształcając $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ otrzymujemy zależność:

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Powyższy wzór posłuży nam do obliczenia współczynnika samoindukcji L . Należy w tym celu określić opór omowy R badanej cewki i jej zawadę Z przy określonej pulsacji ω .

- 1) Opór omowy R otrzymamy jako stosunek napięcia stałego U na cewce i natężenia prądu stałego I płynącego przez nią, $R = \frac{U}{I}$.
- 2) Zawadę Z obliczymy jako stosunek wartości skutecznej napięcia zmiennego U_{sk} i odpowiedniego natężenia skutecznego I_{sk} prądu zmiennego, $Z = \frac{U_{sk}}{I_{sk}}$.

Jeśli obwód prądu zmiennego zawiera, oprócz oporu omowego, indukcyjność lub pojemność to przebiegi napięcia i natężenia różnią się fazą. Oznacza to, że maksymalne wartości napięcia i natężenia są przesunięte względem siebie w czasie Δt . Przyczyną opóźnienia prądu względem napięcia jest zjawisko samoindukcji. Faza początkowa zależy od wyboru punktu początkowego na osi czasu.



W ogólnym przypadku, gdy obwód składa się z oporu omowego, pojemności i indukcyjności, przesunięcie fazowe wyraża się wzorem:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

gdzie R – opór, L – indukcyjność, C – pojemność.

Zatem w układzie RL dla $C = 0$ równanie przyjmuje postać:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi L}{R} f$$

Przykładem zastosowania samoindukcji są m.in.:

- a) Czujniki montowane w jezdni, których zadaniem jest wykrycie obecności samochodu. Kiedy samochód najeżdża na pętlę indukcyjną, chwilowo zwiększa się jej indukcyjność. Generuje to sygnał przekazywany do innego urządzenia, na przykład sygnalizacji świetlnej lub stacji odcinkowego pomiaru prędkości.
- b) Detektory metalu stosowane przy kontroli bezpieczeństwa. Cewki znajdujące się w bramce detektora działają jednocześnie jako nadajniki i odbiorniki pulsacyjnego sygnału. Obecność metalowego przedmiotu zmienia indukcyjność własną nadajnika i wpływa przez to na emitowany sygnał. Czułość detektora może być wykalibrowana w taki sposób, by wykryć metalowe przedmioty przenoszone przez osoby.
- c) Wysokie indukowane napięcia stosowane są w lampach błyskowych. Wewnątrz aparatu znajduje się bateria, kondensator, transformator zbudowany z dwóch cewek indukcyjnych i generator drgań elektrycznych. Oscylacje pola magnetycznego, pojawiające się ze względu na zmienny prąd, podbijają napięcie z baterii do wartości powyżej 1000 woltów. Kondensator zatrzymuje napięcie, które zostaje użyte do zasilenia lampy w chwili wyzwolenia migawki.

Rozważmy długi, cylindryczny solenoid o długości l , polu przekroju poprzecznego S i N zwojach. Założymy, że jego długość jest tak duża w porównaniu ze średnicą, że pole wewnątrz jest jednorodne. Równanie L ma postać:

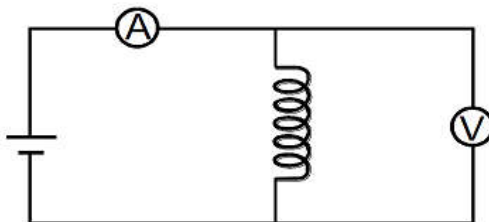
$$L_{\text{solenoidu}} = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$$

Zauważ, że indukcyjność własna solenoidu (cewki) zależy jedynie od fizycznej budowy – liczby zwojów na jednostkę długości oraz pola przekroju – a nie od natężenia prądu. Obserwacja ta jest prawdziwa dla wszystkich cewek indukcyjnych.

CZĘŚĆ PRAKTYCZNA:

CZEŚĆ I. POMIAR SAMOINDUKCJI CEWKI ZA POMOCĄ MULTIMETRÓW.

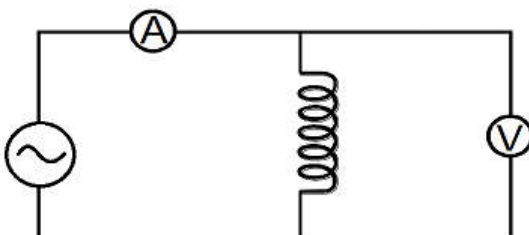
1. Połącz układ pomiarowy według podanego poniżej schematu.



2. Obwód jest zasilany ze źródła **prądu stałego**. Mierniki napięcia i natężenia prądu ustaw na pomiar prądu stałego. Zmieniając napięcie zasilania, dokonaj odczytu napięcia U z woltomierza i odpowiadającego mu natężenia I prądu stałego z amperomierza. Wyniki zapisz w tabeli.

$I[A]$								
$U[V]$								

3. Metodą najmniejszych kwadratów wyznacz opór omowy R i jego niepewność $u(R)$.
4. Przełącz zasilacz na prąd zmienny i odpowiednio ustaw mierniki napięcia i natężenia prądu zmiennego.



5. Analogicznie wykonaj pomiary napięcia U_{sk} i natężenia skutecznego I_{sk} prądu zmiennego. Wyniki zapisz w tabeli.

$I_{sk}[A]$								
$U_{sk}[V]$								

6. Metodą najmniejszych kwadratów wyznacz zawadę Z i jej niepewność $u(Z)$.
7. Oblicz indukcyjność cewki ze wzoru:

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - R^2}$$

dla częstotliwości prądu zmiennego $f = 50\text{Hz}$.

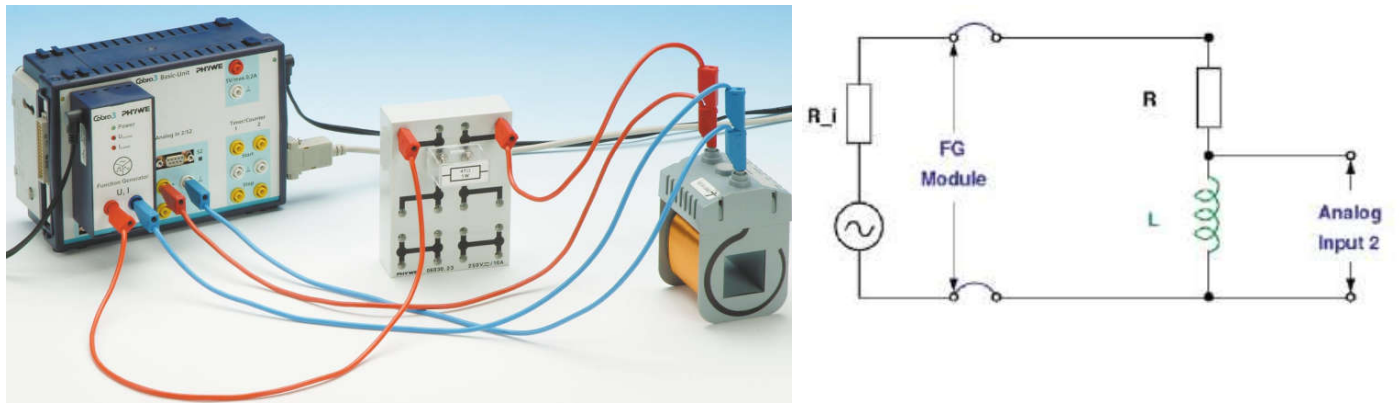
8. Przeprowadź rachunek błędów pomiarowych dla L metodą różniczki zupełnej:

$$u(L) = \left| \frac{Z}{\omega \sqrt{Z^2 + R^2}} \right| u(Z) + \left| \frac{R}{\omega \sqrt{Z^2 + R^2}} \right| u(R)$$

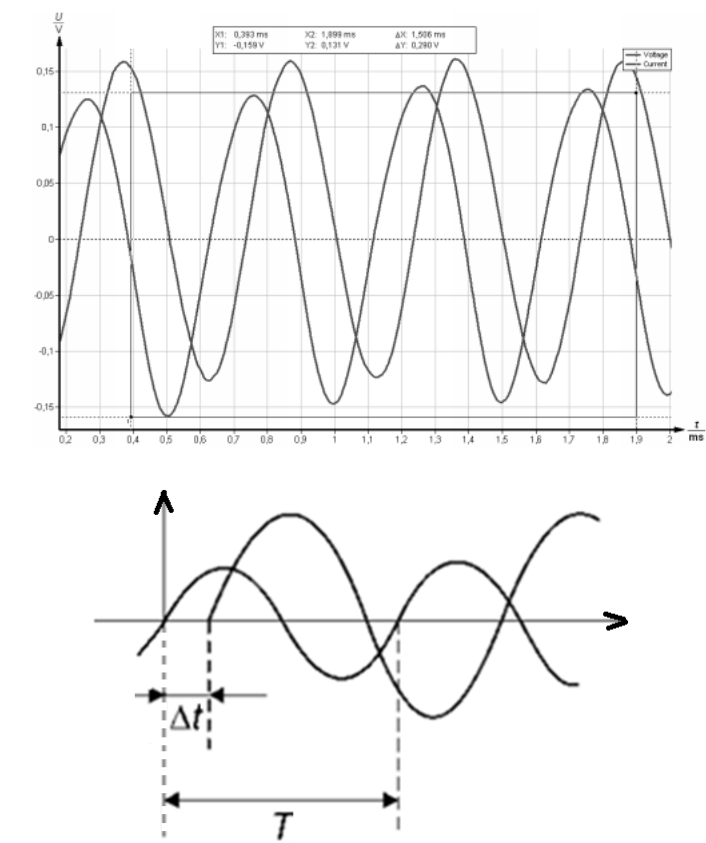
9. Zapisz otrzymane wartości z odpowiednio zaokrąglonymi błędami bezwzględnymi tych wielkości.
10. Porównaj wynik z wartości podaną na obudowie cewki. Zapisz wnioski.

CZEŚĆ II. POMIAR SAMOINDUKCJI CEWKI ZA POMOCĄ PRZYSTAWKI REJESTRUJĄCEJ COBRA.

1. Ustaw układ pomiarowy według schematu poniżej. Układ pomiarowy należy ustawić przy wyłączonym zasilaczu.



2. Wykonaj pomiary czasu przesunięcia fazowego Δt oraz okresu T dla wybranych w tabeli wartości częstotliwości prądu. Wyniki zapisz w tabeli.



$f[Hz]$	$\Delta t [ms]$	$T [ms]$	φ	$tg \varphi$
1000				
1100				
1200				
1300				
1400				
1500				
1600				
1700				
1800				
1900				
2000				

3. Korzystając z zależności:

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta t}{T} [radiany]$$

oblicz wartość kąta przesunięcia fazowego φ oraz wartość tangensa φ . Zapisz wyniki w tabeli.

4. Za pomocą aplikacji Excel (lub innej) narysuj punktowy wykres $tg\varphi(f)$ jako funkcji częstotliwości.

$$tg\varphi = \frac{2\pi L}{R} f$$

5. Metodą najmniejszych kwadratów dopasuj prostą regresji $tg\varphi = af + b$ wyznaczając współczynnik a oraz niepewności $u(a)$.
6. Wyznacz przybliżoną wartość współczynnika samoindukcji cewki korzystając ze wzoru:

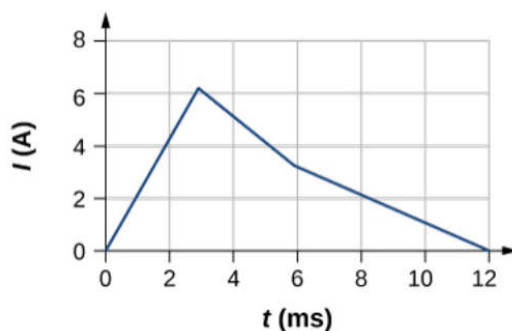
$$L = \frac{aR}{2\pi}$$

gdzie za R przyjmij sumę oporu rezystora 47Ω i oporu omowego cewki.

7. Wyznacz niepewność $u(L)$ korzystając z prawa przenoszenia niepewności pomiarowych.
8. Porównaj wynik z wartości podaną na obudowie cewki. Zapisz wnioski.

Przykładowe zadania na kolokwium.

1. Na ciasno nawiniętej cewce o 50 zwojach zmierzono zaindukowaną SEM o wartości 2V, podczas gdy natężenie prądu zmieniało się jednostajnie od 0A do 5A w czasie 0,1s. Ile wynosi indukcyjność własna cewki?
2. Po wykonaniu zdjęcia z fleszem kondensator w lampie błyskowej rozładowuje się przez cewkę indukcyjną. W jakim czasie prąd o natężeniu 0,1A musi zostać włączony lub wyłączony, aby indukować SEM o wartości 500V w cewce o indukcyjności własnej 2mH?
3. Solenoid o długości 50cm zwinięty jest z 500 zwojów drutu. Przekrój poprzeczny cewki wynosi $2cm^2$. Jaka jest indukcyjność własna solenoidu?
4. Natężenie prądu $I(t)$ płynącego przez cewkę o indukcyjności własnej $L = 5mH$ zmienia się w czasie tak, jak narysowano poniżej. Oporność cewki wynosi $R = 5\Omega$. Oblicz napięcie w cewce w czasie $t = 2ms$.



Bibliografia:

Podręcznik online - Fizyka dla szkół wyższych. <https://cnx.org/>

Henryk Szydłowski, Pracownia fizyczna, PWN, Warszawa 2003

David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, Podstawy fizyki, t. 1-5, PWN, Warszawa 2003.