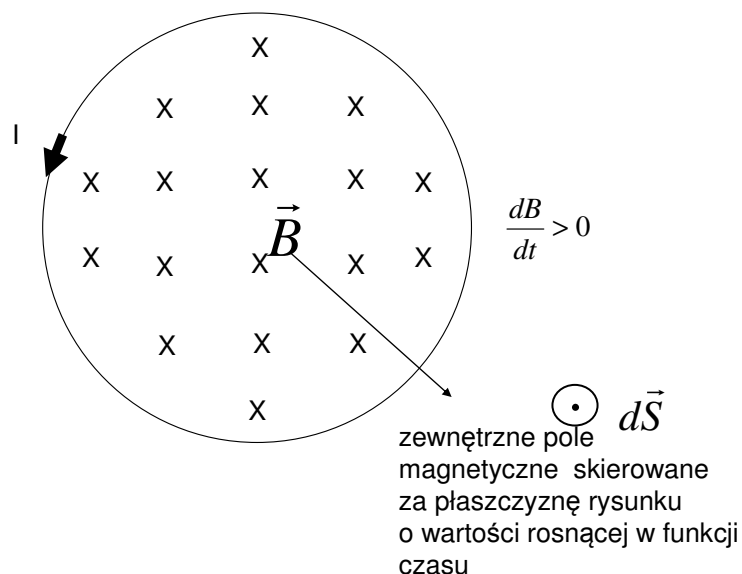


Indukcja elektromagnetyczna
Samoindukcja i indukacja wzajemna
Gęstość energii pola magnetycznego

Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya



$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

$$\phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

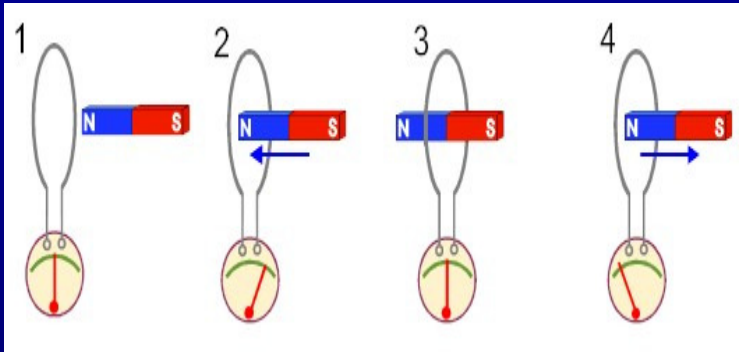
$$I = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R}$$

W zamkniętym obwodzie elektrycznym indukuje się siła elektromotoryczna o wartości proporcjonalnej do szybkości zmian strumienia pola magnetycznego ϕ_B przenikającego przez powierzchnię rozpiętą na tym obwodzie, która powoduje przepływ prądu elektrycznego indukcji. Kierunek przepływu prądu jest taki iż zgodnie z **regułą przekory Lenza** pole magnetyczne wytworzone przez ten prąd przeciwdziała zmianie strumienia pola magnetycznego, która go wywołuje (w przykładzie pokazanym na rysunku ma kierunek przeciwny do kierunku indukcji pola \vec{B} i dąży do spowolnienia szybkości przyrostu wektora indukcji pola)

Indukcja elektromagnetyczna

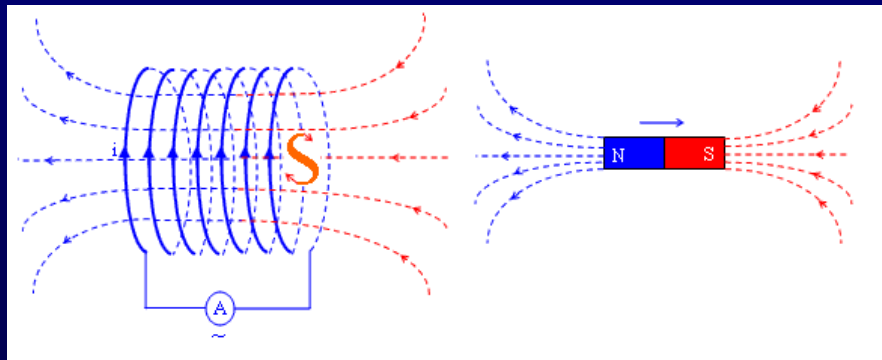
Zmiana strumienia pola magnetycznego może być wywołana poprzez

- 1) zmiany wartości indukcji pola
- 2) zmianę kąta jaki tworzą linie indukcji pola z powierzchnią obwodu.
- 3) zmiany powierzchni obwodu obejmującego strumień



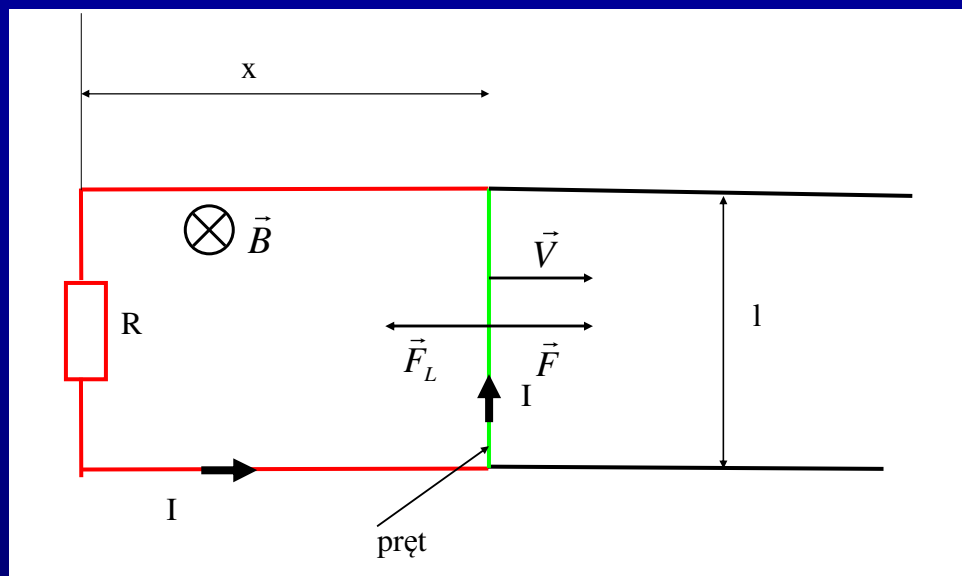
Zbliżanie magnesu do pętli z przewodnika powoduje wzrost indukcji pola co prowadzi do wzrostu strumienia pola przenikającego przez zwoje solenoidu i wywołanie przepływu prądu generującego pole o zwrocie wektora indukcji takim, iż wnosi ono wkład o przeciwnym znaku do strumienia. Prowadzi to do obniżenia szybkości wzrostu strumienia pola przenikającego przez zwoje solenoidu

Zmiana kierunku ruchu magnesu wywołuje zmianę kierunku prądu indukowanego, którego pole ma wówczas zwrot przeciwny do powstałego przy zbliżaniu magnesu



Jednocześnie na magnes działa siła przeciwdziałająca jego ruchowi.

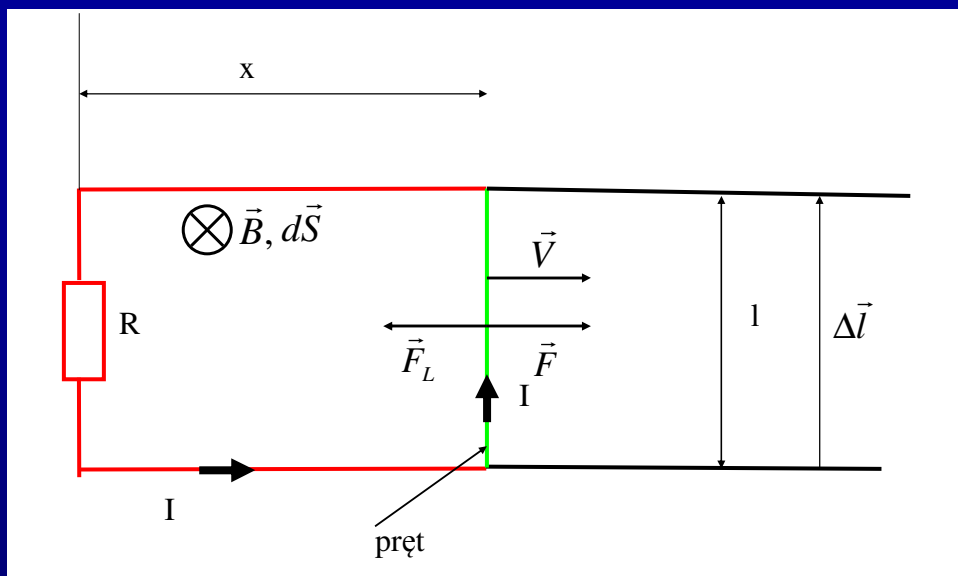
Indukcja elektromagnetyczna



W sytuacji pokazanej na rysunku następuje przesuwanie zielonego pręta w prawo, co powoduje wzrost powierzchni obwodu elektrycznego (oznaczonego na czerwono i zielono) i wzrost strumienia pola magnetycznego przenikającego przez obwód. To wywołuje powstanie siły elektromotorycznej i przepływ prądu w obwodzie.

Jednocześnie na pręt przez który płynie prąd w polu magnetycznym działa siła Lorentza \vec{F}_L , które przeciwdziała ruchowi pręta w prawo, co jest przejawem reguły przekory Lenza. W celu przesuwu pręta w prawo niezbędne jest przyłożenie siły \vec{F} , która wykonuje pracę, która jest zamieniana na energię cieplną wydzielaną na oporniku wchodzącym w skład obwodu elektrycznego.

Indukcja elektromagnetyczna



Strumień pola magnetycznego

$$\phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = BS = Blx$$

Siła elektromotoryczna indukcji

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\phi_B}{dt} = -Bl \frac{dx}{dt} = -Bl|\vec{V}|$$

Natężenie prądu

$$I = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R} = \frac{Bl|\vec{V}|}{R}$$

Wartość siły Lorentza

$$|\vec{F}_L| = BIl \sin(90^\circ) = BIl = \frac{B^2 l^2 |\vec{V}|}{R}$$

Wartość siły zewnętrznej równoważącej siłę Lorentza dzięki której możliwy jest ruch jednostajny pręta

$$\vec{F} = -\vec{F}_L$$

$$\vec{F}_L = I\vec{l} \times \vec{B}$$

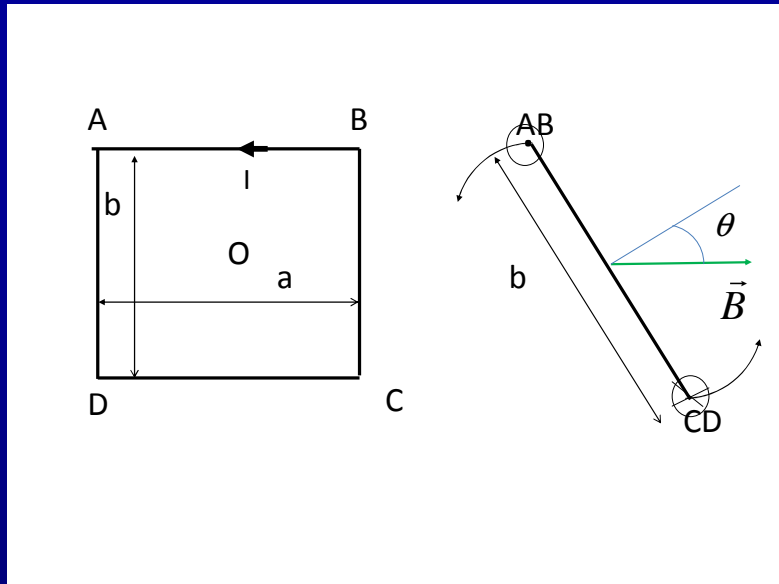
$$|\vec{F}| = \frac{B^2 l^2 |\vec{V}|}{R}$$

Energia wydzielona w czasie Δt na oporniku

$$W = I^2 R \Delta t = \frac{B^2 l^2 V^2}{R} \Delta t$$

równa pracy siły zewnętrznej

$$W = |\vec{F}| \Delta x = \frac{B^2 l^2 |\vec{V}|}{R} |\vec{V}| \Delta t = \frac{B^2 l^2 V^2}{R} \Delta t$$



Zmiana strumienia pola magnetycznego a zatem i siła elektromotoryczna indukcji \mathcal{E}_i oraz prąd płynący przez obwód I mogą być wywołane także przez zmianę kąta jaki tworzą linie indukcji pola z prostą prostopadłą do powierzchni obwodu.

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = Bab \cos(\theta)$$

Ramka obraca się ze stałą prędkością kątową o wartości ω

$$\theta = \omega t$$

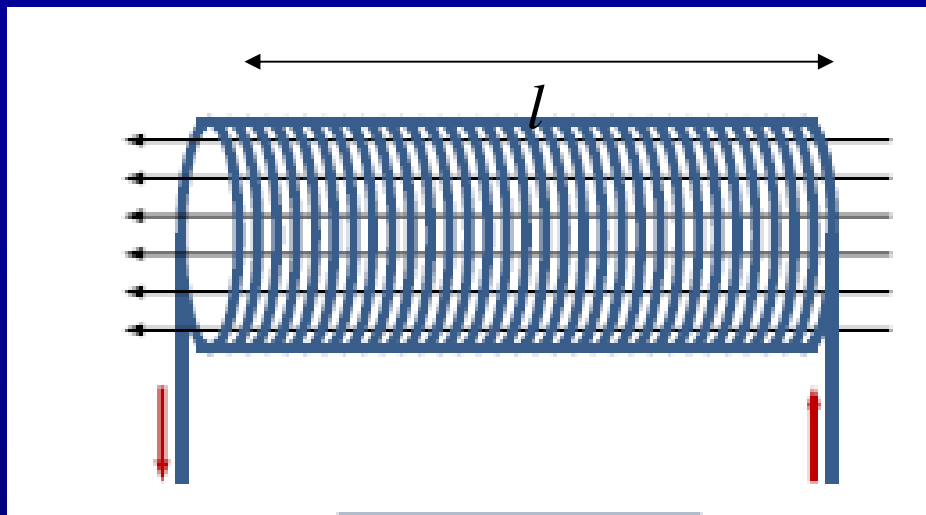
Na omawianym zjawisku może być oparte działanie generatorów prądu zmiennego

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

$$\mathcal{E}_i = -Bab \frac{d \cos(\omega t)}{dt} = Bab \omega \sin(\omega t)$$

$$I = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R} = \frac{Bab \omega \sin(\omega t)}{R}$$

Obliczanie indukcyjności cewki, samoindukcja



Samoindukcja –pojawienie się siły elektromotorycznej indukcji w cewce na skutek zmiany natężenia prądu płynącego przez cewkę

Wartość indukcji pola w cewce wywołanego przez płynący prąd o natężeniu I

$$B = \frac{N}{l} \mu_0 I$$

Strumień indukcji pola przenikający przez N zwojów

$$\Phi_B = N \phi_B = NBS = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} I$$

Siła elektromotoryczna indukcji (samoindukcji) SEM wywołana przez zmianę natężenia prądu płynącego przez solenoid

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d\phi_B}{dt} = - \frac{N^2 \mu_0 S}{l} \frac{dI}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

Indukcyjność cewki

$$L = - \frac{\varepsilon_i}{\frac{dI}{dt}} = \frac{\Phi_B}{I} = \frac{N^2 \mu_0 S}{l}$$

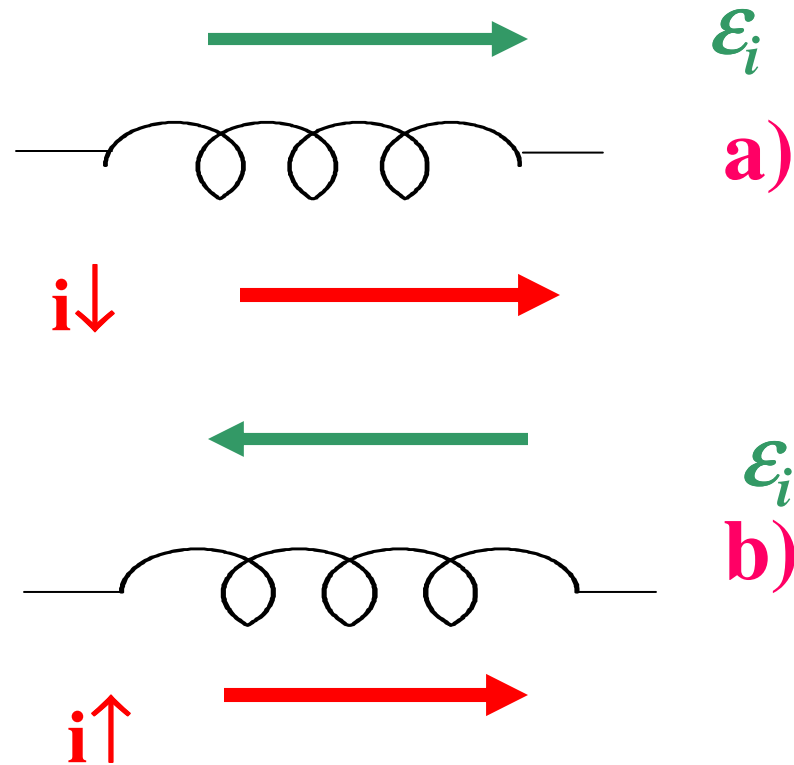
Jednostką indukcyjności jest henr

$$H = T \cdot m^2 / A = V \cdot s / A = \Omega \cdot s$$

Zwrot siły elektromotorycznej indukcji jest taki, iż przeciwdziała ona zmianie która ją wywołuje (gdy natężenie prądu rośnie spowalnia jego wzrost, gdy natężenie prądu maleje, opóźnia szybkość spadku natężenia prądu)

Kierunek SEM można otrzymać z reguły Lenza.

Wyobraźmy sobie, że nawinęliśmy cewkę. Zauważamy różne kierunki siły elektromotorycznej ε_i .



W przewodzie a) prąd maleje, a w przewodzie b) rośnie.

ε_i - siła elektromotoryczna w obu przypadkach przeciwdziała zmianie prądu.

Obwód RL R

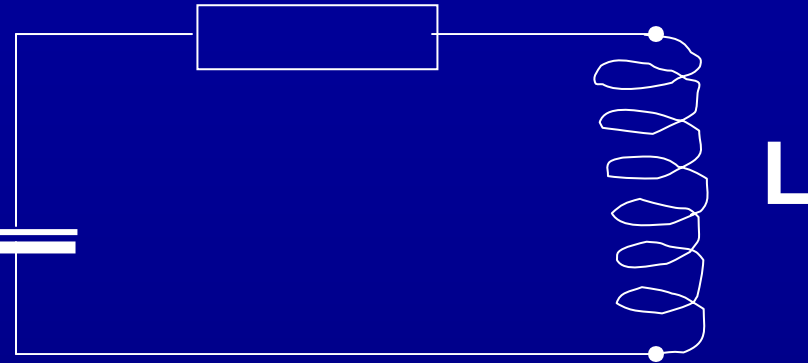
Z II Prawa Kirchoffa

$$\mathcal{E} + \mathcal{E}_i - IR = 0$$

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt}$$



$$\mathcal{E}$$



$$L \frac{dI}{dt} + IR = \mathcal{E}$$

Zakładamy iż $I(t=0) = 0$

Rozwiązanie równania różniczkowego

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

gdzie

$$\tau = \frac{L}{R}$$

stała czasowa

Moc czerpana ze źródła siły elektromotorycznej zewnętrznej

$$LI \frac{dI}{dt} + I^2 R = I\mathcal{E}$$

Moc tracona w postaci energii cieplnej na oporniku

Energia pola magnetycznego cewki

Szybkość z jaką gromadzi się energia w polu magnetycznym cewki dW_B/dt :

$$dW_B = LI dI$$

$$\frac{dW_B}{dt} = LI \frac{dI}{dt}$$

Energia pola magnetycznego cewki

$$W_B = \int_0^{W_B} dW_B = \int_0^I LI dI = \frac{1}{2} LI^2$$

Gęstość energii pola magnetycznego

Energia pola magnetycznego o indukcji wartości B w cewce w postaci odcinka solenoidu o polu przekroju S , długości l i liczbie zwojów N (Φ_B - strumień indukcji pola przenikający przez N zwojów)

$$W_B = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \frac{\Phi_B}{I} I^2 = \frac{1}{2} NBSI = \frac{1}{2} \frac{B^2 Sl}{\mu_0}$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$



$$I = \frac{Bl}{\mu_0 N}$$



Gęstość energii pola magnetycznego

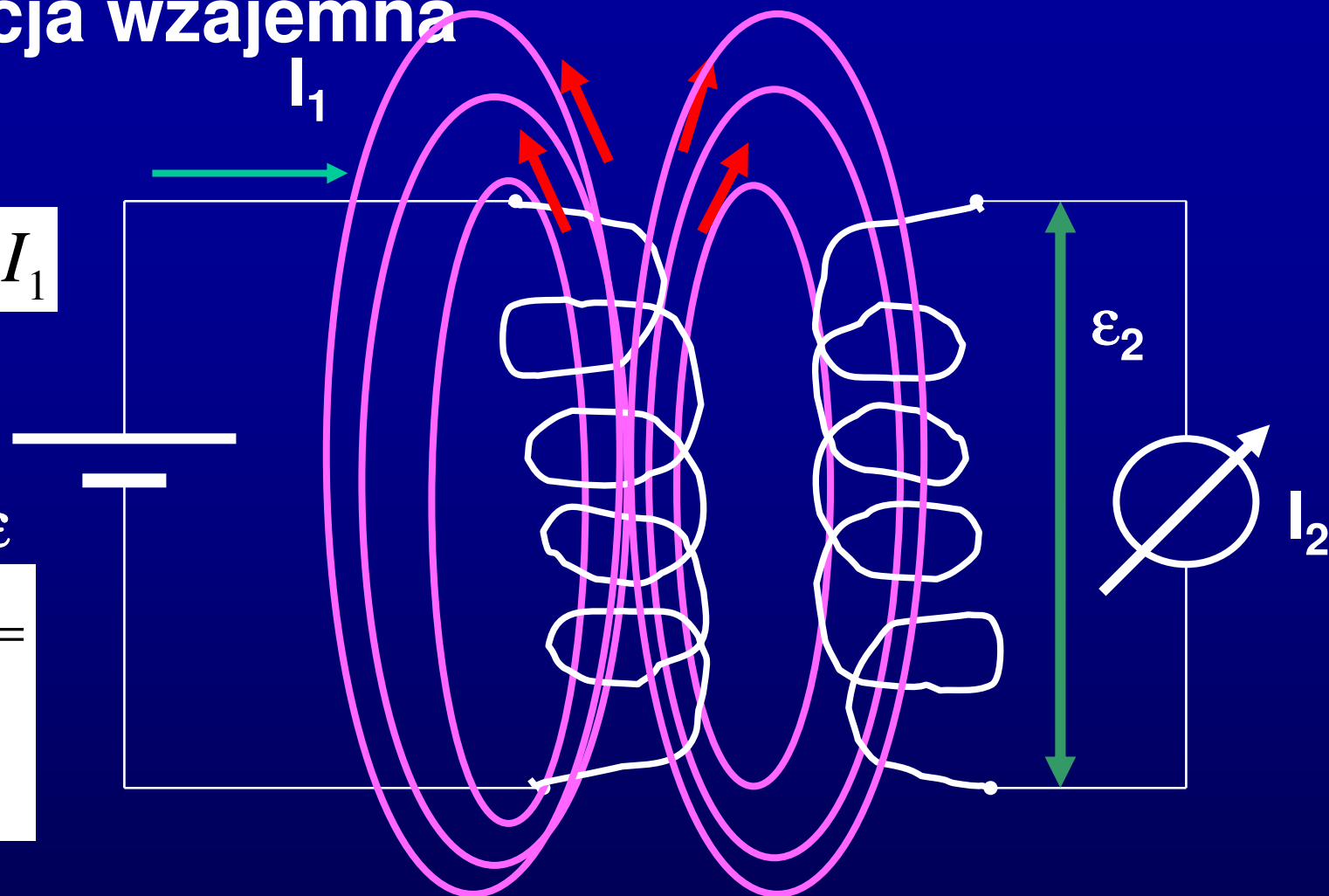
$$w_B = \frac{W_B}{V} = \frac{W_B}{Sl} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

Objętość cewki (w obrębie której zgromadzona jest energia pola)

Indukcja wzajemna

$$\Phi_B = D_{21} I_1$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_2 &= - \frac{d\Phi_B}{dt} = \\ &= -D_{21} \frac{dI_1}{dt} \end{aligned}$$



D_{21} - współczynnik indukcji wzajemnej

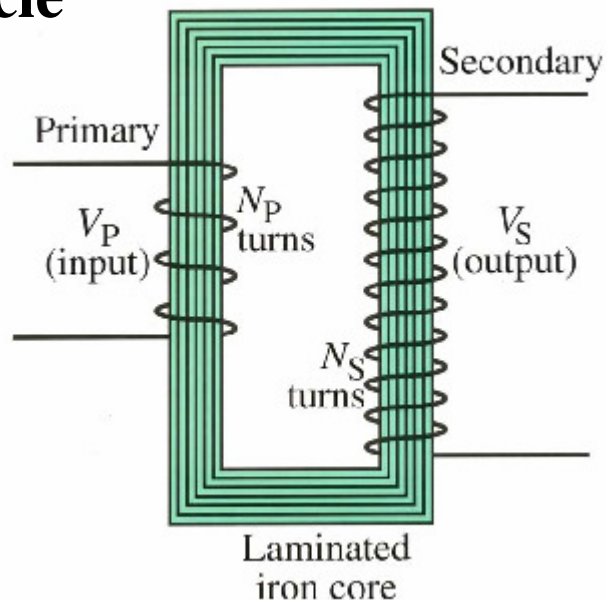
Indukcja wzajemna-powstanie siły indukcji w 2 cewce na skutek zmiany strumienia pola magnetycznego przenikającego przez zwoje 2 cewki wytworzonego przez zmienny w czasie prąd płynący przez 1 cewkę. Na omawianym zjawisku jest oparte działanie transformatora

Wartość współczynnika indukcji wzajemnej D_{21} silnie wzrasta po umieszczeniu pomiędzy zwojami 2 cewki materiału magnetycznego o dużej względnej wartości przenikalności magnetycznej μ_r (*ferromagnetyka*). Umieszczenie materiału ferromagnetycznego w obszarze cewki powoduje wzrost wartości pola w obszarze 2 cewki i siły elektromagnetycznej indukcji μ_r -krotnie.

TRANSFORMATOR

$$N_S > N_P$$

transformator podwyższający
napięcie



$N_S > N_P$ transformator
podwyższający napięcie

$N_S < N_P$ transformator
obniżający napięcie

$$\mathcal{E}_p = N_p \frac{d\phi_B}{dt}$$

$$\mathcal{E}_s = N_s \frac{d\phi_B}{dt}$$

$$\frac{\mathcal{E}_s}{\mathcal{E}_p} = \frac{N_s}{N_p}$$