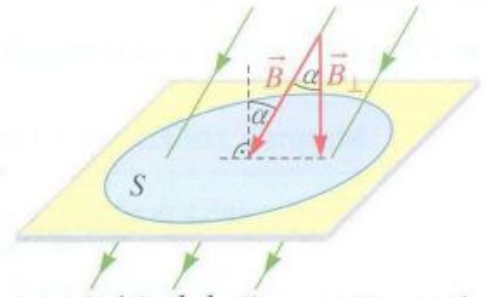


Podstawowe pojęcia

- ▶ **Strumień indukcji magnetycznej** Φ przez powierzchnię S

$$\Phi = BS \cos \alpha = B_{\perp} S$$



gdzie: B – indukcja magnetyczna, S – powierzchnia obejmująca strumień indukcji magnetycznej, α – kąt między kierunkiem wektora \vec{B} a prostą prostopadłą do powierzchni S , B_{\perp} – składowa wektora indukcji magnetycznej prostopadła do powierzchni S .

Ze wzoru wynika, że strumień indukcji magnetycznej jest największy, gdy $\alpha = 0$, czyli gdy wektor indukcji \vec{B} jest prostopadły do powierzchni.

- ▶ Jednostką strumienia indukcji magnetycznej jest **weber**: $[\Phi] = \text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2$.
- ▶ **Indukcja elektromagnetyczna** – zjawisko powstawania siły elektromotorycznej w obwodzie pod wpływem zmian strumienia pola magnetycznego przenikającego obwód.
- ▶ **Prąd indukcyjny** – prąd wzbudzony w wyniku zjawiska indukcji elektromagnetycznej.

Prawo Faradaya, reguła Lenza

■ **Prawo Faradaya** – na skutek zmian strumienia magnetycznego przechodzącego przez powierzchnię ograniczoną pętlą z przewodnika indukuje się w przewodniku siła elektromotoryczna. Indukowana siła elektromotoryczna jest tym większa, im szybciej następują te zmiany.

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

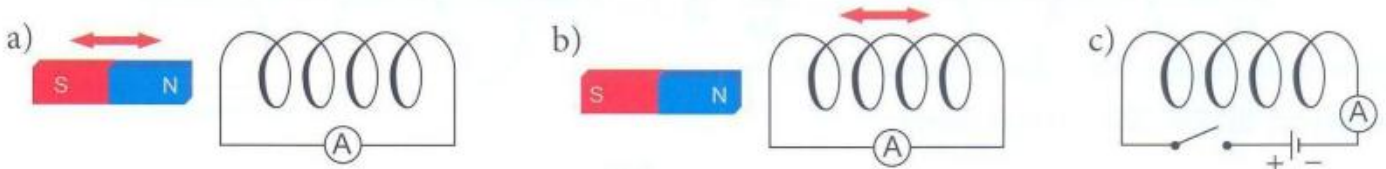
gdzie: $\Delta \Phi$ – zmiana strumienia indukcji magnetycznej, Δt – czas, w którym ta zmiana zaszła.

Pamiętaj, że linie pola magnetycznego mają określony zwrot i w zależności od tego, w którą stronę przechodzą przez daną powierzchnię, wartość strumienia indukcji magnetycznej może być dodatnia lub ujemna.

Kiedy zmienia się strumień indukcji?

Zmiany strumienia indukcji magnetycznej mogą zachodzić z różnych powodów. Ich przyczyną może być ruch magnesu (rys. a) lub zwojnicy (rys. b), czyli ogólnie – z racji względności ruchu – ruch magnesu względem zwojnicy.

Pole magnetyczne możemy wytwarzać także za pomocą zwojnicy lub elektromagnesu, zmieniając napięcie zasilające (np. włączając i wyłączając zasilanie – rys. c). Nie musimy wówczas poruszać elementami układu. Faraday odkrył zjawisko indukcji właśnie w tym ostatnim przypadku.



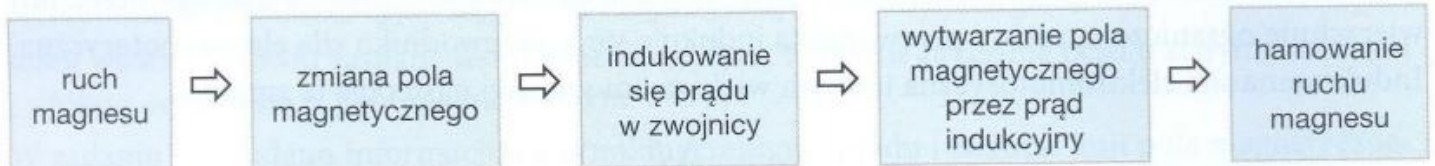
■ **Reguła Lenza** – kierunek przepływu prądu indukcyjnego jest taki, że wytwarzane przez niego pole magnetyczne przeciwdziała przyczynie, która ten prąd wywołuje. Reguła Lenza wynika z zasady zachowania energii.

► **Przykład zastosowania reguły Lenza**

Magnes zbliża się do zwojnicy	Magnes oddala się od zwojnicy
w zwojnicy prąd płynie w taką stronę, aby wytworzone przez niego pole magnetyczne	
odpychało magnes	przyciągało magnes

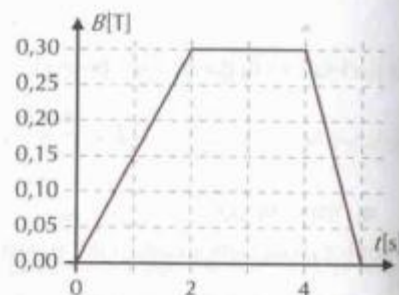
Gdyby pole wytwarzane przez prąd w zwojnicy powodowało dalsze nabieranie prędkości przez magnes, jego energia kinetyczna rosłaby w nieskończoność bez zasilania, mielibyśmy więc do czynienia z *perpetuum mobile*. Podczas hamowania magnesu jego energia kinetyczna nie znika, ale zamienia się w energię elektryczną prądu indukcyjnego, która z kolei zostaje rozproszona na skutek oporu elektrycznego w zwojnicy.

► Opisane w tabeli zmiany można przedstawić za pomocą diagramu, na którym strzałki wskazują zależności przyczynowo-skutkowe, a nie następstwo w czasie, gdyż wszystkie opisane zjawiska zachodzą równocześnie.



■ **11.5.** Wykonana z drutu prostokątna ramka o polu powierzchni $S = 0,03 \text{ m}^2$ znajduje się w polu magnetycznym, którego linie indukcji są prostopadłe

do powierzchni ramki. Wartość indukcji magnetycznej B zmienia się w czasie tak, jak pokazano na rysunku 11.2. Narysuj wykres zmian siły elektromotorycznej indukującej się w ramce.



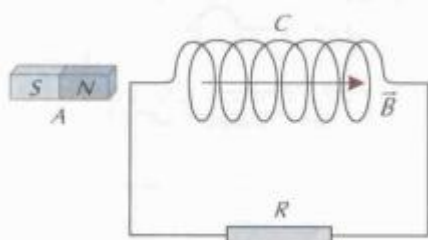
Rysunek 11.2.

■ **11.6.** Owalna ramka z drutu, której powierzchnia jest równa $S = 2,5 \text{ cm}^2$, znajduje się w jednorodnym polu magnetycznym, którego linie są prostopadłe do powierzchni ramki. Oblicz siłę elektromotoryczną \mathcal{E} indukującą się w ramce w czasie $\Delta t = 0,1 \text{ s}$, kiedy wartość indukcji tego pola maleje w sposób równomierny od $B_1 = 1 \text{ T}$ do $B_2 = 0,5 \text{ T}$.

■ **11.7.** Okrągła ramka o promieniu r wykonana z drutu o polu przekroju poprzecznego S i oporności właściwej ρ jest umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji o wartości B tak, że linie pola są prostopadłe do powierzchni ramki. Jaki ładunek elektryczny Q przepłynie przez tę ramkę, jeżeli zwrot wektora indukcji zmieni się na przeciwny?

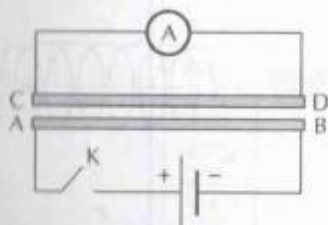
■ **11.11.** W jaki sposób należy poruszać magnesem A w stosunku do cewki indukcyjnej C , aby pole magnetyczne indukowane w cewce było skierowane tak jak na rysunku 11.4.?

- nie trzeba w ogóle poruszać magnesem
- trzeba zbliżać magnes do cewki
- trzeba oddalać magnes od cewki
- magnes należy na przemian zbliżać i oddalać



Rysunek 11.4.

■ **11.13.** Na podstawie rysunku 11.6. określ kierunek przepływu prądu indukcyjnego w przewodzie CD tuż po zamknięciu klucza K. Odcinki AB i CD to dwa długie przewody ułożone równoległe w niewielkiej odległości.



Rysunek 11.6.

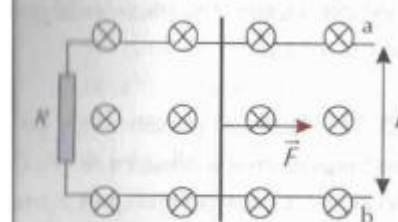
■ **11.17.** Z jaką stałą prędkością powinien poruszać się przewodnik długości $l = 1$ m w polu magnetycznym o indukcji o wartości $B = 0,5$ T pod kątem $\alpha = 30^\circ$ do kierunku linii pola magnetycznego, aby indukowała się w nim SEM o wartości $\mathcal{E} = 2$ V?

■ **11.8.** Jaki strumień magnetyczny Φ przenika w chwili początkowej przez cewkę indukcyjną, jeżeli podczas równomiernego zmniejszania się indukcji pola magnetycznego do zera w czasie $t = 0,05$ s w cewce indukuje się SEM o wartości $\mathcal{E} = 10$ V?

■ **11.12.** Na rysunku 11.5. przedstawiono układ, w którym po dwu równoległych przewodach a i b, połączonych z jednej strony opornikiem o oporności $R = 4 \Omega$, porusza się metalowa poprzeczka o długości $l = 0,5$ m. Układ znajduje się w jednorodnym polu

■ **11.9.** Kwadratowa ramka o boku $a = 8$ cm znajduje się w jednorodnym polu magnetycznym tak, że prosta prostopadła do powierzchni ramki tworzy z wektorem \vec{B} kąt $\alpha = 60^\circ$. Jaka była wartość początkowa indukcji tego pola, jeżeli przy równomiernym zmniejszaniu się wartości indukcji do 0 w czasie $\Delta t = 0,02$ s w ramce indukuje się SEM o wartości $\mathcal{E} = 64$ mV?

magnetycznym o indukcji o wartości $B = 1$ T i liniach skierowanych jak pokazano na rysunku. Jaką siłą należy działać na poprzeczkę, aby poruszała się ze stałą szybkością $v = 0,5 \frac{m}{s}$, jeżeli oporność poprzeczki jest równa $R_0 = 1 \Omega$?



Rysunek 11.5.

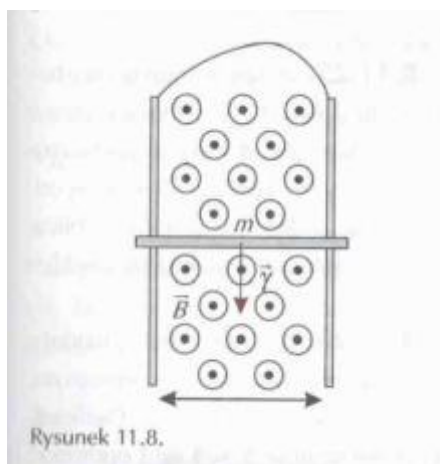
■ **11.15.** Odcinek przewodu porusza się w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji o wartości $B = 0,4$ T prostopadłe do linii tego pola ze stałą szybkością $v = 20 \frac{m}{s}$. Jaką długość l ma ten przewód, jeśli na jego końcach indukuje się SEM o wartości $\mathcal{E} = 6$ V?

■ **11.16.** Metalowy pręt długości $l = 0,5$ m wiruje z częstotliwością $n = 50 \frac{obr}{s}$ w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji o wartości $B = 0,2$ T, względem osi przechodzącej przez jeden z jego końców, równoległej do linii indukcji magnetycznej i prostopadłej do pręta. Jaka siła elektromotoryczna \mathcal{E} indukuje się w tym pręcie?

■ **11.18.** Samolot odrzutowy o rozpiętości skrzydeł $l = 50$ m leci poziomo z szybkością $v = 200 \frac{m}{s}$. Jaka jest różnica potencjałów indukowanych między końcami jego skrzydeł, jeżeli pionowa składowa pola magnetycznego na

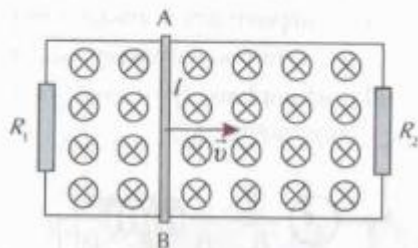
wysokości lotu samolotu ma indukcję o wartości $B = 5 \cdot 10^{-3}$ T?

■ **11.19.** Po dwu pionowych metalowych prętach ustawionych równoległe i połączonych przewodem, zsuwa się bez tarcia drut o długości $l = 0,25$ m i masie $m = 10$ g. Układ umieszczony jest w stałym polu magnetycznym o indukcji o wartości $B = 0,02$ T, którego linie skierowane są prostopadle do płaszczyzny wyznaczonej przez pręty (rysunek 11.8.). Jaką oporność ma drut, jeżeli zsuwa się on ze stałą szybkością $v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bez utraty kontaktu z prętami? Oporności prętów i łączącego je przewodu można pominąć.



Rysunek 11.8.

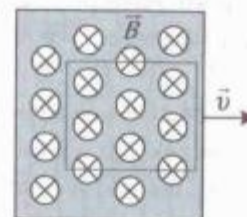
do płaszczyzny układu. Po przewodach łączących oporniki porusza się ze stałą szybkością $v = 25 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ metalowy pręt o oporności $R = 1 \Omega$. Oblicz natężenie prądu płynącego przez pręt AB o długości $l = 20$ cm.



Rysunek 11.9.

■ **11.20.** Dwa oporniki o opornościach $R_1 = 4 \Omega$ i $R_2 = 12 \Omega$, połączone przewodami tak jak na rysunku 11.9., znajdują się w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji o wartości $B = 360$ mT, którego linie są prostopadle

■ **11.21.** Kwadratowa ramka z drutu o boku $a = 5$ cm i oporności $R = 0,5 \Omega$ znajduje się w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji o wartości $B = 0,25$ T (rysunek 11.10.). Jaki prąd popłynie przez ramkę, jeżeli wyciągniemy ją z tego pola ruchem jednostajnym z szybkością $v = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$?



Rysunek 11.10.

Samoodukcja i indukcja wzajemna

► **Samoodukcja** (indukcja własna) – zjawisko indukowania się siły elektromotorycznej w tym samym obwodzie, w którym płynie prąd wywołujący indukcję.

► **Siła elektromotoryczna samoodukcji**

$$\mathcal{E} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t}$$

Jednostką siły elektromotorycznej są wolty.

gdzie: L – indukcyjność zwojnicy, ΔI – zmiana natężenia prądu, która nastąpiła w przedziale czasu Δt .

► **Indukcyjność zwojnicy** – parametr określający zdolność zwojnicy do wytwarzania strumienia indukcji magnetycznej w wyniku przepływającego przez nią prądu.

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 n^2 S}{l}$$

gdzie: μ_r – względna przenikalność magnetyczna substancji, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, n – liczba zwojów, S – pole powierzchni objętej pojedynczą pętlą zwojnicy, l – długość zwojnicy.

► Jednostką indukcyjności jest **henr**: $[L] = \text{H} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$.

► **Energia pola magnetycznego** zgromadzona w cewce indukcyjnej

$$E_{\text{ind}} = \frac{1}{2} LI^2$$

► **Indukcja wzajemna** – zjawisko indukowania siły elektromotorycznej w zwojnicy, w wyniku zmian natężenia prądu płynącego przez inną zwojnicę, możemy zilustrować za pomocą schematu:

zmiana natężenia prądu w pierwszej cewce



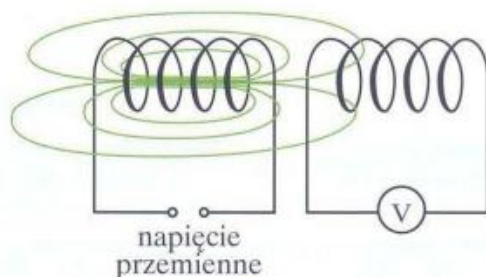
zmiana strumienia pola magnetycznego wytwarzanego przez pierwszą cewkę



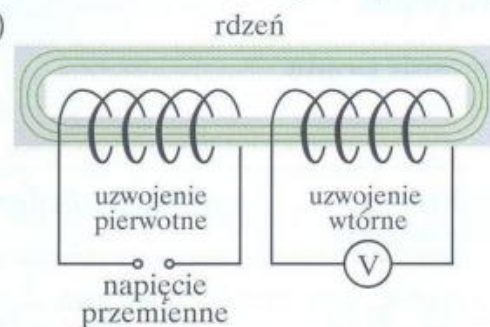
indukowanie się SEM w drugiej cewce

Cewki mogą nie mieć rdzenia (rys. a) lub mieć wspólny rdzeń z ferromagnetyka (rys. b).

a)

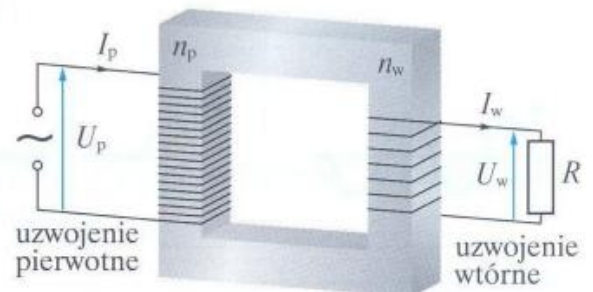


b)



Zastosowanie rdzenia powoduje, że linie pola magnetycznego nie rozchodzą się w przestrzeni, ale tworzą zamknięte pętle wewnątrz rdzenia.

► **Transformator** – urządzenie zbudowane z dwóch cewek nawiniętych na wspólny ferromagnetyczny rdzeń służące do przenoszenia energii z jednego obwodu do drugiego. Cewka podłączona do źródła napięcia to uzwojenie pierwotne, a cewka, w której indukuje się SEM – wtórne.



► **Równanie transformatora**

$$\frac{U_w}{U_p} = \frac{n_w}{n_p} = \frac{I_p}{I_w}$$

gdzie: U_w – napięcie na uzwojeniu wtórnym, U_p – napięcie na uzwojeniu pierwotnym, n_w – liczba zwojów uzwojenia wtórnego, n_p – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, I_p – natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym, I_w – natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym.

► **Przekładnia transformatora k**

$$k = \frac{n_p}{n_w}$$

Jeżeli $n_w > n_p$ ($k < 1$), to transformator podwyższa napięcie, a jeżeli $n_w < n_p$ ($k > 1$), to transformator obniża napięcie.

► **Sprawność transformatora**

$$\eta = \frac{P_w}{P_p}$$

gdzie: P_w – moc w uzwojeniu wtórnym, P_p – moc w uzwojeniu pierwotnym.

► Jeżeli założymy, że nie ma żadnych strat energii, to moc w uzwojeniu pierwotnym jest równa mocy w uzwojeniu wtórnym:

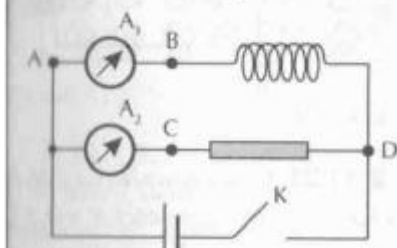
$$P_p = P_w, \quad \text{czyli} \quad I_p U_p = I_w U_w.$$

W rzeczywistości część energii jest tracona na ogrzanie uzwojeń, nagrzanie rdzenia przez prądy wirowe oraz rozproszenie strumienia indukcji, dlatego:

$$P_p > P_w, \quad \text{czyli} \quad I_p U_p > I_w U_w.$$

c-C-D. Jakie natężenia prądów wskażą miliamperomierze **tuż po** włączeniu lucza K?

- a) wskażą identyczne wartości
- b) miliamperomierz A_1 wskaże większą wartość niż miliamperomierz A_2
- c) miliamperomierz A_1 wskaże mniejszą wartość niż miliamperomierz A_2
- d) prąd popłynie tylko przez miliamperomierz A_2



■ 11.23. Jaka wartość ma współczynnik samoindukcji pętliki z drutu, która obejmuje strumień magnetyczny $\Phi = 12 \mu\text{Wb}$, jeżeli przez pętlicę płynie prąd o natężeniu $I = 6 \text{ A}$?

■ 11.24. Do cewki indukcyjnej pola przekroju poprzecznego $S = 10 \text{ cm}^2$, mającej $n = 400$ zwojów drutu, dołączony jest opornik o oporności $R = 5 \text{ k}\Omega$. Cewka jest umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji o wartości $B = 25 \text{ mT}$, którego linie nie są równoległe do osi cewki. Jaki ładunek elektryczny przepłynie przez opornik, jeżeli cewkę obrócimy o kąt

$\alpha = 180^\circ$ względem prostej prostopadłej do osi cewki?

■ 11.25. Jaka wartość ma współczynnik samoindukcji L cewki, jeżeli po wyłączeniu zasilania natężenie prądu płynącego przez nią maleje od $I_1 = 2,40 \text{ A}$ do $I_2 = 2,35 \text{ A}$ w czasie $\Delta t = 0,072 \text{ s}$, a SEM samoindukcji ma w tym czasie średnią wartość $\mathcal{E} = 0,15 \text{ V}$?

■ 11.26. Elektromagnes o współczynniku samoindukcji $L = 10 \text{ H}$ dołączony jest do źródła SEM. Oblicz SEM samoindukcji w chwili po przerwaniu obwodu, jeżeli natężenie prądu maleje z szybkością $a = 500 \frac{\text{A}}{\text{s}}$.

■ 11.27. Wskutek zmiany natężenia prądu o $\Delta I = 12 \text{ A}$, płynącego przez cewkę indukcyjną, strumień magnetyczny przenikający cewkę równoległe do jej osi zmienił się o $\Delta\Phi = 1,2 \text{ mWb}$. Oblicz współczynnik samoindukcji tej cewki.

■ 11.28. Pierścień z drutu znajduje się w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji o wartości $B = 0,2 \text{ T}$. Pierścień ma powierzchnię $S = 1 \text{ m}^2$ i oporność $R = 4 \Omega$. Płaszczyzna pierścienia jest prostopadła do linii pola magnetycznego. O jaki kąt α należy obrócić pierścień względem osi przechodzącej przez jego średnicę, aby przez pierścień przepłynął ładunek $Q = 0,05 \text{ C}$?