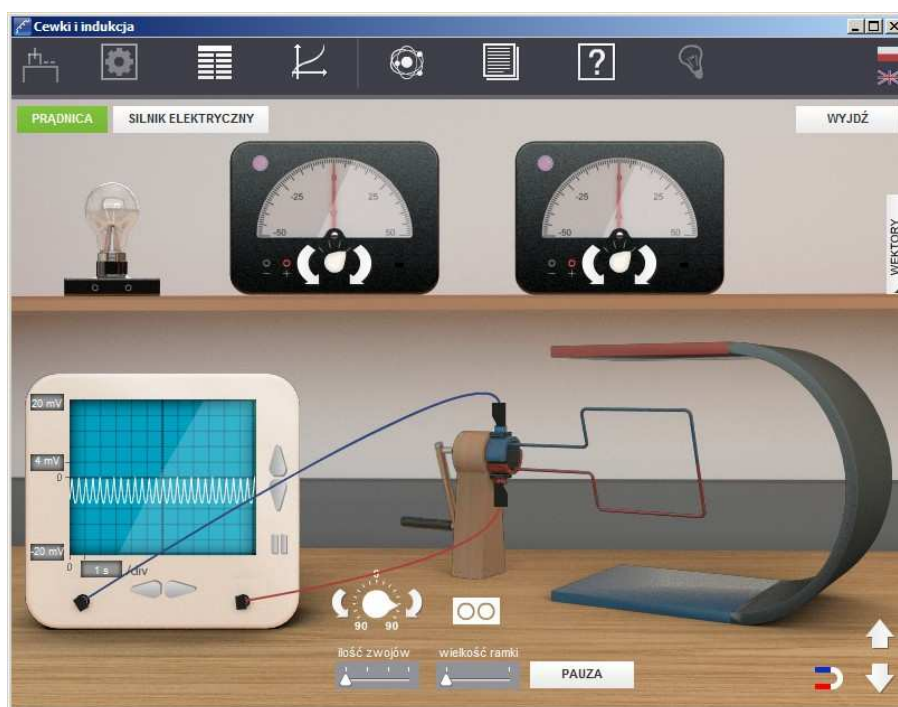




Podręcznik – zeszyt ćwiczeń dla uczniów

Cewki i indukcja



1 Cewki i indukcja

Niniejsze e-doświadczenie poświęcone zostało zagadnieniom związanym z indukcją elektromagnetyczną. Pokazane zostanie indukowanie siły elektromotorycznej w cewkach magnetycznych, znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym, wytwarzanym przez magnesy stałe oraz przewodniki z prądem. Z dostępnych elementów skonstruować można również transformator. W ciekawostce pokazana zostanie idea działania prądnicy oraz prostego silnika elektrycznego. Za pomocą wagi magnetycznej można będzie zmierzyć wartość siły elektrodynamicznej.

Aby poszerzyć swoją wiedzę na temat zagadnień związanych z elektrycznością, zajrzyj także do e-doświadczeń „Pole elektryczne”, „Obwody prądu stałego” oraz „Układy RLC”. Przed przystąpieniem do niniejszego e-doświadczenia zaleca się zapoznanie z „Obwodami prądu stałego”.

Prąd stały Prąd stały, rozważany szerzej w e-doświadczeniu „Obwody prądu stałego” to prąd, którego wartość jest stała w czasie¹. Prąd stały wytwarzają ogniwa w reakcjach chemicznych. Mówimy także, iż są to źródła napięcia stałego. Prądem stałym zasilane są wszystkie urządzenia przenośne.

Prąd przemienny Prąd przemienny² to prąd, którego wartość i kierunek cyklicznie się zmieniają³. Związane jest to ze sposobem wytwarzania prądu przez generatory prądu. Jak powstaje prąd przemienny, dowiesz w niniejszym e-doświadczeniu, natomiast własności obwodów, w których płynie prąd przemienny, poznasz w e-doświadczeniu „Układy RLC”. W formie prądu przemiennego elektryczność jest dostarczana z elektrowni do domów.

Cewka magnetyczna Cewka magnetyczna nazywana jest także solenoidem, zwojnicą lub induktorem. Typowa cewka (tzw. cewka cylindryczna) powstała w wyniku nawinięcia na powierzchnię cylindra określonej liczby zwojów przewodnika. Spotyka się także cewki nawinięte na powierzchni pierścienia (tzw. cewka toroidalna) lub na płaszczyźnie (tzw. cewka

¹Często spotyka się skrót DC – z angielskiego Direct Current.

²Często spotyka się skrót AC – z angielskiego Alternating Current.

³Prąd, który nie zmienia się cyklicznie tylko przypadkowo nazywamy prądem zmiennym.

spiralna lub płaska). Wewnątrz cewki często umieszcza się rdzeń, czyli kawałek walca, który zazwyczaj wykonany jest z materiału diamagnetycznego lub ferromagnetycznego.

Indukcyjność cewki Wielkością charakterystyczną cewki jest jej indukcyjność L , którą można zapisać następującym wzorem:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}, \quad (1.1)$$

gdzie μ_0 to przenikalność magnetyczna próżni, μ_r względna przenikalność magnetyczna ośrodka, A to powierzchnia przekroju cewki, zaś l to długość cewki. Dla cewki powietrznej $\mu_r = 1$, jednak często wewnątrz cewki umieszcza się rdzeń wykonany z materiału o przenikalności μ_r rzędu od kilkuset do kilku tysięcy.

Wzór jest poprawny dla cewek długich.

Jednostką indukcyjności jest henr [H].

Uwaga! W zakładce „Narzędzia” e-doświadczenia podano parametry cewek. Są to N – liczba zwojów, D – średnica zwoju oraz l – długość cewki. Wartości stałych μ_0 oraz μ_r znajdziesz w zakładce „Tablice fizyczne”.

Prawo Ohma Zależność między napięciem i natężeniem prądu podaje prawo Ohma:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.2)$$

gdzie R jest oporem elektrycznym. Jednostką oporu elektrycznego jest om [Ω].

Opór omowy Opór omowy to rzeczywisty opór elektryczny drutu, z którego wykonana jest cewka. Opór omowy zależy wyłącznie od parametrów drutu zgodnie ze wzorem:

$$R = \rho \frac{l}{s}, \quad (1.3)$$

gdzie ρ to oporność właściwa, l długość drutu, zaś s to pole przekroju poprzecznego drutu.

Opór indukcyjny W przypadku przepływu prądu zmiennego przez cewkę, jej opór się zwiększa. Oprócz zwykłego oporu omowego drutu, z którego wykonana jest cewka pojawia się dodatkowy opór zwany oporem indukcyjnym. Ten dodatkowy opór nazywa się ogólnie oporem biernym. Zapisuje się go następującym wzorem:

$$R_L = \omega L, \quad (1.4)$$

gdzie ω to częstość⁴ zmian natężenia prądu elektrycznego i jest powiązana z częstotliwością f następującą relacją:

$$\omega = 2\pi f. \quad (1.5)$$

Częstotliwość zmian prądu elektrycznego

Częstotliwość napięcia (a także natężenia prądu) w sieci elektroenergetycznej wynosi $f = 50$ Hz⁵. Znając częstotliwość można wyznaczyć okres drgań T (czyli okres zmian napięcia):

$$T = \frac{1}{f}. \quad (1.6)$$

Przez okres rozumiemy czas, po którym napięcie uzyska ponownie tę samą wartość.

Impedancja

Jest to całkowity opór cewki magnetycznej, który zapisujemy następującym wzorem:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (1.7)$$

Wówczas prawo Ohma można przepisać w następującej postaci:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (1.8)$$

Gdy przez cewkę płynie prąd stały, to $\omega = 0$ i otrzymujemy prawo Ohma w postaci (1.2).

Napięcie skuteczne

Aby porównać moc wydzieloną na oporniku podłączonym do napięcia stałego (moc jest stała w czasie), z średnią mocą wydzieloną na oporniku podłączonym do napięcia zmiennego (wydzielona moc cyklicznie się zmienia w czasie, z taką samą częstotliwością jak napięcie), wprowadzono pojęcie napięcia skutecznego.

Napięcie skuteczne napięcia zmiennego jest równe stałemu napięciu przyłożonemu do danego oporu, przy którym na oporze tym wydziela się taka sama moc jak średnia moc przy napięciu zmiennym.

Wartość napięcia skutecznego pokazują woltomierze w trybie pomiaru napięcia zmiennego. Dla napięcia sinusoidalnego o wartości maksymalnej równej U_0 napięcie skuteczne U_{sk} wynosi:

$$U_{sk} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}, \quad (1.9)$$

⁴Jednostką częstości jest radian na sekundę.

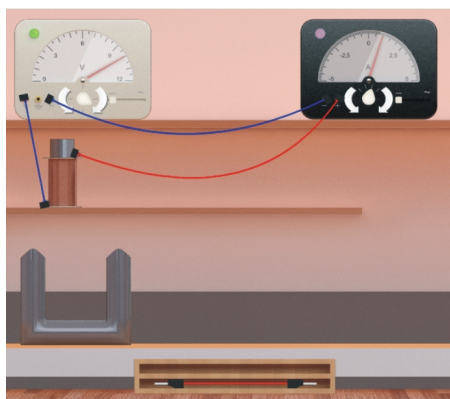
⁵Hz (herc) jest jednostką częstotliwości. [1 Hz = 1/s]

Ćwiczenie 1 Badanie napięcia zmiennego i napięcia stałego

- ✓ Wybierz z „Narzędzi” zasilacz, oscyloskop, woltomierz i co najmniej dwa przewody.
- ✓ Podłącz oscyloskop do zasilacza. Ustaw napięcie na zasilaczu np. 3 V. Odczytaj wartość napięcia mierzonego na oscyloskopie.
- ✓ Ustaw zasilacz w trybie napięcia przemiennego. W tym celu należy przesunąć suwak znajdujący się na obudowie zasilacza w prawą stronę. Jaka jest amplituda napięcia, tzn. maksymalna wartość napięcia? Podziel wartość amplitudy napięcia odczytaną z oscyloskopu przez wartość napięcia ustawionego na zasilaczu. Porównaj wynik ze wzorem (1.9).
- ✓ Wyznacz okres zmian napięcia. Z jaką częstotliwością zmienia się napięcie? Wynik wyraż w hercach.
- ✓ Czy napięcia podawane na skali zasilacza ustawionym w trybie napięcia przemiennego są napięciami skutecznymi, czy amplitudami napięcia przemiennego?
- ✓ Zamiast oscyloskopu do zasilacza podłącz woltomierz. Pamiętaj, aby ustawić woltomierz w trybie pomiaru napięcia przemiennego. Jakie napięcia mierzy woltomierz?

Ćwiczenie 2 Wyznaczanie indukcyjności cewki

- ✓ Aby zobaczyć jak wyglądają cewki oraz rdzenie cewek, przed przystąpieniem do ćwiczenia, warto obejrzeć animację pod tytułem „Indukcja elektromagnetyczna”. Animacja znajduje się w „Pokaż stanowisko” w górnym pasku narzędziowym.
- ✓ A teraz wybierz z „Narzędzi” zasilacz, rdzeń żelazny, amperomierz, kilka przewodów, cewkę (np. $N = 400$).
- ✓ Połącz szeregowo zasilacz, cewkę oraz amperomierz.



- ✓ Wyznacz opór elektryczny cewki, gdy płynie w niej prąd stały. Skorzystaj z prawa Ohma (1.2).
- ✓ Wyznacz opór elektryczny cewki, gdy płynie w niej prąd przemienny. Pamiętaj, aby ustawić zasilacz oraz amperomierz w trybie prądu przemiennego. Czy obserwujesz różnicę w wielkości natężenia prądu.
- ✓ Umieść w cewce rdzeń i powtórz pomiar oporu. Aby umieścić rdzeń, należy przeciągnąć myszką element domykający (walec) na cewkę. Opór, który zmierzyłeś powinniśmy nazwać impedancją. Dla porównania możesz przełączyć zasilacz oraz amperomierz w tryb prądu stałego i odczytać wielkość natężenia prądu.
- ✓ Wyznacz indukcyjność cewki z rdzeniem (L) na podstawie wzoru (1.8). Pamiętaj, iż R to opór omowy wyznaczony w trybie prądu stałego.
- ✓ W celu sprawdzenia otrzymanej wartości indukcyjności cewki L , policz indukcyjność cewki na podstawie wzoru teoretycznego (1.1).
- ✓ Korzystając z dotychczas zdobytej wiedzy wyznacz wartość względnej przenikalności magnetycznej μ_r stali, z której wykonano drugi dostępny w „Narzędziach” rdzeń.

2 Pomiar siły elektrodynamicznej

Indukcja pola magnetycznego

Do opisu pola magnetycznego używamy dwóch wielkości: natężenia pola magnetycznego \vec{H} (gdzie jednostką jest amper na metr, $\frac{A}{m}$) oraz indukcji pola magnetycznego \vec{B} (gdzie jednostką jest tesla, $T = \frac{V \cdot s}{m^2}$).

Indukcję pola magnetycznego definiuje się poprzez siłę działającą na ładunek poruszający się w polu magnetycznym, tzw. siłę Lorentza. Możemy ją zapisać jako

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (2.1)$$

gdzie \vec{F} to siła działająca na ładunek, q to ładunek poruszający się w polu magnetycznym, \vec{v} to prędkość ładunku, a \vec{B} to indukcja pola magnetycznego.

W zapisie skalarnym (liczbowym, nie wektorowym) wzór (2.1) przyjmuje następującą postać

$$F = qvB \sin \alpha, \quad (2.2)$$

gdzie α to kąt pomiędzy wektorem prędkości, a wektorem indukcji magnetycznej. Siła działająca na ładunek poruszający się w polu magnetycznym jest największa, gdy wektor prędkości jest prostopadły do wektora indukcji magnetycznej ($\vec{v} \perp \vec{B}$), wówczas kąt $\alpha = 90^\circ$, a sinus tego kąta równy jest jedności, co prowadzi nas do następującego wyrażenia

$$F_{max} = qvB. \quad (2.3)$$

Ze wzoru (2.2) wynika także, że na ładunek poruszający się zgodnie z kierunkiem pola magnetycznego (wektor prędkości jest równoległy do wektora indukcji magnetycznej), siła Lorentza nie działa (sinus kąta $\alpha = 0^\circ$ jest równy zeru)

$$F = 0. \quad (2.4)$$

Związek między natężeniem pola magnetycznego, a indukcją pola magnetycznego można zapisać w następujący sposób

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}, \quad (2.5)$$

gdzie μ_0 to przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T}\cdot\text{m}}{\text{A}}$), natomiast μ_r to względna przenikalność magnetyczna ośrodka. Ze wzoru (2.5) wynika, że indukcja magnetyczna \vec{B} jest różna w różnych ośrodkach (różne wartości μ_r), zaś natężenie pola magnetycznego \vec{H} jest wielkością uniwersalną, niezależną od ośrodka.

Względna przenikalność magnetyczna

Względna przenikalność magnetyczna charakteryzuje właściwości magnetyczne danego materiału. W zależności od wartości tego współczynnika można przypisać dany materiał do odpowiedniej grupy substancji magnetycznych. Wyróżniamy trzy grupy substancji: diamagnetyki (substancje, dla których współczynnik μ_r jest mniejszy niż jeden, np. miedź), paramagnetyki (substancje, dla których współczynnik μ_r jest większy niż jeden, np. tlen) oraz ferromagnetyki (substancje, dla których współczynnik μ_r jest znacznie większy od jedności, np. żelazo).

Ruch ładunków elektrycznych w przewodniku

Rozważmy ruch ładunku elektrycznego w przewodniku. Możemy przepisać wzór (2.3) podstawiając za prędkość v ładunku drogę l przebytą w czasie t :

$$F = q \frac{l}{t} B = \frac{q}{t} l B. \quad (2.6)$$

Przy czym ilość ładunku q przepływającego przez przekrój przewodnika w czasie t definiuje się jako natężenie prądu I :

$$I = \frac{q}{t}. \quad (2.7)$$

Siła elektrodynamiczna

Wzór (2.6) można przepisać w następującej postaci:

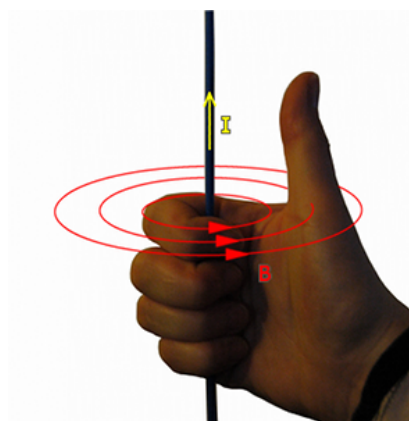
$$F = IlB, \quad (2.8)$$

gdzie l określa długość przewodnika znajdującego się w polu magnetycznego o indukcji magnetycznej B . W ten sposób otrzymaliśmy wzór na siłę elektrodynamiczną F (zwaną także siłą magnetyczną), działającą na przewodnik z prądem.

Aby szybko określić zwrot linii pola magnetycznego wytwarzanego przez przewodniki z prądem, a także kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej, dobrze jest znać poniższe reguły:

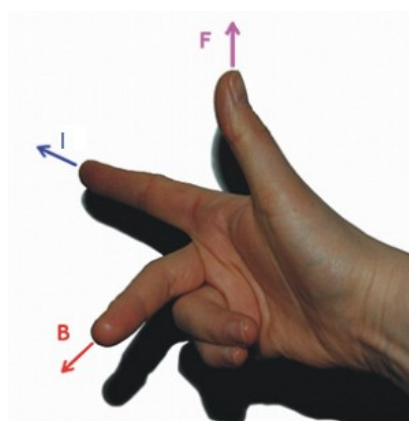
Reguła prawej dłoni

Reguła prawej dłoni umożliwia określenie zwrotu linii pola magnetycznego wytwarzanego przez przewodnik z prądem. Jeżeli w prawej dłoni odchylimy kciuk i ustawimy go w kierunku przepływu prądu przez przewodnik, a pozostałymi palcami będziemy „obejmować” osi wyznaczoną przez kciuk, to ich końce wskażą nam zwrot linii pola magnetycznego.



Reguła trzech palców

Reguła trzech palców prawej ręki, umożliwia pokazanie zwrotu siły elektrodynamicznej działającej na przewodnik z prądem umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym. Jeżeli ustawimy palec wskazujący prawej ręki zgodnie z kierunkiem przepływu prądu I , zaś odgięty palec środkowy zgodnie ze zwrotem indukcji zewnętrznego¹ pola magnetycznego B , wówczas kciuk wskaże zwrot siły elektrodynamicznej F .



Do wyznaczenia wartości siły elektrodynamicznej w e-doświadczeniu będziemy używać tak zwanej wagi magnetycznej, która jest rodzajem dźwigni dwustronnej. W tym celu wprowadzimy poniższe pojęcia.

Moment siły

Pojęcie momentu siły wprowadzamy w ruchu obrotowym. Wyobraźmy sobie zawieszony obiekt, który obracamy przykładając do niego siłę. Moment siły (M) definiuje się w następujący sposób:

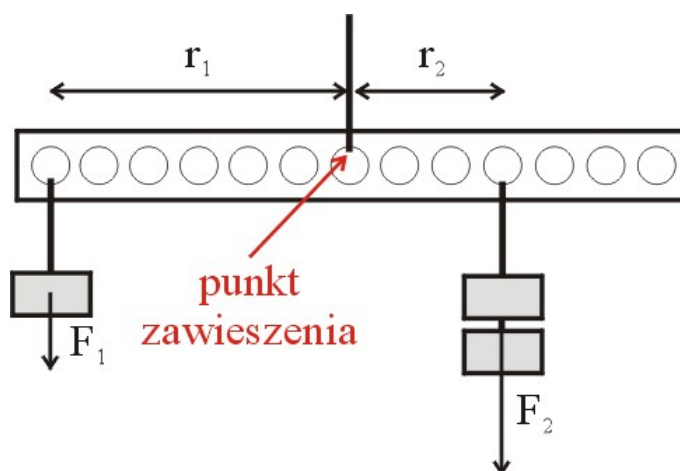
$$M = Fr \sin \alpha, \quad (2.9)$$

¹Należy pamiętać, że nie chodzi tu o zwrot własnego pola magnetycznego wytworzonego przez sam przewodnik, w wyniku przepływu prądu. Zewnętrzne pole magnetyczne może wytwarzać np. magnes trwały lub inny przewodnik z prądem znajdujący się w pobliżu.

gdzie F to siła, zaś r to odległość punktu zaczepienia siły od osi obrotu ciała, zwana także „ramieniem siły”. W przypadku gdy siła skierowana jest prostopadle do ramienia siły ($\alpha = 90^\circ$), wzór (2.9) można zapisać w następującej postaci:

$$M = Fr. \quad (2.10)$$

Dźwignia dwustronna Prostym przykładem dźwigni dwustronnej jest waga szalkowa, a w przypadku tego e-doświadczenia waga magnetyczna.



Równowaga dźwigni dwustronnej ma miejsce gdy momenty sił po obu stronach punktu zawieszenia dźwigni są sobie równe:

$$F_1 r_1 = F_2 r_2. \quad (2.11)$$

F_1 to siła przyłożona w odległości r_1 od punktu zawieszenia dźwigni, po lewej stronie, zaś F_2 to siła przyłożona w odległości r_2 od punktu zawieszenia, po prawej stronie.

Ćwiczenie 3 Pomiar siły elektrodynamicznej działającej na przewodnik z prądem

- ✓ Wykonywanie ćwiczenia zacznij od obejrzenia animacji zestawu doświadczalnego. W tym celu uruchom na pasku menu „Pokaż stanowisko”, a następnie zaznacz „Pomiar siły elektrodynamicznej”. Animację możesz także uruchomić później, w dowolnym momencie w trakcie przeprowadzania doświadczenia.
- ✓ Po uruchomieniu e-doświadczenia na pasku menu wybierz „Narzędzia”, a następnie zakładkę „POMIAR SIŁY ELEKTRODYNAMICZNEJ”. Aby wybrać zestaw doświadczalny, kliknij na „Zestaw

do pomiaru siły elektrodynamicznej”.

Zastanów się Jaka jest idea pomiaru siły elektrodynamicznej?

Wyznacz masę ramki

- ✓ Klikając na odpowiednie strzałki w pobliżu ramienia wagi, możesz przesuwać położenie szalki z piaskiem. W chmurce w pobliżu ramienia wagi możesz odczytać położenie szalki na ramieniu. Klikając na strzałki w pobliżu szalki z piaskiem, możesz zmieniać masę piasku na szalce. Aktualną masę możesz odczytać w chmurce w pobliżu szalki.
- ✓ Przy wyłączonych zasilaczach znajdź położenie równowagi. Wyznacz masę ramki zawieszoną na lewym końcu ramienia wagi. Wskazówka: skorzystaj z definicji momentu siły. Zwróć także uwagę na informacje podane w chmurce w pobliżu ramki.
- ✓ Klikając na zakładkę „WEKTORY” po prawej stronie okna roboczego, możesz wysunąć panel boczny, w którym możesz zaznaczyć, które wektory mają być wyświetlane.

Badanie zwrotu i kierunku siły elektrodynamicznej

- ✓ Na półeczce znajdują się dwa zasilacze. Zwróć uwagę gdzie podłączone są poszczególne zasilacze.
- ✓ Włącz zasilacze, klikając na czerwone przyciski na obudowach.
- ✓ Za pomocą strzałek na zasilaczu podłączonego do elektromagnesu, ustaw pokrętło w połowie skali.
- ✓ Czy wychylenie ramienia wagi zmieniło się? Czy przez elektromagnes płynie prąd?
- ✓ Zwiększaj natężenie prądu płynącego przez ramkę zawieszoną na ramieniu wagi (drugi zasilacz). Czy wychylenie ramienia wagi zmienia się?
- ✓ Przypomnij sobie regułę „prawej dłoni”. Jak skierowane są wektory siły elektrodynamicznej (F), indukcji magnetycznej (B) oraz kierunku przepływu prądu w ramce (I)?
- ✓ Zamień miejscami przewody elektromagnesu w gniazdach zasilacza. Czy coś się zmieniło w układzie?
- ✓ Zamień miejscami przewody prowadzące do ramki, w gniazdach zasilacza. Czy coś się zmieniło w układzie?
- ✓ Na zasilaczu elektromagnesu ustaw zerowe natężenie prądu. Zostaw włączone zasilanie ramki. Jak zachowuje się waga? Czy działa siła elektrodynamiczna?

Wyznaczanie wartości siły elektrodynamicznej

- ✓ Przy wyłączonym elektromagnecie, znajdź położenie równowagi.
- ✓ Włącz zasilacz elektromagnesu. Pokrętło zasilacza elektromagnesu ustaw w położeniu maksymalnym (2 A).
- ✓ Włącz zasilacz ramki. Ustaw na zasilaczu ramki wartość natężenia prądu 1 A.

- ✓ Przywróć położenie równowagi, dobierając odpowiednią masę piasku na szalce. Wyznacz wartość siły elektrodynamicznej.
- ✓ Zwiększaj natężenie prądu płynącego w ramce co 1 A do wartości 5 A i oblicz wartość siły elektrodynamicznej.
- ✓ Otwórz tabelę i zdefiniuj kolumny „ I ” oraz „ F ”, do których wpiszesz odpowiednio wartości natężenia prądu w ramce oraz odpowiadające im wartości siły elektrodynamicznej.

Używanie tabeli

Na pasku menu wybierz „Tabela”. Następnie wybierz „DODAJ KOLUMNĘ”. Zdefiniuj kolumnę klikając na „Wybierz tryb”. Następnie wybierz „Ręcznie” i w odpowiednie pola wpisz I oraz jednostkę A. Analogicznie utwórz kolejną kolumnę, gdzie zdefiniujesz siłę elektrodynamiczną: F .

- ✓ Utwórz wykres zależności $F(I)$.

Tworzenie wykresu

Na pasku menu wybierz „Wykres”. Następnie wybierz „DODAJ WYKRES”. Dla poszczególnych osi wykresu kliknij „Wybierz tryb”, następnie „Tabela”, dalej „Tabela1” oraz odpowiednią wielkość fizyczną, która ma być na tej osi zdefiniowana – w naszym przypadku dla osi pionowej siła F [N], dla osi poziomej I [A].

- ✓ Jaki jest kształt uzyskanej zależności?
- ✓ Na podstawie wykresu wyznacz współczynnik kierunkowy uzyskanej zależności. Jaki jest sens fizyczny tego współczynnika?

Wyznaczanie wartości indukcji magnetycznej elektromagnesu

- ✓ Wyznacz wartość indukcji pola magnetycznego w szczelinie elektromagnesu.

✓ Przeprowadź analogiczny eksperyment. Jednak tym razem ustaw stałe natężenie prądu w ramce równe 5 A. Zwiększaj tym razem natężenie prądu w elektromagnesie (I_m) w zakresie od 0 do 2 A co 0,25 A. Wyznacz wartości siły elektrodynamicznej (F).

- ✓ Sporządź wykres zależności $F(I_m)$. Jaki jest kształt otrzymanej zależności?

✓ Wyznacz wartości indukcji B w szczelinie elektromagnesu dla różnych wartości I_m . Sporządź wykres zależności $B(I_m)$. W jaki sposób wielkość wytworzonego pola magnetycznego w szczelinie elektromagnesu zależy od wielkości natężenia prądu płynącego przez elektromagnes?

3 Indukcja elektromagnetyczna

W e-doświadczeniu „Pole magnetyczne” przekonaliśmy się, że prąd płynący w przewodniku wytwarzał wokół przewodnika pole magnetyczne. Zjawisko to zaobserwował W 1819 roku Hans Oersted umieszczając kompas w pobliżu przewodu, w którym płynie prąd. Przepływ prądu powodował odchylenie igły kompasu.

Kilka lat później Michael Faraday i niezależnie Joseph Henry pokazali, że prąd elektryczny w przewodniku może zostać wytworzony przez poruszający się w pobliżu magnes. Oznacza to, iż zmienne pole magnetyczne może wytwarzać pole elektryczne. Źródłem pola magnetycznego jest zaś pole elektryczne. Elektryczność i magnetyzm są ze sobą ściśle związane. Tę ścisłą zależność potwierdziły w kolejnych latach teoretyczne prace Maxwella.

Zjawisko indukcji Faraday’a

W 1831 roku Michael Faraday przeprowadził następujące doświadczenie. Wykonał pętlę z drutu, którego końce podłączył do galwanometru¹. Poruszając magnesem względem pętli zauważył, iż wskazówka galwanometru porusza się. W pętli płynie prąd, chociaż pętla nie jest połączona z baterią.

Zjawisko to nazywa się zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej Faraday’a, zaś prąd płynący w pętli nazywamy prądem indukowanym, którego przepływ jest wywołany indukowaną w pętli siłą elektromotoryczną². Wielkość wytworzonej siły elektromotorycznej zależy nie tylko od zmian pola magnetycznego, ale ściśle rzecz biorąc od zmian tzw. strumienia pola magnetycznego:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}, \quad (3.1)$$

gdzie $\Delta\phi$ jest zmianą strumienia pola magnetycznego w czasie Δt .

Powyższy wzór odnosi się do pojedynczej pętli. W przypadku gdy mamy do czynienia z większą ilością pętli (np. N zwojów cewki) wzór (3.1) przyjmie postać:

$$\mathcal{E} = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}, \quad (3.2)$$

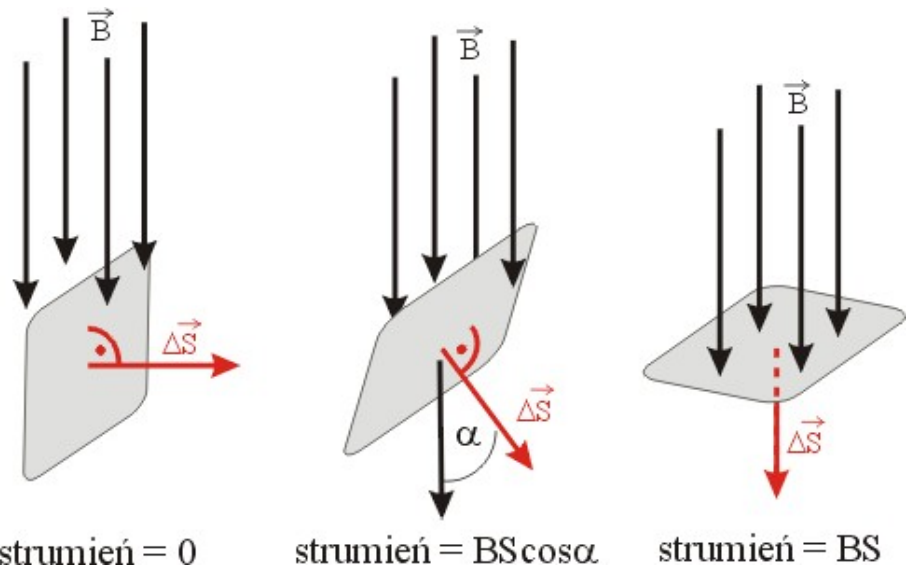
¹Urządzenie pomiarowe służące do pomiarów niewielkich natężeń prądu.

²Pojęcie siły elektromotorycznej możemy rozumieć jako napięcie. Jednostką jest wolt [V]. Nazwa ma swoje podłoże historyczne – miała to być siła, która powoduje ruch ładunków.

Strumień pola magnetycznego

Strumień pola magnetycznego przez analogię możemy sobie wyobrazić jako ilość np. promieniowania przechodzącego przez daną powierzchnię. „Ilość” promieniowania przechodzącego przez daną powierzchnię zależy od kąta ustawienia tej powierzchni względem kierunku wiązki promieniowania.

Strumień pola magnetycznego przez powierzchnię możemy rozumieć jako ilość linii pola magnetycznego przechodzących przez tę powierzchnię.



Matematycznie definiujemy strumień pola magnetycznego w następujący sposób:

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}. \quad (3.3)$$

Mnożenie wektorów jest iloczynem skalarnym, można zatem zapisać (3.3) w następujący sposób:

$$\phi = BS \cos \alpha, \quad (3.4)$$

gdzie α jest kątem pomiędzy wektorem \vec{B} oraz wektorem powierzchni \vec{S} . Wektor powierzchni jest prostopadły do powierzchni. Przyjęcie takiej konwencji sprawia iż wyrażenie na strumień (3.4) przyjmuje wartość zero gdy powierzchnia płaszczyzny jest ustawiona równoległe do linii sił pola magnetycznego (wówczas wektor powierzchni \vec{S} jest skierowany prostopadle do wektora \vec{B} i $\cos \alpha = 0$.) oraz wartość maksymalną gdy powierzchnia płaszczyzny jest ustawiona prostopadle do linii sił pola magnetycznego (wektor \vec{S} pokrywa się z wektorem \vec{B} i $\cos \alpha = 1$).

Reguła Lenza Reguła Lenza pozwala określić kierunek przepływu prądu indukowanego w obwodzie zamkniętym. Jeżeli obwód jest otwarty, to w obwodzie nie popłynie prąd, a jedynie powstanie indukowana SEM³. Reguła podana przez Lenza⁴ brzmi następująco:
„Prąd indukowany ma taki kierunek, że przeciwstawia się zmianie, która go wywołała”.

Zwrot prądu indukowanego w pętli Rozważmy doświadczenie z magnesem i pętlą. Zbliżając magnes do pętli, w pętli pojawi się prąd o takim kierunku, że wytworzone przez niego pole magnetyczne będzie przeciwdziałać narastającemu strumieniowi pola magnetycznego magnesu. Stąd indukowane pole magnetyczne będzie przeciwnie skierowane do zwrotu pola magnetycznego magnesu⁵.
Oddalając magnes od pętli strumień pola magnetycznego magnesu przechodzącego przez pętle zmniejsza się. Stąd indukowane pole magnetyczne usiłuje podtrzymać wielkość strumienia. Zatem prąd indukowany płynie w przeciwnym kierunku, niż w przypadku zbliżania magnesu.

Bieguny magnesu Każdy magnes posiada dwa bieguny: północny (N) i południowy (S). Umownie przyjęto, że linie pola magnetycznego wychodzą z bieguna północnego i wchodzą do bieguna południowego. Przyjęto następującą kolorystykę biegunów: biegun północny maluje się na niebiesko, zaś południowy na czerwono⁶.

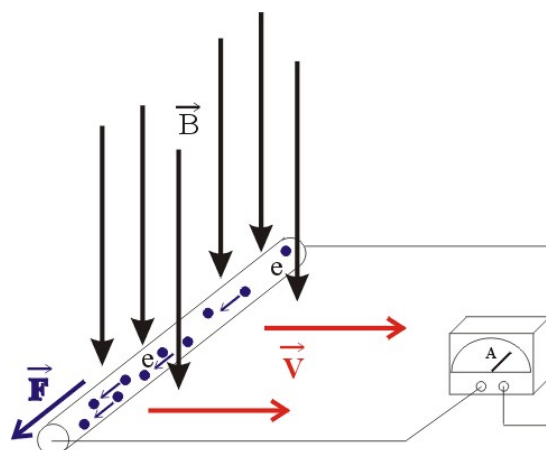
Zjawisko indukcji a siła Lorentza Zjawisko Faraday’a lepiej zrozumiemy, gdy potraktujemy przepływ prądu jako ruch naładowanych ładunków w przewodniku, na które w polu magnetycznym działa siła Lorentza. W zrozumieniu istoty zjawiska Faraday’a pomoże nam rozważenie następującego przykładu.

³O zwrocie zgodnym z kierunkiem przepływu prądu, który by się pojawił gdyby obwód ten był zamknięty.

⁴Heinrich Friedrich Lenz (1804 – 1865) był niemieckim fizykiem. Urodził się na terenie dzisiejszej Estonii. W latach 1823 – 1826 brał udział w wyprawie dookoła świata, podczas której zajmował się badaniem klimatu oraz własności wody morskiej. Znany jest głównie z badań nad elektromagnetyzmem. Na jego cześć przyjęto zapisywać symbol indukcyjności literką „L”.

⁵Zwrot linii pola magnetycznego pozwala określić reguła prawej dłoni podana w rozdziale „Pomiar siły elektrodynamicznej”.

⁶Więcej informacji na temat magnesów trwałych oraz pola magnetycznego wytwarzanego przez te magnesy znajdziesz w e-doświadczeniu „Pole magnetyczne”.



Założmy, iż przesuwamy z pewną prędkością V kawałek miedzianego drutu w zewnętrznym polu magnetycznym. Wiemy, że w przewodniku znajdują się elektrony, a więc ładunki elektryczne, które są nośnikami prądu. Przemieszczając drut w zewnętrznym polu magnetycznym, tak naprawdę przemieszczamy nośniki ładunków elektrycznych znajdujących się w drucie. Na poruszające się ładunki w polu magnetycznym działa siła Lorentza. Siła Lorentza będzie przesuwać ładunki w określonym kierunku wewnątrz pręta, a więc jednocześnie powodować przepływ prądu i wytworzenie różnicy potencjałów pomiędzy końcami pręta. W skali makro powiemy, że w drucie pojawiła się siła elektromotoryczna indukcji. Przykład ten obrazuje, iż zjawisko indukcji elektromagnetycznej jest efektem działania siły Lorentza.

Ćwiczenie 4 Badanie zjawiska indukcji

- ✓ Pracę z e-doświadczeniem zacznij od obejrzenia animacji. Na pasku w oknie głównym wybierz ikonę „Pokaż stanowisko”, a następnie wybierz „Indukcja elektromagnetyczna”. Zwróć uwagę na zachowanie żarówki i magnesu sztabkowego.
- ✓ Wybierz z „Narzędzi” magnes, dwa przewody regulowane, żarówkę. Wybierz ostatnią cewkę o parametrach $N = 400$ zwojów, o średnicy 8 cm.

Uwaga! Kliknięcie myszką na magnes powoduje obrót magnesu o 90° . Analogicznie można obracać cewki.

- Doświadczenie z żarówką**
- ✓ Za pomocą dwóch przewodów regulowanych połącz gniazda żarówki z gniazdami cewki. Poruszaj magnesem sztabkowym w pobliżu cewki.

- ✓ Co obserwujesz? Możesz także obrócić cewkę o 90° i wsunąć magnes do wnętrza cewki.
- ✓ Przesuwaj bardzo powoli magnes względem cewki. Czy obserwujesz indukowaną SEM? Przesuwaj szybko magnes względem cewki. Czy obserwujesz indukowaną SEM? Umieść magnes wewnątrz cewki i nie poruszaj nim. Czy żarówka się świeci? Czy wielkość generowanej SEM zależy od szybkości ruchu magnesu?
- ✓ Czy żarówka świeci się intensywniej w przypadku gdy zbliżamy magnes do cewki, czy też w przypadku gdy przesuwamy magnes wewnątrz cewki w przód i w tył? Jak można interpretować obserwowane zachowanie?
- ✓ Czy natężenie świecenia żarówki zależy od parametrów cewki? Przypomnij sobie wzór (3.2). Wybierz odpowiednie cewki do porównania.

**Zwrot linii
indukowanego pola
magnetycznego -
reguła Lenza**

- ✓ Wybierz na pasku menu e-doświadczenia „Narzędzia”. Oddaj żarówkę i pobierz „amperomierz”. Zwróć uwagę na skalę amperomierza. Pokrętkiem możesz zmieniać zakres amperomierza. Amperomierz powinien być ustawiony w trybie pomiaru prądu stałego (znak „-”).

**Wielkość
indukowanego SEM**

- ✓ Obserwuj wskazania amperomierza gdy magnes jest wsuwany do cewki, oraz gdy jest on wysuwany z cewki? Czy jest różnica?
- ✓ Dodatkowo pobierz z „Narzędzi” woltomierz (alternatywnie zamiast woltomierza można użyć oscyloskopu). Odłącz przewody od amperomierza i połącz przewodami cewkę z woltomierzem. Sprawdź jakie SEM indukuje się w cewce w trakcie ruchu magnesu? Jakie maksymalne SEM jesteś w stanie wytworzyć dla tej cewki?
- ✓ Wybierz teraz cewkę piątą, o takiej samej liczbie zwojów oraz długości lecz o innej średnicy ($d = 2$ cm). Sprawdź jakie maksymalne SEM jesteś w stanie wytworzyć dla tej cewki? Oszacuj teoretycznie, jaka powinna być zmiana indukowanego SEM przy czterokrotnej zmianie średnicy cewki. Porównaj otrzymaną wartość z doświadczeniem.
- ✓ Porównaj teraz wartość indukowanego SEM dla cewki pierwszej (100 zwojów) oraz czwartej (400 zwojów). Oszacuj teoretycznie, ile razy powinna się zmienić SEM.

4 Transformator

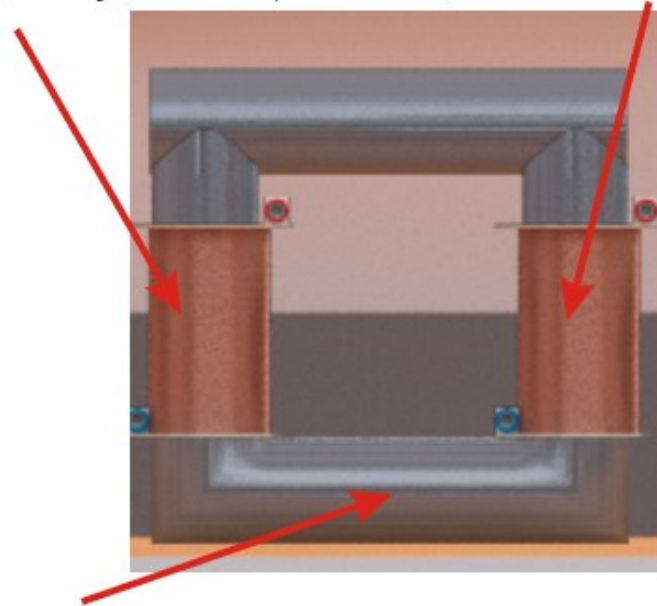
Transformator jest urządzeniem, w którym następuje przekazanie energii elektrycznej z jednego obwodu do drugiego za pośrednictwem pola elektromagnetycznego.

Transformatory mają szereg zastosowań w elektronice jak i elektroenergetyce. Jednym z zastosowań transformatorów jest podwyższenie lub obniżanie napięcia.

Typowy transformator zbudowany jest z dwóch uzwojeń¹ (cewek), które nie są ze sobą połączone. Przekaz energii między uzwojeniami zachodzi w postaci zmiennego w czasie strumienia magnetycznego.

Uzwojenie pierwotne
(podłączony zasilacz)

Uzwojenie wtórne
(odbiornik napięcia)



Rdzeń transformatora

Uzwojenie pierwotne i wtórne

Uzwojenie transformatora, do którego doprowadzone jest napięcie nazywamy uzwojeniem pierwotnym, zaś uzwojenie do którego podłączony jest odbiornik energii elektrycznej nazywamy uzwojeniem wtórnym.

¹Nazywany transformatorem dwuuzwojeniowym.

Transformator rdzeniowy lub powietrzny Uzwojenie pierwotne i wtórne może być nawinięte na rdzeniu (często ferromagnetycznym). Mówimy wówczas o transformatorze z rdzeniem. Inną kategorią transformatorów jest transformator powietrzny. Nie posiada on rdzenia, a wewnątrz uzwojenia wypełnia powietrze.

Przekładnia transformatora Uzwojenie pierwotne i wtórne może mieć różną liczbę zwojów. Stosunek ilości zwojów uzwojenia pierwotnego (N_P) do ilości zwojów uzwojenia wtórnego (N_W) nazywamy przekładnią transformatora:

$$\theta = \frac{N_P}{N_W}. \quad (4.1)$$

Charakter pracy transformatora Rozróżniamy trzy stany pracy transformatora:

- stan jałowy pracy transformatora, gdy zaciski uzwojenia wtórnego są rozwarte,
- stan zwarcia transformatora, gdy zaciski uzwojenia wtórnego są zwarte,
- stan obciążenia transformatora, gdy do zacisków uzwojenia wtórnego dołączony jest odbiornik (np. opornik).

W stanie jałowym przekładnię transformatora można zapisać wzorem:

$$\theta = \frac{U_W}{U_P}, \quad (4.2)$$

gdzie U_P jest napięciem na zaciskach uzwojenia pierwotnego, zaś U_W jest napięciem na zaciskach uzwojenia wtórnego.

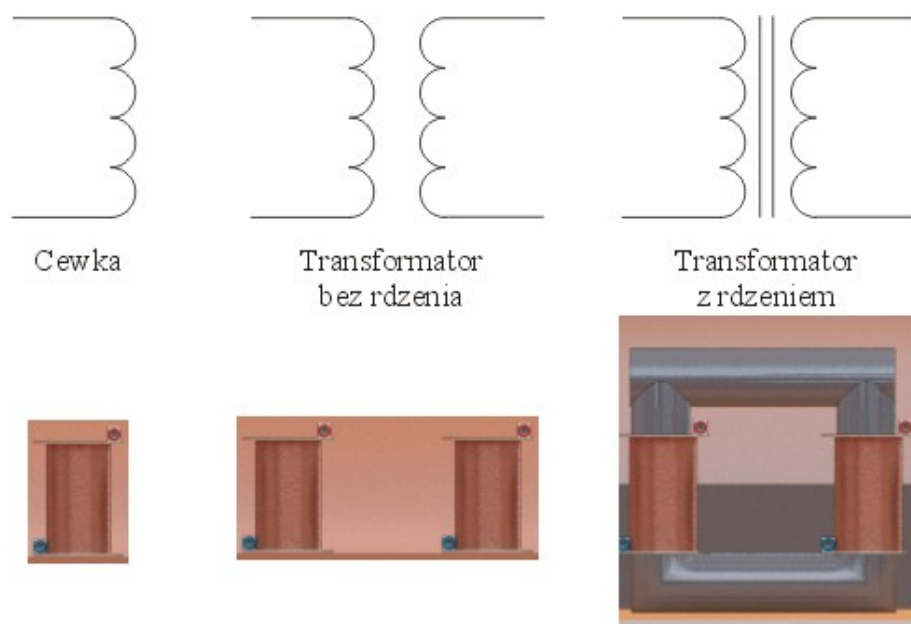
Dla stanu obciążenia transformatora zachodzi także następująca zależność

$$\theta = \frac{I_P}{I_W}, \quad (4.3)$$

gdzie I_P jest natężeniem prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora, zaś I_W jest natężeniem prądu w uzwojeniu wtórnego obciążonego transformatora.

Powyższe zależności obowiązują dla transformatora idealnego, w którym nie ma strat energii/strumienia magnetycznego. Dobrym przybliżeniem takiego transformatora jest transformator z rdzeniem stalowym.

Symbole elektryczne Na rysunku przedstawiono kolejno symbole: pojedynczej cewki, transformatora bez rdzenia (transformatora powietrznego) oraz transformatora z rdzeniem.

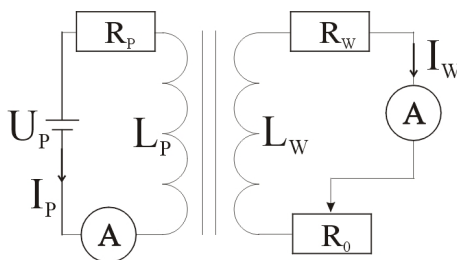


Transformator w stanie jałowym

Natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora w stanie jałowym, zależy tylko od indukcyjności i oporu czynnego uzwojenia pierwotnego. W uzwojeniu wtórnym nie płynie prąd, gdyż między zaciskami cewki uzwojenia wtórnego jest bardzo duży opór. Natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym jest dane wzorem (porównaj ze wzorem (1.8) dla pojedynczej cewki):

$$I_{p,0} = \frac{U_p}{\sqrt{R_p^2 + \omega^2 L_p^2}}. \quad (4.4)$$

Transformator w stanie obciążenia



Natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora można zapisać poniższym wzorem:

$$I_P = \frac{U_P}{Z_P}, \quad (4.5)$$

gdzie Z_P wynosi:

$$Z_P = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (4.6)$$

$$X = R_P + \frac{\omega^2 M^2 (R_W + R_0)}{(R_W + R_0)^2 + \omega^2 L_W^2}, \quad (4.7)$$

$$Y = \omega L_P - \frac{\omega^2 M^2 \omega L_W}{(R_W + R_0)^2 + \omega^2 L_W^2}. \quad (4.8)$$

Natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym transformatora można zapisać poniższym wzorem:

$$I_W = I_P \frac{\omega M}{Z_W}, \quad (4.9)$$

gdzie Z_W wynosi:

$$Z_W = \sqrt{(R_W + R_0)^2 + \omega^2 L_W^2}. \quad (4.10)$$

R_P i R_W to opory omowe odpowiednio cewki pierwotnej oraz cewki wtórnej.

Napięcie na cewce wtórnej gdy jest ona zwarta opornikiem regulowanym R_0 wynosi:

$$U_W = I_W R_0. \quad (4.11)$$

Powyższe wzory podajemy bez wyprowadzenia gdyż są dość skomplikowane, a ich wyprowadzenie wymaga wprowadzenia liczb zespolonych. Jak widać natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym I_W zależy od natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym I_P , które z kolei zależy od indukcyjności i oporu omowego cewki wtórnej.

Ćwiczenie 5 Badanie zjawiska indukcji – dwie cewki

- ✓ Pracę z e-doświadczeniem zacznij od obejrzenia animacji. Na pasku w oknie głównym wybierz ikonę „Pokaż stanowisko”, a następnie wybierz „Indukcja elektromagnetyczna”. Zwróć uwagę na różne konfiguracje metalowego rdzenia i cewki.
- ✓ Wybierz z „Narzędzi” zasilacz, woltomierz, cztery przewody regulowane rdzeń stalowy oraz dwie cewki o parametrach $N = 400$ zwojów, średnicy 4 cm i długości 8 cm (cewka czwarta).
- ✓ Podłącz zasilacz do pierwszej cewki. Podłącz woltomierz do drugiej cewki. Nie łącz cewek razem przewodami.
- ✓ Ustaw zasilacz w trybie napięcia zmiennego (suwak po prawej stronie). Ustaw woltomierz także w trybie pomiaru napięcia zmiennego. Zmniejsz zakres pomiarowy woltomierza. Zwiększaj napięcie na zasilaczu za pomocą strzałek usytuowanych wokół pokrętki. Obserwuj tarczę woltomierza. Czy woltomierz wskazuje napięcie?

- ✓ Czy dwie cewki są ze sobą połączone? Jaka jest zależność między napięciem zasilacza, a wskazaniem woltomierza?
- ✓ Przełącz zasilacz w tryb napięcia stałego (znak „-”). Obserwuj wskazania woltomierza?
- ✓ Wyjaśnij zachowanie woltomierza w przypadku gdy zasilacz jest ustawiony w trybie generacji napięcia zmiennego oraz stałego. Czy widzisz podobieństwo do doświadczenia z poruszającym się magnesem?

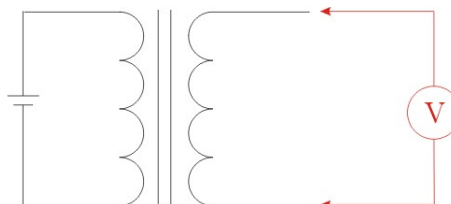
- ✓ W jednej z cewek umieść rdzeń stalowy (prosty walec)². Obserwuj wskazania woltomierza. Ustaw zasilacz w trybie napięcia stałego. Ustaw maksymalne napięcie 12 V. Czy obserwujesz napięcie na woltomierzu? Zmniejsz zakres pomiarowy woltomierza za pomocą pokrętła. Czy włożenie rdzenia coś zmieniło?
- ✓ Nałóż cewki na stalowy rdzeń w kształcie literki „U”.
- ✓ Po nałożeniu cewek na rdzeń ustaw napięcie na zasilaczu. Jaka jest tym razem proporcja między napięciami w obydwu cewkach.

- ✓ Domknij rdzeń, kładąc stalowy pierścień. Powtórz eksperyment. Jaka jest tym razem relacja między napięciami w cewce pierwszej oraz drugiej? Możesz także wymieniać cewki na inny rodzaj.

- ✓ Jak się nazywa tak skonstruowane urządzenie?

Ćwiczenie 6 Badanie transformatora w stanie jałowym

- ✓ Wybierz z „Narzędzi” zasilacz, woltomierz, cztery przewody regulowane rdzeń stalowy oraz dwie identyczne cewki o $N = 100$ zwojów.
- ✓ Zbuduj obwód transformatora w stanie jałowym według poniższego schematu. Do uzwojenia pierwotnego transformatora podłączono zasilacz, zaś do obwodu wtórnego woltomierz.



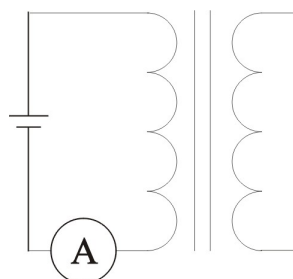
- ✓ Ustaw zasilacz oraz woltomierz w trybie napięcia zmiennego.

²Aby umieścić rdzeń w cewce należy przeciągnąć rdzeń na cewkę.

- ✓ Ustaw na zasilaczu napięcie 10 V. Odczytaj napięcie na cewce uzwojenia wtórnego.
- ✓ Określ przekładnię transformatora doświadczalnie oraz licząc ze wzoru (4.1).
- ✓ Zmieniaj cewkę uzwojenia wtórnego o liczbie zwojów kolejno 200, 300 i 400. Odczytaj napięcia na cewce uzwojenia wtórnego. Aby zmienić cewkę należy oddać do „Narzędzi” starą cewkę i pobrać nową. Określ przekładnię transformatora dla poszczególnych zestawów cewek, doświadczalnie (4.2) oraz używając wzoru (4.1).
- ✓ Zmień cewkę uzwojenia pierwotnego na cewkę o liczbie zwojów $N = 400$. Przy jednakowej wartości napięcia na zasilaczu zmieniaj cewkę uzwojenia wtórnego o liczbie zwojów kolejno 400, 300, 200 i 100. Odczytaj napięcia na cewce uzwojenia wtórnego. Określ przekładnię transformatora dla różnych cewek, doświadczalnie oraz używając wzoru (4.1).
- ✓ Powtórz doświadczenie dla transformatora z rdzeniem żelaznym.
- ✓ Określ współczynnik strat energii dla transformatora z rdzeniem stalowym oraz rdzeniem żelaznym.

Ćwiczenie 7 Badanie transformatora obciążonego

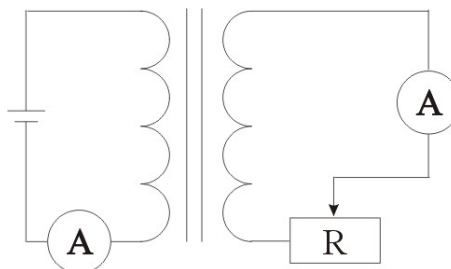
- ✓ Wybierz z „Narzędzi” zasilacz, dwa amperomierze, cztery przewody regulowane, rdzeń stalowy, cewkę o $N = 100$ zwojów oraz $N = 400$ zwojów oraz opornik regulowany.
- ✓ Zbuduj obwód transformatora według poniższego schematu. Jako uzwojenie pierwotne wybierz cewkę o $N = 100$ zwojów, zaś w uzwojeniu wtórnym cewkę o $N = 400$ zwojów. Do uzwojenia pierwotnego transformatora podłącz zasilacz. W uzwojeniu pierwotnym włącz amperomierz, zaś uzwojenie wtórne pozostaw otwarte.



- ✓ Ustaw zasilacz w trybie napięcia zmiennego. Ustaw napięcie 12 V. Odczytaj i zapisz wielkość natężenia prądu płynącego w cewce. Przypomnij sobie, jakie natężenie prądu płynęło w cewce nie nałó-

zonej na rdzeń. Czy w obwodzie uzwojenia wtórnego transformatora płynie prąd?

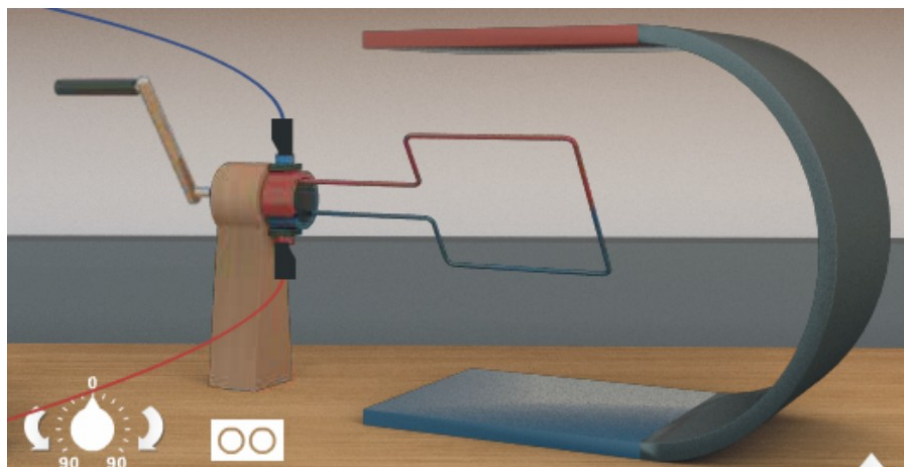
- ✓ Zbuduj obwód transformatora obciążonego opornikiem regulowanym R według poniższego schematu. Do uzwojenia pierwotnego transformatora podłącz zasilacz. Zarówno w uzwojeniu pierwotnym jak i wtórnym włącz amperomierz.



- ✓ Ustaw zasilacz w trybie napięcia zmiennego. Ustaw napięcie 12 V. Ustaw transformator w stanie zwarcia, tzn. na oporniku regulowanym ustaw opór $R = 0 \Omega$.
- ✓ Odczytaj wartość natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym, porównaj wynik z pomiarem natężenia prądu dla transformatora w stanie jałowym. Wyjaśnij różnicę.
- ✓ Zwiększaj wartość oporu uzwojenia wtórnego od 1 do 100Ω co 10Ω . Dla każdej wartości oporu zapisz w kolumnach tabeli wartości natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym (I_P) oraz wtórnym (I_W).
- ✓ Jak się zmienia natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym przy zmniejszaniu oporu uzwojenia wtórnego?
- ✓ Wykreśl zależność $I_P(I_W)$.
- ✓ Jaki jest kształt otrzymanej zależności? Jaki jest sens fizyczny współczynnika kierunkowego otrzymanej zależności?
- ✓ Na podstawie wyników pomiaru wyznacz przekładnię transformatora.

5 Prądnicą i silnik elektryczny

Prądnicą Prądnicą (zwana także generatorem) to urządzenie, które zamienia energię mechaniczną (obrót wirnika) na energię elektryczną. Obracany mechanicznie wirnik, na którym nawinięte jest uzwojenie, znajduje się w stałym polu magnetycznym. Działanie prądnicy oparte jest o zjawisko indukcji Faraday'a. W wyniku ruchu wirnika wytwarzana jest między jego końcami siła elektromotoryczna. Przykładem prądnicy może być dynamo rowerowe lub agregat prądowórczy.



Rzeczywiste prądnice mogą być bardziej złożone, jednak w najprostszej postaci prądnicą składa się z prostokątnej ramki wykonanej z drutu umieszczonej pomiędzy biegunami magnesu stałego. Ramka wirnika z odbiornikiem napięcia może być połączona poprzez komutator lub pierścienie ślizgowe.

W poprzednim rozdziale podany był następujący wzór (3.1) na SEM indukowane w pojedynczej pętli. Dla cewki o N zwojach wzór ten przybiera następującą postać:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}. \quad (5.1)$$

Przytoczmy ponownie wzór na strumień pola magnetycznego (3.4):

$$\phi = BS \cos \alpha, \quad (5.2)$$

gdzie α jest kątem pomiędzy wektorem \vec{B} oraz wektorem powierzchni \vec{S} . Wektor powierzchni jest prostopadły do powierzchni.

W przypadku prądnicy ramka będzie się obracać, a więc ustawienie powierzchni ramki względem kierunku linii pola magnetycznego będzie się w czasie cyklicznie zmieniać. Zatem kąt α pomiędzy kierunkiem linii sił pola magnetycznego (\vec{B}), a wektorem powierzchni \vec{S} można zapisać w następujący sposób:

$$\alpha = \omega t, \quad (5.3)$$

gdzie ω to prędkość kątowa obrotu ramki (często nazywana także częstością lub pulsacją), zaś t to czas. Częstość ω jest związana z częstotliwością f następującą relacją:

$$\omega = 2\pi f. \quad (5.4)$$

Możemy zatem zapisać wyrażenie na strumień w następujący sposób:

$$\phi = BS \cos \omega t, \quad (5.5)$$

Podstawiając do równania (5.1) otrzymujemy:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta(BS \cos \omega t)}{\Delta t}. \quad (5.6)$$

Zmiana strumienia w przypadku prądnicy odbywa się poprzez zmianę ustawienia powierzchni ramki w czasie, a więc zmianę $\cos \omega t$. Wielkości B i S pozostają stałe:

$$\mathcal{E} = -NBS \frac{\Delta(\cos \omega t)}{\Delta t}. \quad (5.7)$$

Widać, że wartość funkcji $\cos \omega t$ zmienia się w czasie, zatem wartość \mathcal{E} także będzie zmieniała się w czasie. Tak więc wzór podaje poprawną wartość chwilową \mathcal{E} gdy $\Delta t \rightarrow 0$.

Ponieważ zmiana funkcji $\cos \omega t$ nie jest stała w czasie, powyższy wzór jest poprawny tylko dla niewielkiego upływu czasu ($\Delta t \rightarrow 0$) dlatego należy zastąpić symbol Δt symbolem różniczki dt ¹:

$$\mathcal{E} = -NBS \frac{d(\cos \omega t)}{dt}. \quad (5.8)$$

Licząc pochodną z funkcji $\cos \omega t$ względem zmiennej t otrzymujemy:

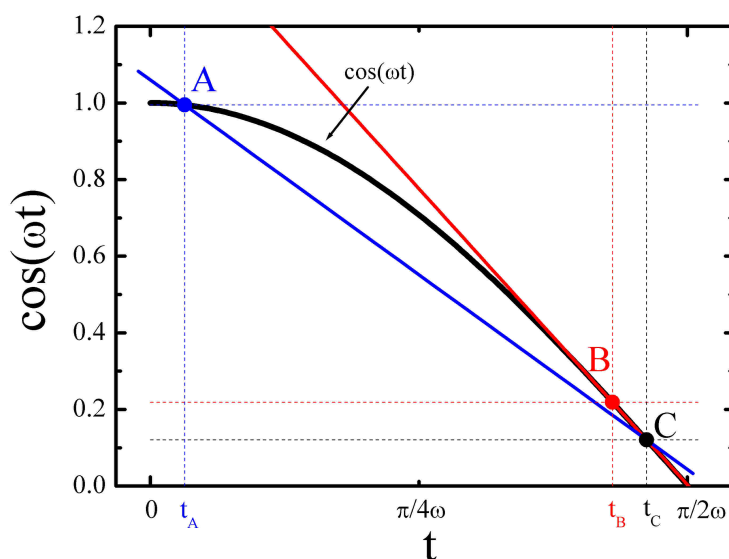
$$\mathcal{E} = NBS\omega \sin \omega t. \quad (5.9)$$

¹Ta operacja matematyczna wybiega poza program szkoły średniej. Zapis ten oznacza różniczkowanie (lub innymi słowy liczenie pochodnej) funkcji $\cos \omega t$ względem czasu t . Zmiana wartości funkcji w każdej chwili czasu jest inna, a więc w długim okresie czasu błędem byłoby dzielenie przyrostu funkcji $\cos \omega t$ przez upływ czasu np. od początku ruchu.

Prądnicą wytwarza prąd zmienny. Natężenie prądu, a także napięcie zmienia się w czasie jak funkcja sinus.

Uzasadnienie wzoru (5.7)

Wielkość indukowanej SEM (\mathcal{E}) zależy od chwilowej zmiany funkcji $\cos \omega t$. Wartość $\cos \omega t$ w zależności od czasu jest przedstawiona na poniższym wykresie czarną krzywą.



Dla przykładu wyznaczmy przybliżoną wielkość siły elektromotorycznej \mathcal{E} w chwili czasu t_C (punkt C na wykresie) względem czasu t_B (punkt B na wykresie):

$$\mathcal{E}_{C-B} = -NBS \frac{\cos \omega t_C - \cos \omega t_B}{t_C - t_B}. \quad (5.10)$$

Wielkość wyrażenia $\frac{\cos \omega t_C - \cos \omega t_B}{t_C - t_B}$ obrazuje nachylenie czerwonej prostej przechodzącej przez punkty B oraz C.

Policzmy to samo, biorąc szerszy przedział czasu (dłuższy upływ czasu) np. między t_A i t_C :

$$\mathcal{E}_{C-A} = -NBS \frac{\cos \omega t_C - \cos \omega t_A}{t_C - t_A}. \quad (5.11)$$

Zauważmy, że nachylenia prostych A–C oraz B–C są różne. Zatem wartość \mathcal{E} wyznaczona w taki przybliżony sposób, będzie różna w tych dwóch przypadkach. Najbliższą rzeczywistej wartości \mathcal{E} otrzymamy dla nieskończenie małego upływu czasu ($\Delta t = (t_C - t_B) \rightarrow 0$). Zauważcie, że w takiej sytuacji odległość od punktu t_C do punktu t_B na wykresie jest zerowa, a prosta B–C jest styczną do wykresu

funkcji $\cos \omega t$.

Komutator i pierścienie ślizgowe

Komutator zbudowany jest z dwóch przewodzących półokręgów izolowanych od siebie, dzięki czemu możliwa jest zmiana kierunku prądu płynącego z wirnika po obrocie ramki o 180° .

Pierścienie ślizgowe to dwa izolowane od siebie pierścienie. Każdy z końców wirnika jest podłączony do osobnego pierścienia. W odróżnieniu od komutatora pierścienie ślizgowe nie zmieniają kierunku prądu płynącego z wirnika.

Dokładne działanie tych elementów zaobserwujesz badając prądnicę w poniższym ćwiczeniu.

Silnik elektryczny prądu stałego

Zasada działania silnika elektrycznego jest odwrotna do działania prądnicy. Budowa silnika modelowego jest identyczna do budowy modelowej prądnicy. W uzwojeniu wirnika płynie prąd wytworzony przez zasilacz. Na wirnik, w którym płynie prąd działa siła elektrodynamiczna (Patrz rozdział 2), która powoduje obrót wirnika.

W przedstawionym modelu silnika można zauważyć, iż w trakcie obrotów wirnika natężenie prądu pobierane z zasilacza cyklicznie obniża się. Związane jest to z indukowaniem się w wirniku prądu o przeciwnym kierunku względem prądu płynącego z zasilacza. Ten indukowany prąd powstaje na tej samej zasadzie co indukowany prąd w prądnicy.

Ćwiczenie 8 Badanie prądnicy

- ✓ Na pasku menu e-doświadczenia wybierz „Ciekawostkę”. „Ciekawostka” ma dwie zakładki: „PRĄDNICA” i „SILNIK ELEKTRYCZNY”. Po uruchomieniu „Ciekawostki” domyślnie pojawia się „PRĄDNICA”.
- ✓ Jest to uproszczony model prądnicy. Składa się ona ze źródła pola magnetycznego (magnes podkowa), ramki wykonanej z drutu połączonej z korbą, którą można obracać.
- ✓ Prądnica posiada regulację liczby obrotów na minutę w zakresie od 0 do 90 obr/min. Zmieniać można także ilość zwojów ramki (1, 20, 60 i 100 zwojów) oraz rozmiar ramki 10 x 10 cm i 15 x 15 cm. W prawym dolnym rogu możesz zamieniać bieguny magnesu oraz wielkość indukcji magnetycznej w zakresie od 0,1 do 0,5 T. Pamiętaj! W każdej chwili możesz zatrzymać doświadczenie przyciskiem „PAUZA”.

- Częstotliwość obrotów ramki** ✓ Za pomocą pokrętła regulacji „obr/min” ustaw liczbę obrotów na np. 60 obr/min. Policz jakiej częstotliwości w hercach odpowiada ustawiona liczba obrotów na minutę.
 ✓ Obserwuj zachowanie żarówki. Jak świeci żarówka? Czy napięcie (SEM) wytwarzane przez prądnicę jest stałe czy zmienne w czasie?
- Strumień pola magnetycznego** ✓ Wysuń panel boczny „WEKTORY”. Zaznacz „pokaż wektor powierzchni wirnika” oraz „pokaż wektor indukcji magnetycznej”. Obserwuj jak się zmienia względne ustawienie tych dwóch wektorów. W jakim położeniu ramki strumień pola magnetycznego w ramce jest największy, a kiedy jest równy zero? Jakie są wówczas kąty między wektorami?
- Kierunek prądu indukowanego** ✓ Wysuń panel boczny „WEKTORY”. Zaznacz „pokaż kierunek prądu indukowanego”. Obserwuj, w którą stronę płynie prąd w ramce. Czy kierunek przepływu prądu się zmienia?
 ✓ Naciśnij przycisk „PAUZA”. Odłącz przewody od żarówki i podłącz je do gniazd oscyloskopu. Naciśnij przycisk „URUCHOM”. Dlaczego w uzwojeniu ramki nie płynie teraz prąd?
 ✓ W jakim położeniu ramki siła elektromotoryczna (napięcie) przyjmuje wartość maksymalną? Przy jakim ustawieniu ramki indukowane napięcie jest równo zero? Jaki jest wówczas strumień pola magnetycznego?
- Komutator i pierścienie ślizgowe** ✓ Zamień komutator na pierścienie ślizgowe. Jak wygląda teraz zależność napięcia od czasu? Wyjaśnij różnicę w działaniu komutatora oraz pierścieni ślizgowych.
 ✓ Jaki fragment krzywej na ekranie oscyloskopu odpowiada jednemu pełnemu obrotowi ramki? W jakim położeniu ramki indukowane SEM jest największe, a w jakim jest równe zero? Jaki jest wówczas strumień pola magnetycznego przechodzącego przez ramkę?
 ✓ Na podstawie krzywej obserwowanej na ekranie oscyloskopu określ okres obrotu ramki.
- Siła elektrodynamiczna** ✓ Do prądnicy podłącz żarówkę lub amperomierz.
 ✓ W panelu „WEKTORY” wybierz „pokaż wektory siły elektrodynamicznej”. Możesz także wyświetlić kierunek indukowanego prądu I oraz wektor indukcji magnetycznej B .
 ✓ Włącz obrót prądnicy. Dlaczego pojawia się siła elektrodynamiczna?
 ✓ Używając reguły trzech palców, sprawdź poprawność zwrotu siły elektrodynamicznej. Jak jest ustawiony wektor siły elektrody-

namicznej względem kierunku obrotu ramki? Czy siła ta pomaga, czy raczej przeszkadza w obrocie ramki?

✓ Podłącz prądnicę do woltomierza i uruchom prądnicę. Czy i tym razem pojawia się siła elektrodynamiczna? Wyjaśnij różnicę.

Zależność SEM od częstotliwości obrotu ramki

✓ Podłącz prądnicę do woltomierza. Ustaw woltomierz na najmniejszym zakresie pomiarowym.

✓ Ustaw liczbę zwojów w ramce równą 100. Ustaw częstotliwość obrotu ramki na 6 obr/min. Odczytaj na mierniku maksymalną wartość napięcia. W razie potrzeby możesz użyć przycisku „Pauza”.

✓ Na pasku menu wybierz „Tabele” zdefiniuj kolumny: „ f ”, do której wpiszesz wartości częstotliwości obrotu ramki oraz „ U ”, do której wpiszesz wartości napięcia.

✓ Zwiększaj częstotliwość obrotu ramki co 6 obr/min i odczytuj na mierniku maksymalną wartość napięcia. Dobierz odpowiedni zakres pomiarowy na mierniku. Wartości wpisuj do tabeli.

✓ Wykreśl zależność $U(f)$. Jaki jest kształt otrzymanej zależności?

Zależność SEM od wielkości indukcji pola magnetycznego

✓ Podłącz prądnicę do woltomierza. Ustaw woltomierz na zakresie pomiarowym 1 V.

✓ Ustaw liczbę zwojów w ramce równą 60. Wybierz ramkę 10 x 10 cm. Ustaw częstotliwość obrotu ramki na 30 obr/min. Odczytaj na mierniku maksymalną wartość napięcia dla indukcji magnetycznej 0,1 T. W razie potrzeby możesz użyć przycisku „Pauza”.

✓ Na pasku menu wybierz „Tabele” zdefiniuj kolumny: „ B ”, do której wpiszesz wartości indukcji magnetycznej oraz „ U ”, do której wpiszesz wartości napięcia.

✓ Zwiększaj indukcję magnetyczną magnesu co 0,1 T i odczytuj na mierniku maksymalną wartość napięcia. Dobierz optymalny zakres pomiarowy na mierniku. Wartości wpisuj do tabeli.

✓ Wykreśl zależność $U(B)$. Jaki jest kształt otrzymanej zależności?

Zależność SEM od liczby zwojów ramki

✓ Podłącz prądnicę do woltomierza. Ustaw woltomierz na najmniejszym zakresie pomiarowym.

✓ Wybierz ramkę 10 x 10 cm. Ustaw wartość indukcji magnetycznej równą 0,5 T. Ustaw liczbę zwojów w ramce równą 1. Ustaw częstotliwość obrotu ramki na 60 obr/min. Odczytaj na mierniku maksymalną wartość napięcia. W razie potrzeby możesz użyć przycisku „Pauza”.

✓ Na pasku menu wybierz „Tabele” zdefiniuj kolumny: „ N ”, do której wpiszesz liczbę zwojów oraz „ U ”, do której wpiszesz wartości napięcia.

✓ Zwiększaj liczbę zwojów w wirniku i odczytuj na mierniku mak-

symalną wartość napięcia. Dobierz optymalny zakres pomiarowy na mierniku. Wartości wpisuj do tabeli.

✓ Wykreśl zależność $U(N)$. Jaki jest kształt otrzymanej zależności?

Zależność SEM od powierzchni ramki

✓ Analogicznie sprawdź jak zmienia się indukowane SEM przy zmianie powierzchni ramki z „10 x 10 cm” na „15 x 15 cm”.

Zastanów się

Korzystając z wiedzy zdobytej w trakcie przeprowadzania doświadczenia, odpowiedz na pytania:

W jaki sposób można by uzyskać stałe świecenie żarówki podłączonej do prądnicy?

Mając do dyspozycji żarówkę o mniejszym oporze elektrycznym oraz żarówkę o większym oporze elektrycznym, którą byś wybrał do użycia w dynamie rowerowym?

Ćwiczenie 9

Badanie silnika elektrycznego

✓ Na pasku menu e-doświadczenia wybierz „Ciekawostkę”. „Ciekawostka” ma dwie zakładki: „PRĄDNICA” i „SILNIK ELEKTRYCZNY”. Po uruchomieniu „Ciekawostki” domyślnie pojawia się „PRĄDNICA”. Aby wybrać silnik elektryczny kliknij na zakładkę „SILNIK ELEKTRYCZNY”.

✓ Jest to uproszczony model silnika elektrycznego. Składa się on ze źródła pola magnetycznego (magnes podkowa) oraz wirnika. Wirnik wykonany jest z drutu przewodnika, który jest podłączony do zasilacza prądu stałego.

Pierścienie ślizgowe

✓ W pierwszej kolejności wybierz pierścienie ślizgowe. W tym celu należy kliknąć na „dwa kółka” umieszczone powyżej suwaka zmiany wielkości ramki.

✓ Wsuń panel „WEKTORY” i zaznacz wektor „siły elektrodynamicznej”, możesz także zaznaczyć „kierunek prądu”.

✓ Włącz zasilacz klikając na czerwony przycisk na obudowie zasilacza. Strzałkami wokół pokrętle na zasilaczu zwiększaj natężenie prądu. Obserwuj kierunek obrotu ramki oraz zwrot siły elektrodynamicznej, a także kierunek przepływu prądu w ramce.

✓ O jaki kąt obróciła się ramka? Dlaczego ramka się zatrzymała? Co należy zrobić, aby ramka wykonała kolejny obrót?

Komutator

✓ Zamień pierścienie ślizgowe na komutator.

✓ Obserwuj kierunek przepływu prądu oraz zwrot wektora siły

elektrodynamicznej w kolejnych fazach obrotu wirnika.
Jaka jest wartość siły elektrodynamicznej gdy ramka jest ustawiona pionowo, a jaka przy ustawieniu poziomym ramki?

- ✓ Obserwuj wskazania oscyloskopu. Czy natężenie prądu pobieranego z zasilacza jest stałe? Wyjaśnij wynik obserwacji. Zmieniaj parametry silnika i sprawdź od czego zależy wielkość obserwowanego efektu.
- ✓ Zaznacz wektory „siły elektrodynamicznej”, „kierunek prądu” oraz „kierunek prądu indukowanego”. Jak powstaje prąd indukowany w wirniku?
- ✓ Dlaczego długość wektora siły elektrodynamicznej cyklicznie się zmienia?



Gdańsk 2013