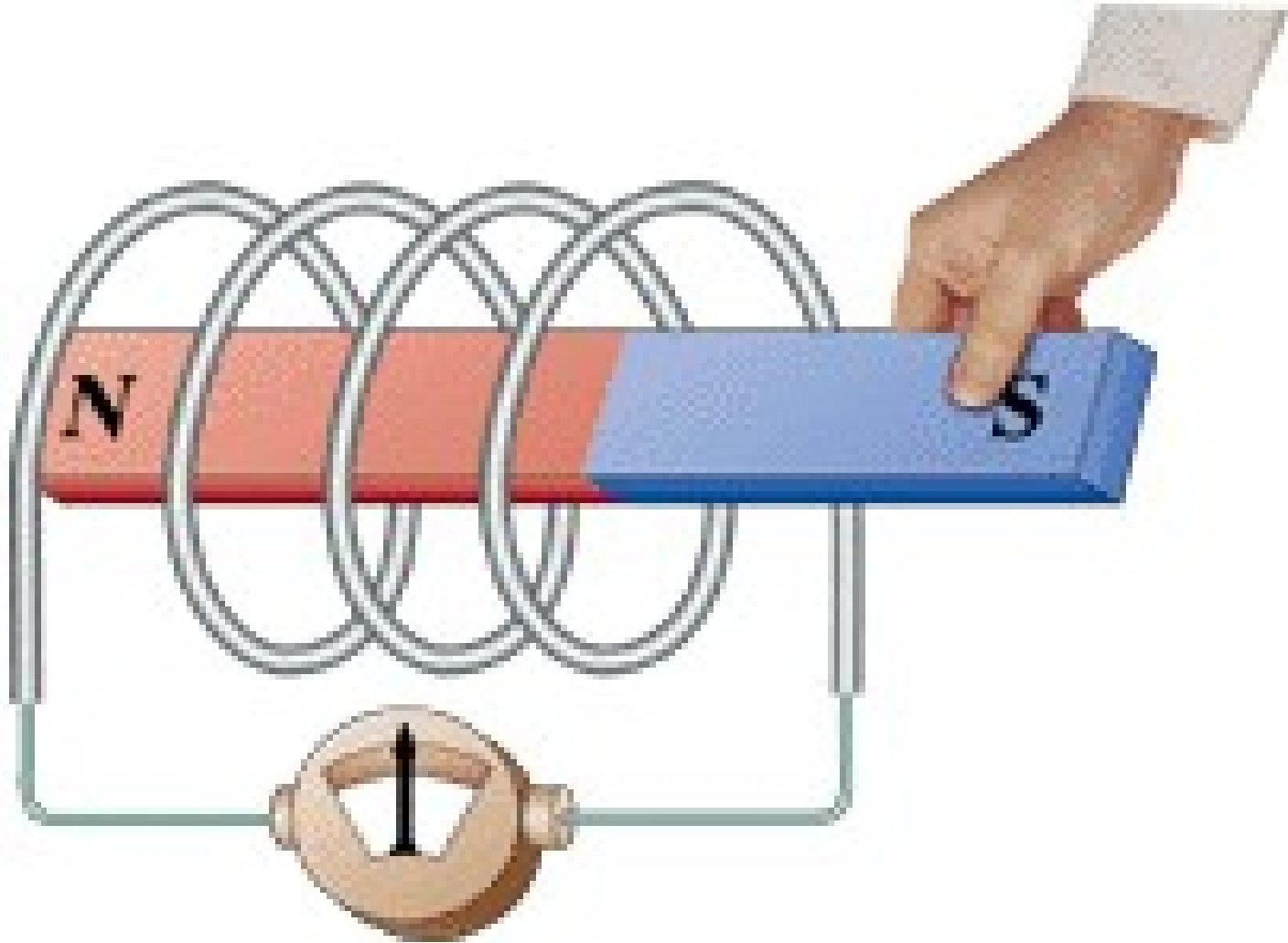


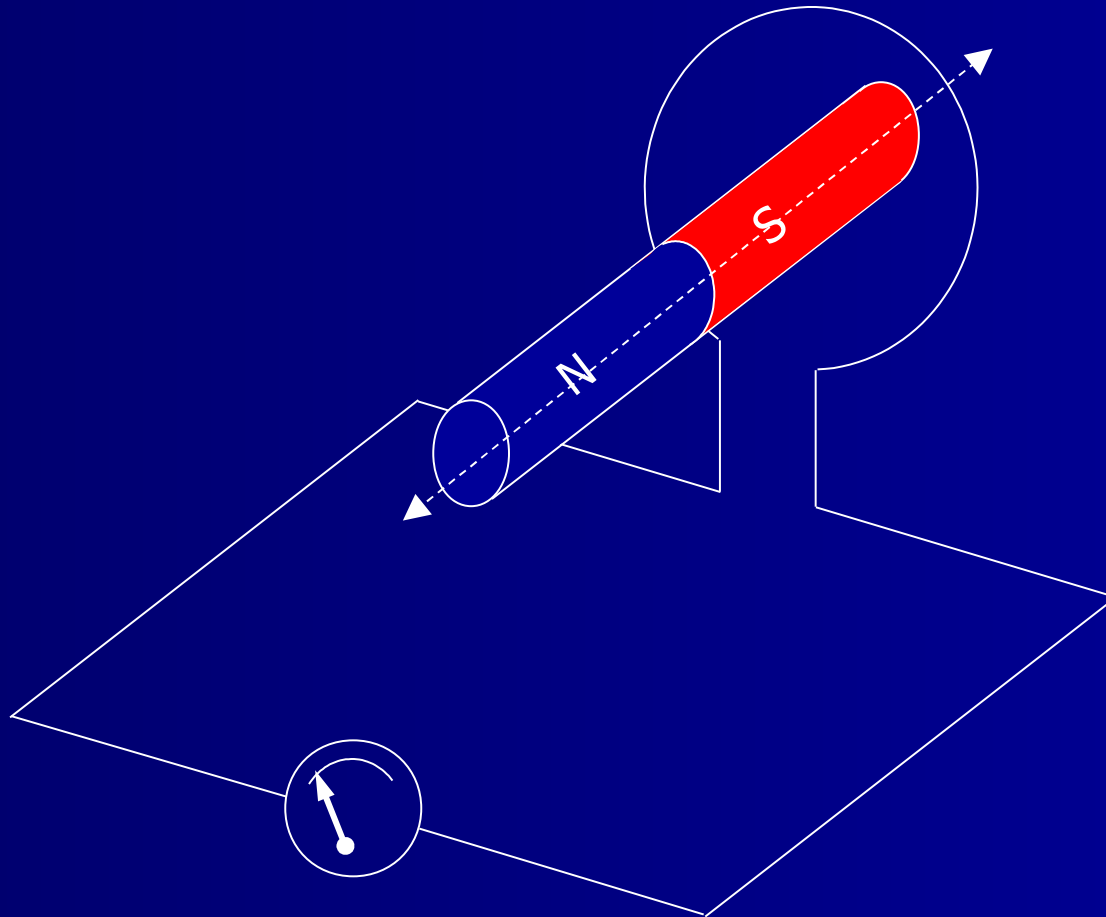
Indukcja elektromagnetyczna

- Siła elektromotoryczna indukcji
- Zmienne pole magnetyczne
- Indukcyjność
- Obwód RL
- Obwód RC
- Obwód RLC

Indukcja elektromagnetyczna



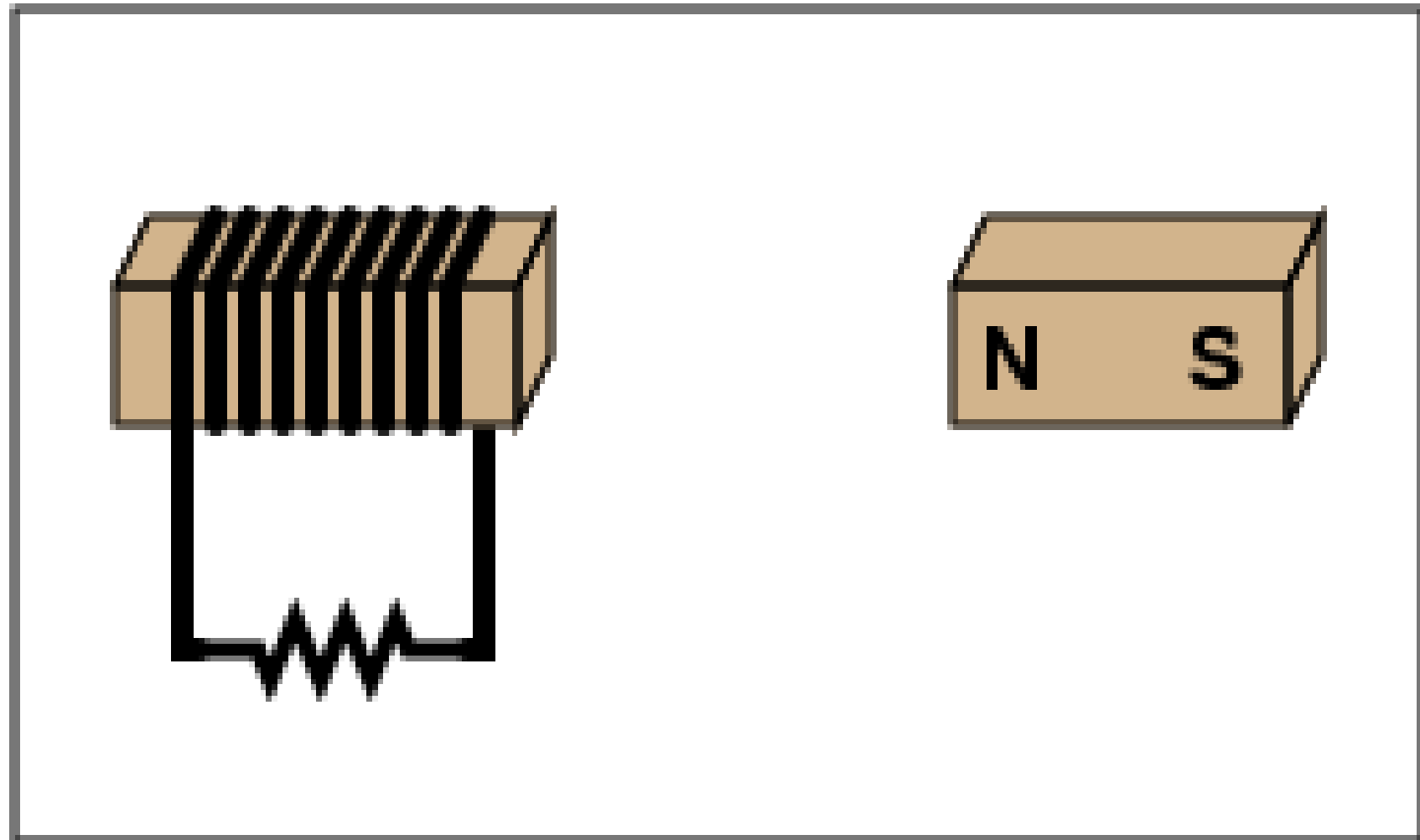
Indukcja elektromagnetyczna



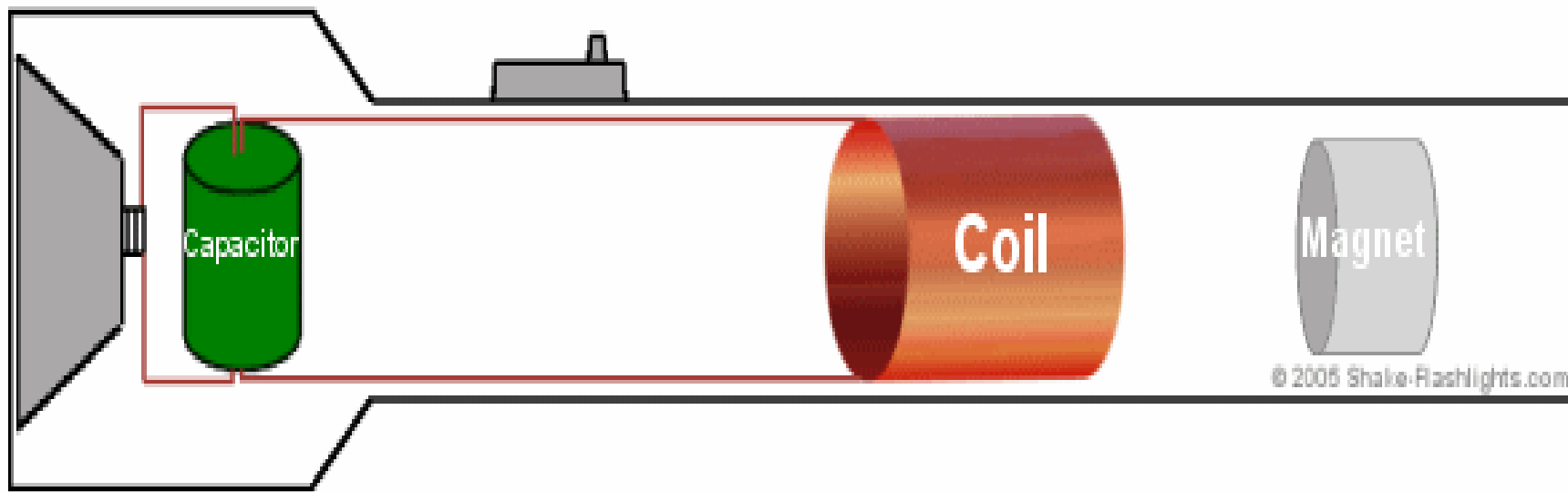
Indukcja elektromagnetyczna

- Wychylenie wskazówki galwanometru zależy od szybkości ruchu magnesu względem zwoju
- Indukowany w obwodzie prąd ma taki kierunek, że pole magnetyczne tego prądu przeciwstawia się zmianie, która go wywołuje

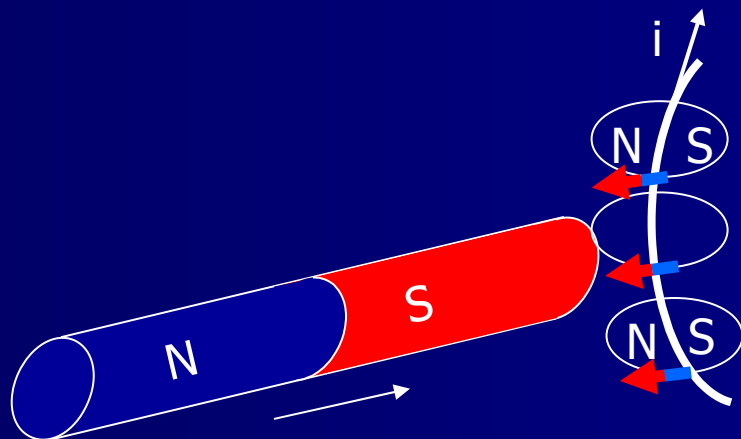
Indukcja elektromagnetyczna



Indukcja elektromagnetyczna



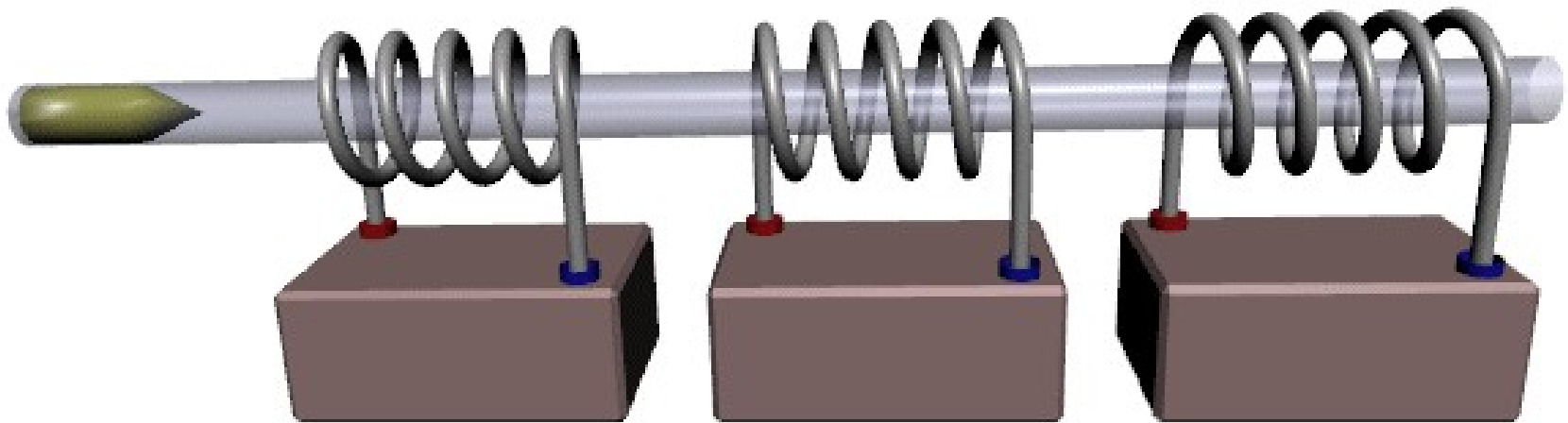
Indukcja elektromagnetyczna



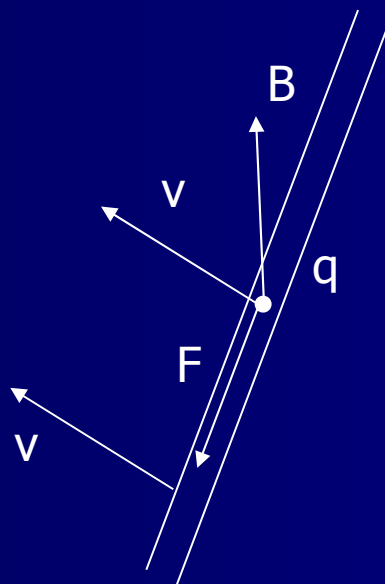
$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\mathcal{E} = - \frac{d(N \bullet \Phi)}{dt}$$

Indukcja elektromagnetyczna



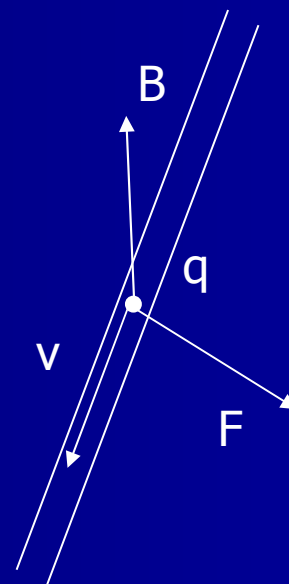
Indukcja elektromagnetyczna



$$F = q \cdot v \times B$$

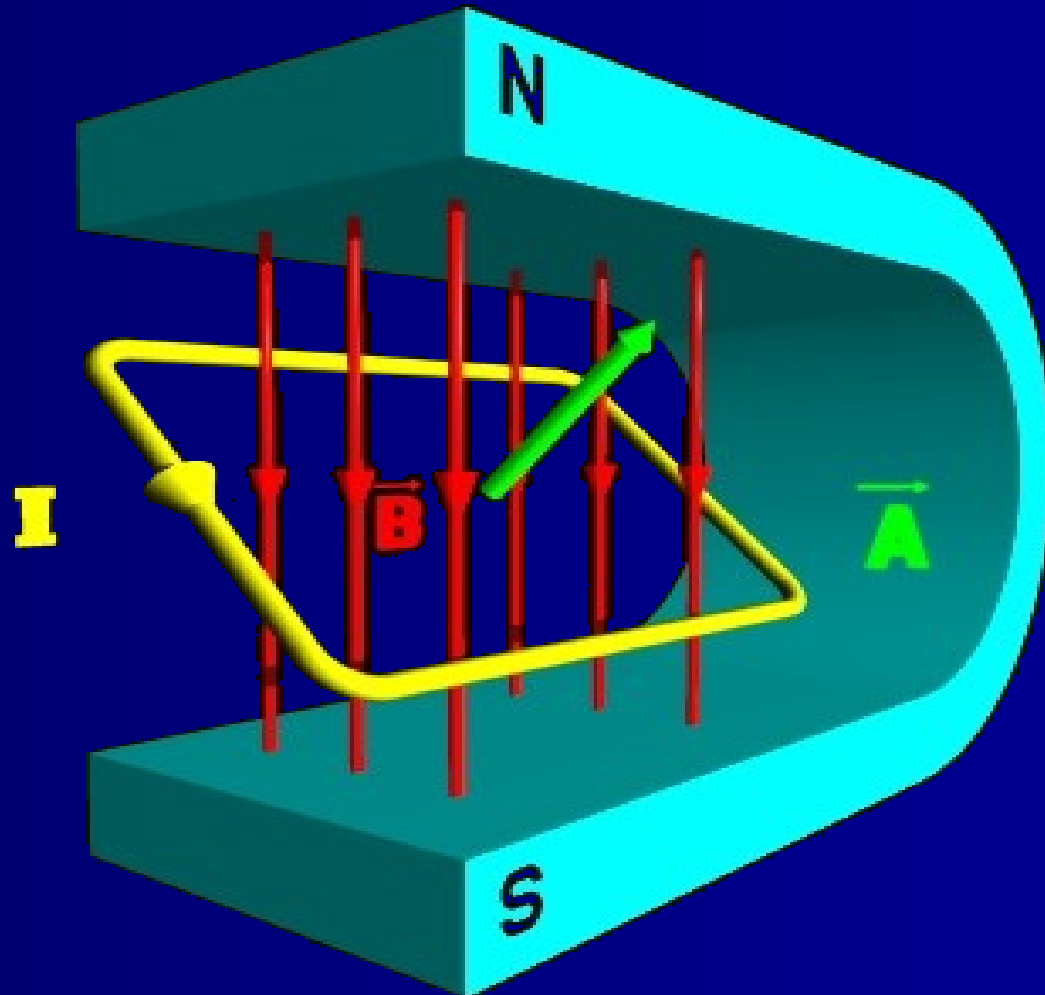
Siła elektromotoryczna indukcji jest konsekwencją siły Lorentza

W poruszającym się z prędkością v przewodniku na ładunek q działa siła Lorentza F

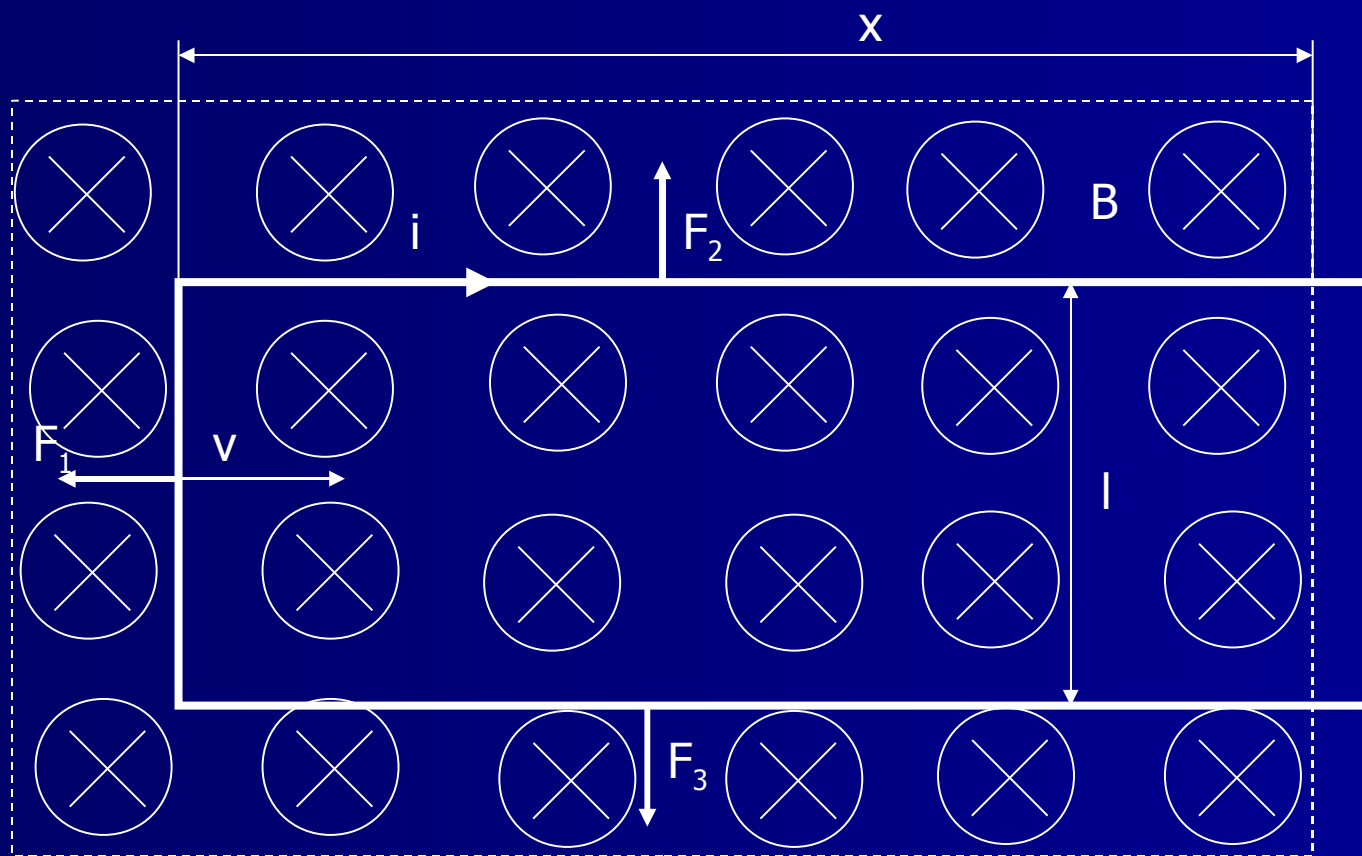


Na poruszającym się z prędkością v ładunek q w przewodniku działa siła Lorentza F

Indukcja elektromagnetyczna



Indukcja elektromagnetyczna



Indukcja elektromagnetyczna

$$\begin{aligned}\varepsilon &= - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} (B \bullet S) = - \frac{d}{dt} (B \bullet l \bullet x) = \\ &= - B \bullet l \bullet \frac{dx}{dt} = B \bullet l \bullet v\end{aligned}$$

$$v = - \frac{dx}{dt}$$

Indukcja elektromagnetyczna

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B \bullet l \bullet v}{R}$$

$$F = i \bullet l \times B$$

Indukcja elektromagnetyczna

$$F_1 = i \cdot l \cdot B = \frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v}{R}$$

$$F_2 = 0$$

$$F_3 = 0$$

Indukcja elektromagnetyczna

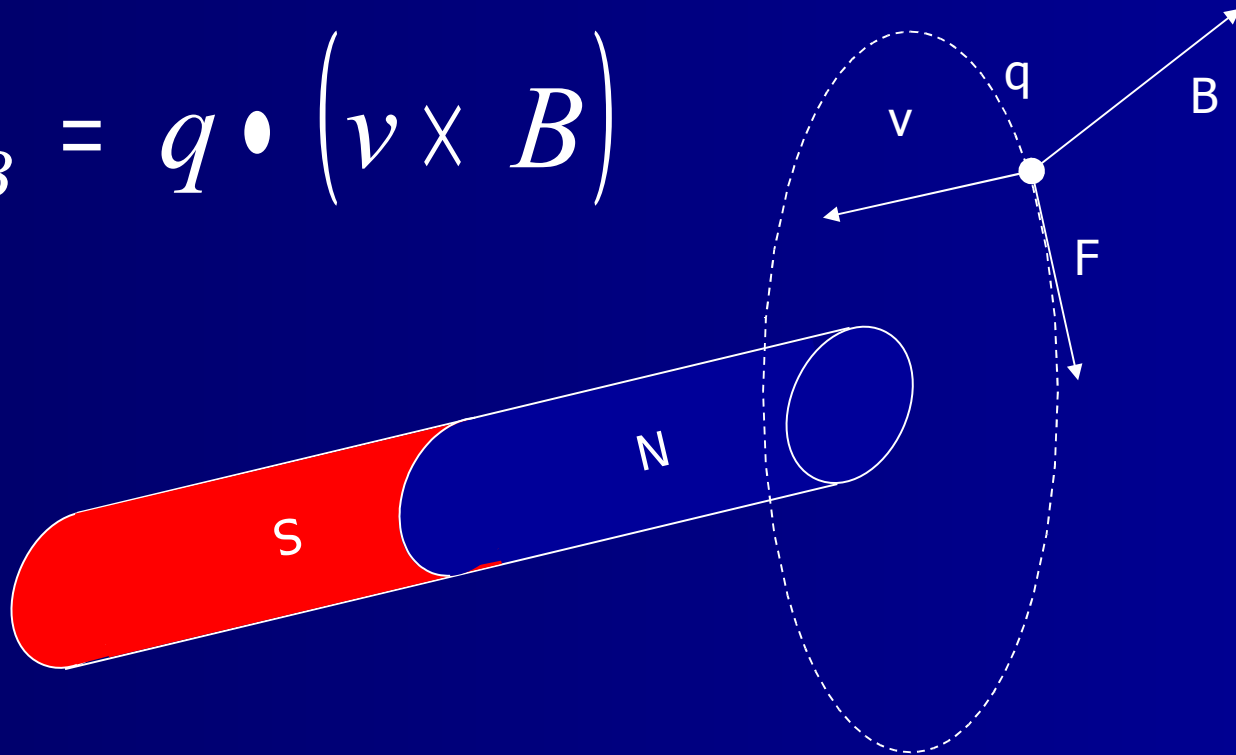
$$P = F \cdot v = \frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v^2}{R}$$

$$P = i^2 \cdot R = \left(\frac{B \cdot l \cdot v}{R} \right)^2 \cdot R = \frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v^2}{R}$$

Indukcja elektromagnetyczna

Ładunek ruchomy

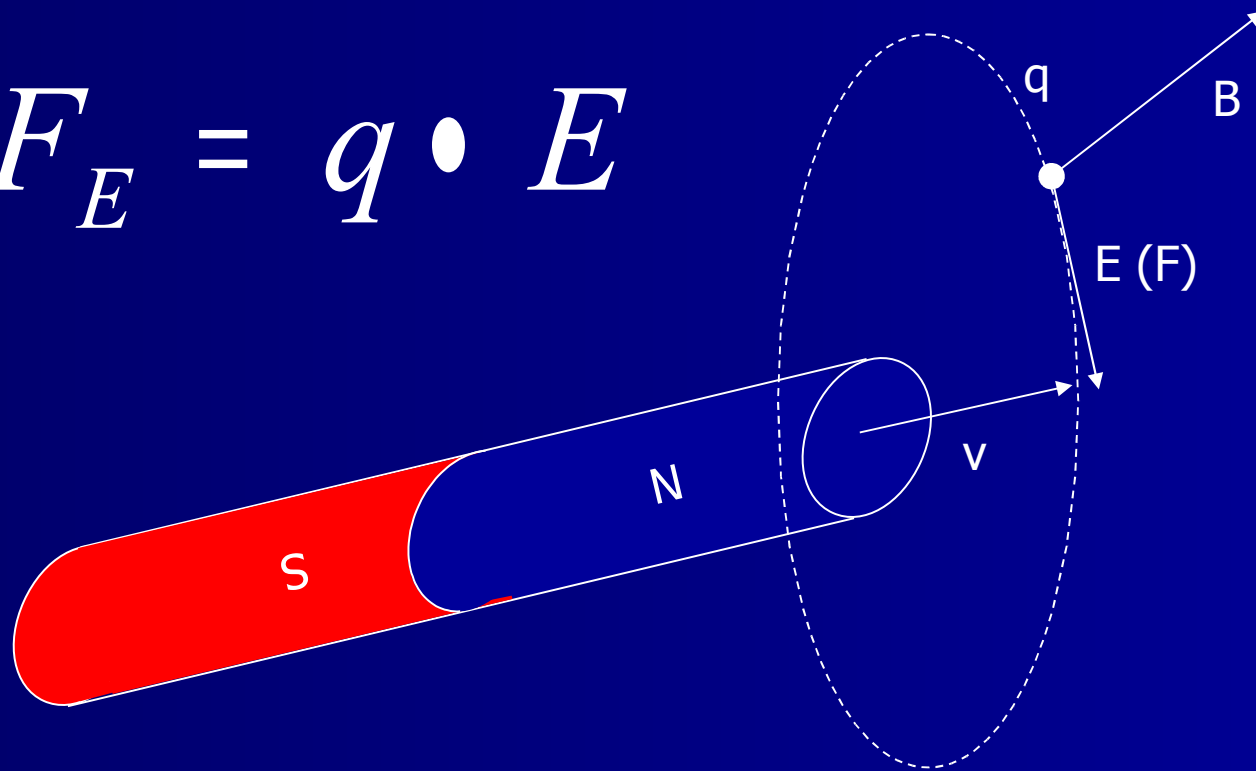
$$F_B = q \cdot (v \times B)$$



Indukcja elektromagnetyczna

Ładunek nieruchomy

$$F_E = q \cdot E$$

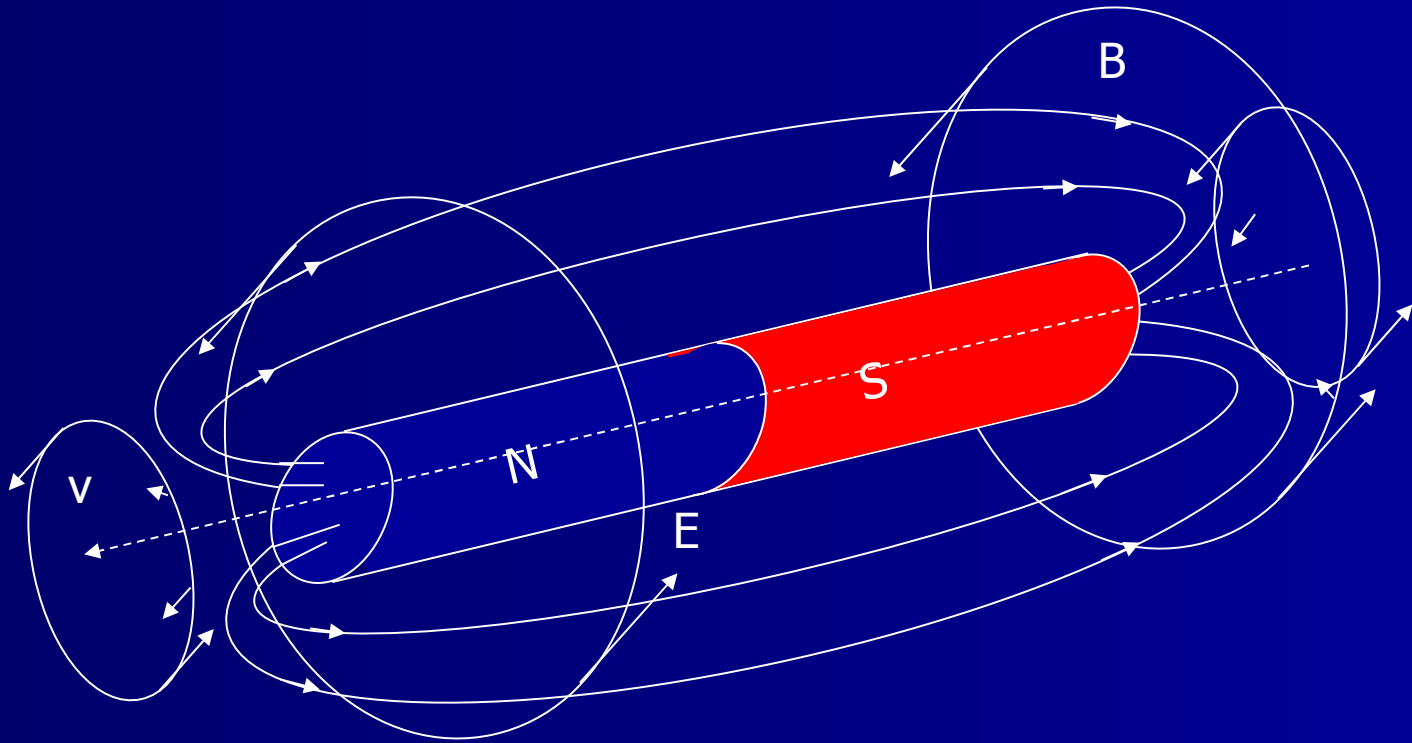


Indukcja elektromagnetyczna

$$q \bullet E = q \bullet (v_q \times B) = -q \bullet (v_B \times B)$$

$$E = -v_B \times B$$

Indukcja elektromagnetyczna



Indukcja elektromagnetyczna

Zmienne pole magnetyczne
generuje zmienne pole
elektryczne

Zmienne pole elektryczne
generuje zmienne pole
magnetyczne

Indukcja elektromagnetyczna

Pole magnetyczne

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Pole elektryczne

$$\mathcal{E} = \oint E \cdot dl$$

Indukcja elektromagnetyczna

Pole elektromagnetyczne

$$\oint E \cdot dl = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Indukcja elektromagnetyczna

Strumień magnetyczny cewki N - zwojowej

$$\Phi = N \bullet \Phi_B$$

Zjawisko indukowania siły elektromotorycznej w cewce przy zmianie prądu płynącego w cewce nazywane jest samoindukcją

$$\mathcal{E} = - \frac{d(N \bullet \Phi_B)}{dt}$$

Indukcja elektromagnetyczna

Indukcyjność cewki jest współczynnikiem proporcjonalności do natężenia prądu i

$$N \bullet \Phi_B = L \bullet i$$

$$L \left[H = \frac{V \bullet s}{A} = \frac{Wb}{A} \right]$$

Indukcja elektromagnetyczna

Siła elektromotoryczna samoindukcji

$$\varepsilon = - \frac{d(N \bullet \Phi_B)}{dt} = - L \bullet \frac{di}{dt}$$

Indukcja elektromagnetyczna

$$N \bullet \Phi_B = n \bullet l \bullet B \bullet S$$

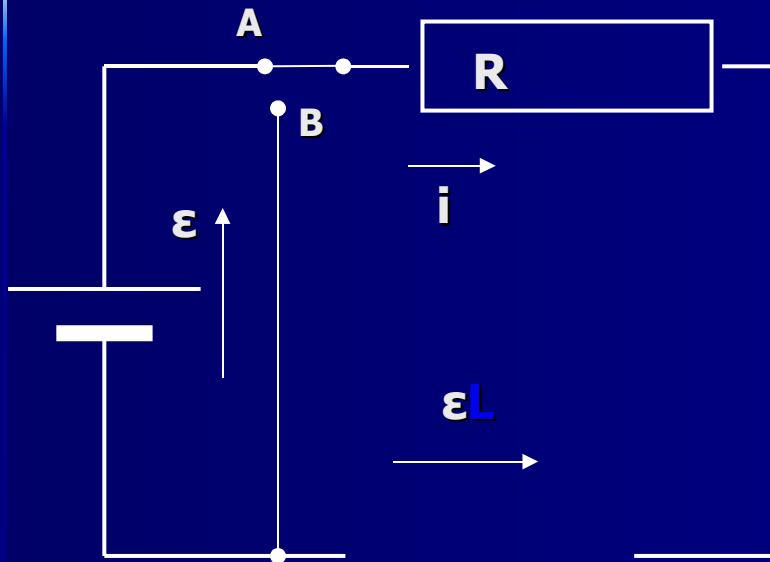
$$\left(n = \frac{N}{l} \right) \quad (B = \mu_0 \bullet n \bullet i)$$

$$N \bullet \Phi_B = n \bullet l \bullet \mu_0 \bullet n \bullet i \bullet S$$

$$N \bullet \Phi_B = L \bullet i$$

$$L = \mu_0 \bullet n^2 \bullet l \bullet S$$

Indukcja elektromagnetyczna



Włączenie źródła prądu do obwodu (A)

$$U_R = i \cdot R$$

$$\varepsilon_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\varepsilon + \varepsilon_L = U_R$$

$$-i \cdot R - L \cdot \frac{di}{dt} + \varepsilon = 0$$

Indukcja elektromagnetyczna

$$f(x) = f'(x)$$

$$\left(-e^{-x}\right)' = e^{-x}$$

$$i + \frac{L}{R} \bullet \frac{di}{dt} = \frac{\varepsilon}{R}$$

$$i = a \left(1 - e^{-b \bullet t}\right)$$

$$i' = a \bullet b \bullet e^{-b \bullet t}$$

$$a \left(1 - e^{-b \bullet t}\right) + \frac{L}{R} \bullet a \bullet b \bullet e^{-b \bullet t} = \frac{\varepsilon}{R}$$

Indukcja elektromagnetyczna

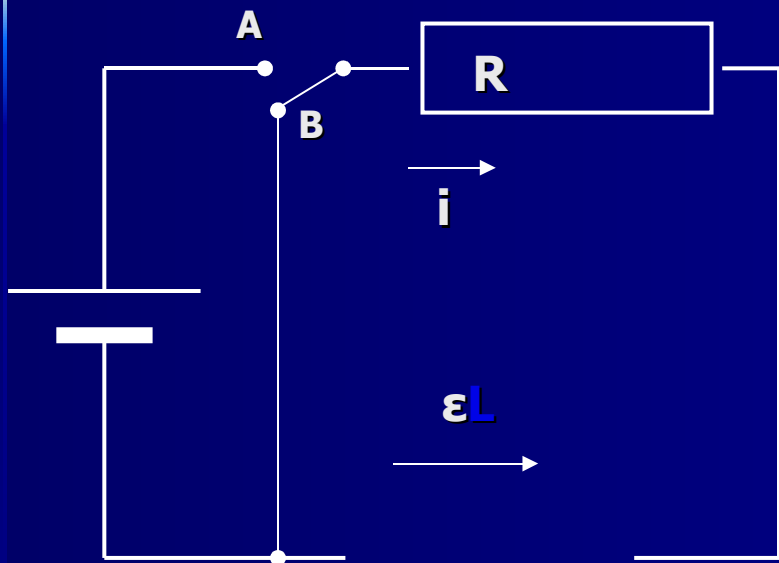
$$a(1 - e^{-b \cdot t}) + \frac{L}{R} \cdot a \cdot b \cdot e^{-b \cdot t} = \frac{\varepsilon}{R}$$

$$a - a \cdot e^{-b \cdot t} + \frac{L}{R} \cdot a \cdot b \cdot e^{-b \cdot t} = \frac{\varepsilon}{R}$$

$$\left(a - \frac{\varepsilon}{R}\right) - a \cdot e^{-b \cdot t} \cdot \left(1 - b \cdot \frac{L}{R}\right) = 0$$

$$a = \frac{\varepsilon}{R} \quad b = \frac{R}{L} \quad i = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t}\right)$$

Indukcja elektromagnetyczna



Wyłączenie źródła prądu z obwodu (B)

$$U_R = i \cdot R$$

$$\epsilon_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\epsilon_L = U_R$$

$$i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} = 0$$

Indukcja elektromagnetyczna

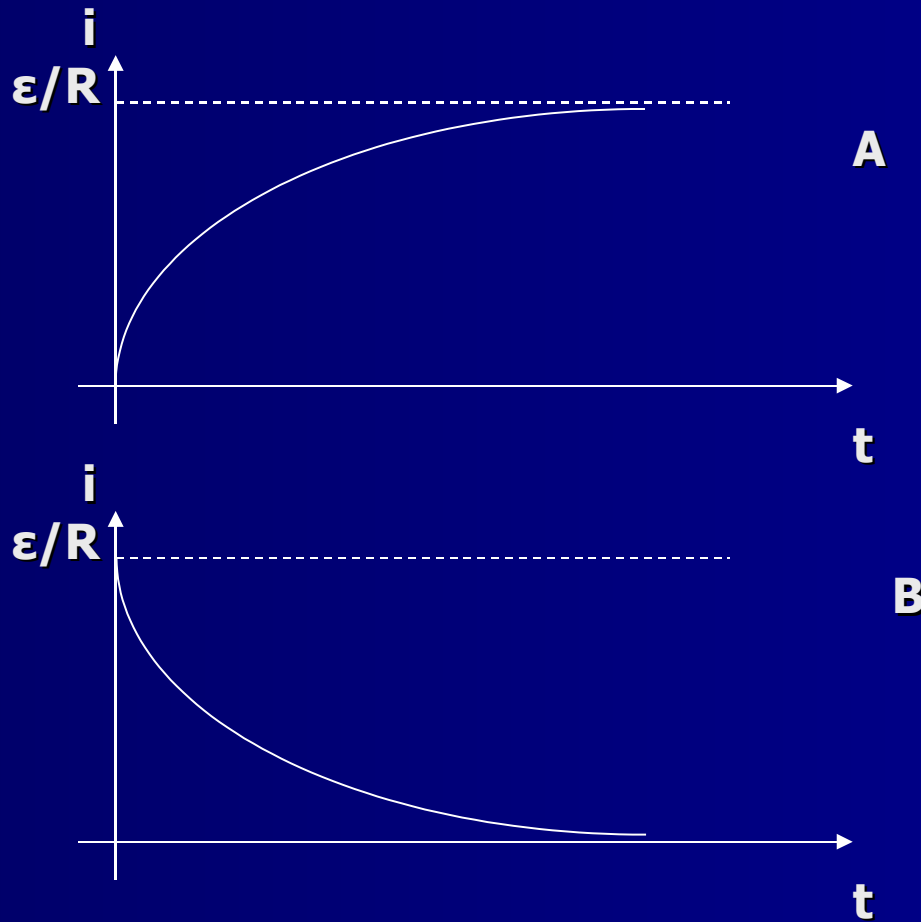
$$i + \frac{L}{R} \cdot \frac{di}{dt} = 0$$

$$i = i_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \quad i_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \right) = \frac{\varepsilon}{R}$$

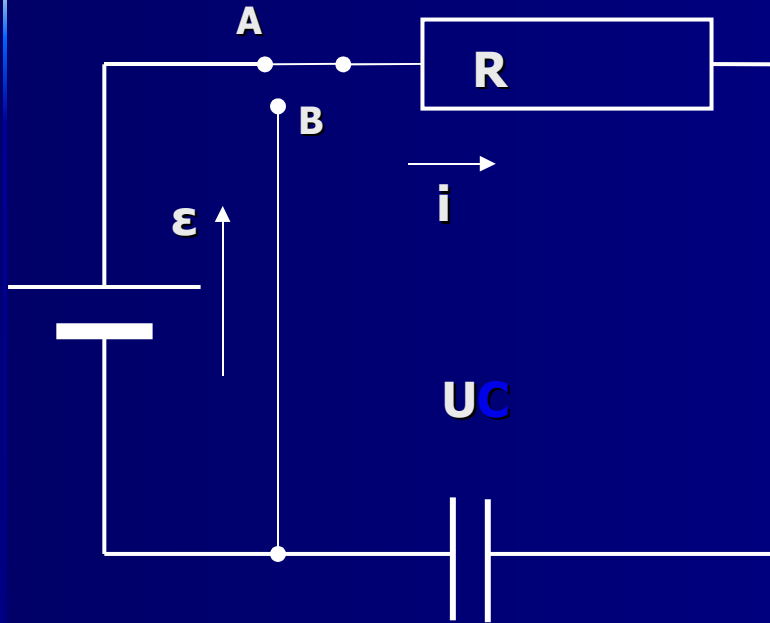
$$i' = -\frac{R}{L} \cdot i_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

$$i_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} - \frac{L}{R} \cdot \frac{R}{L} \cdot i_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} = 0$$

Indukcja elektromagnetyczna



Indukcja elektromagnetyczna



Włączenie źródła prądu do obwodu (A)

$$U_R = i \cdot R$$

$$U_C = \frac{q}{C}$$

$$\varepsilon_L = U_R + U_C$$

$$- i \cdot R - \frac{q}{C} + \varepsilon = 0$$

Indukcja elektromagnetyczna

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$\varepsilon = R \bullet \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C}$$

$$q = a \bullet \left(1 - e^{-b \bullet t} \right)$$

$$q' = a \bullet b \bullet e^{-b \bullet t}$$

Indukcja elektromagnetyczna

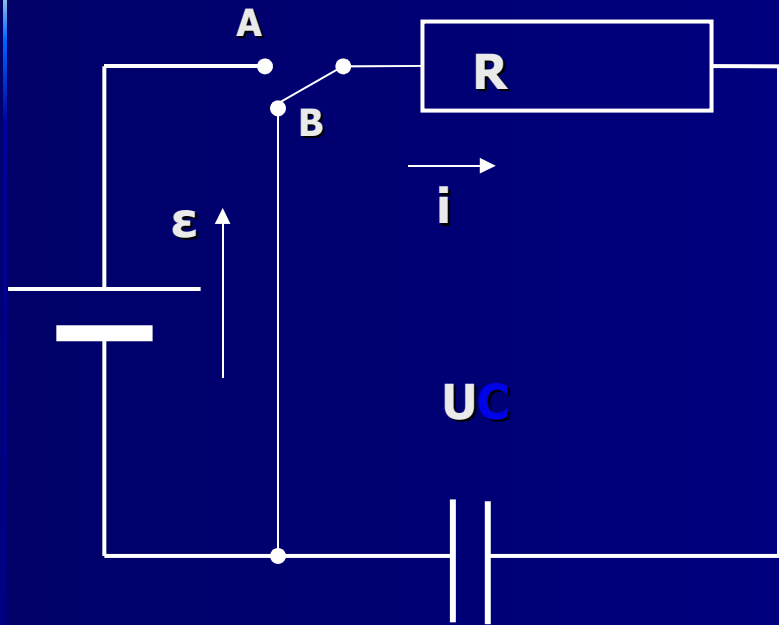
$$\frac{a}{C} \cdot (1 - e^{-b \cdot t}) + R \cdot a \cdot b \cdot e^{-b \cdot t} = \varepsilon$$

$$\frac{a}{C} - \frac{a}{C} \cdot e^{-b \cdot t} + R \cdot a \cdot b \cdot e^{-b \cdot t} = \varepsilon$$

$$\left(\frac{a}{C} - \varepsilon \right) - a \cdot e^{-b \cdot t} \cdot \left(\frac{1}{C} - b \cdot R \right) = 0$$

$$a = C \cdot \varepsilon \quad b = \frac{1}{R \cdot C} \quad q = C \cdot \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right)$$

Indukcja elektromagnetyczna



Wyłączenie źródła prądu z obwodu (B)

$$U_R = i \cdot R$$

$$U_C = \frac{q}{C}$$

$$U_C = U_R$$

$$i \cdot R + \frac{q}{C} = 0$$

Indukcja elektromagnetyczna

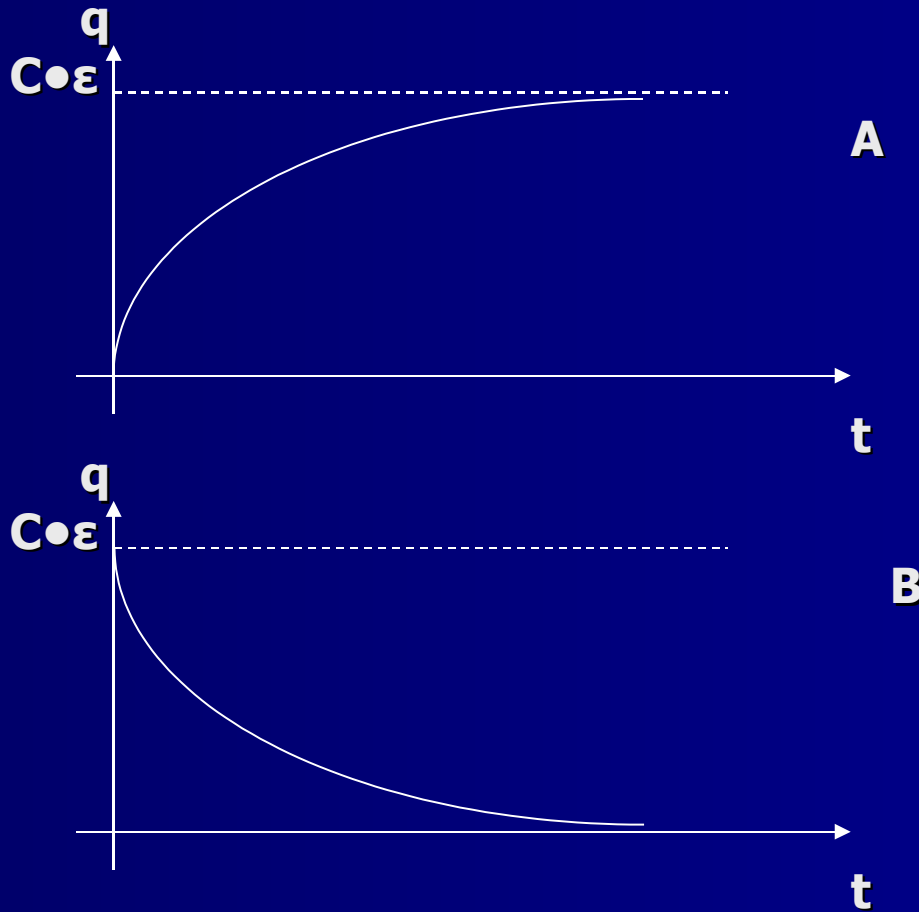
$$R \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0$$

$$q = q_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \quad q_0 = C \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right)_{t \rightarrow \infty} = C \cdot \varepsilon$$

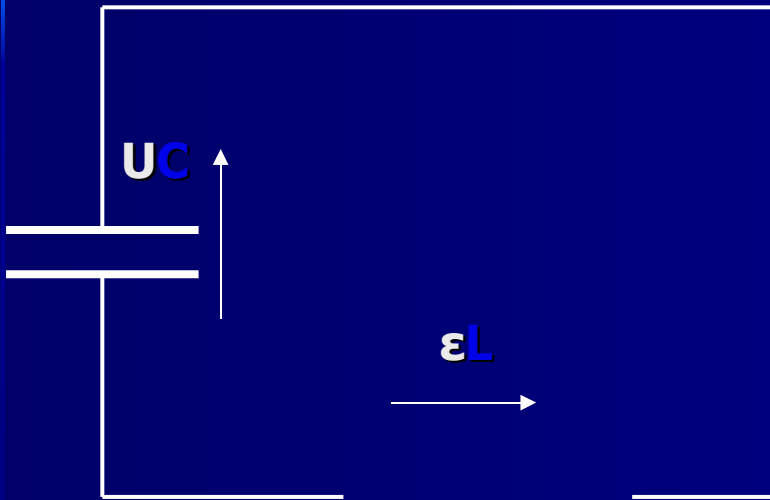
$$q' = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot q_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

$$-R \cdot \frac{1}{R \cdot C} \cdot q_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} + \frac{1}{C} \cdot q_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} = 0$$

Indukcja elektromagnetyczna



Indukcja elektromagnetyczna



Rozładowanie kondensatora
w obwodzie LC

$$U_C = \frac{q}{C}$$

$$\varepsilon_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\varepsilon_L = U_C$$

Indukcja elektromagnetyczna

$$q = \int i \bullet dt \quad U_c = \frac{1}{C} \bullet \int i \bullet dt$$

$$- L \bullet \frac{di}{dt} = \frac{1}{C} \bullet \int i \bullet dt$$

$$- L \bullet \frac{d^2 i}{dt^2} = \frac{i}{C}$$

$$\frac{d^2 i}{dt^2} = - \frac{1}{L \bullet C} \bullet i$$

Indukcja elektromagnetyczna

$$\frac{d^2 i}{dt^2} = - \frac{1}{L \cdot C} \cdot i$$

$$f''(x) = - f(x)$$

$$(\cos x)'' = - \cos x$$

Indukcja elektromagnetyczna

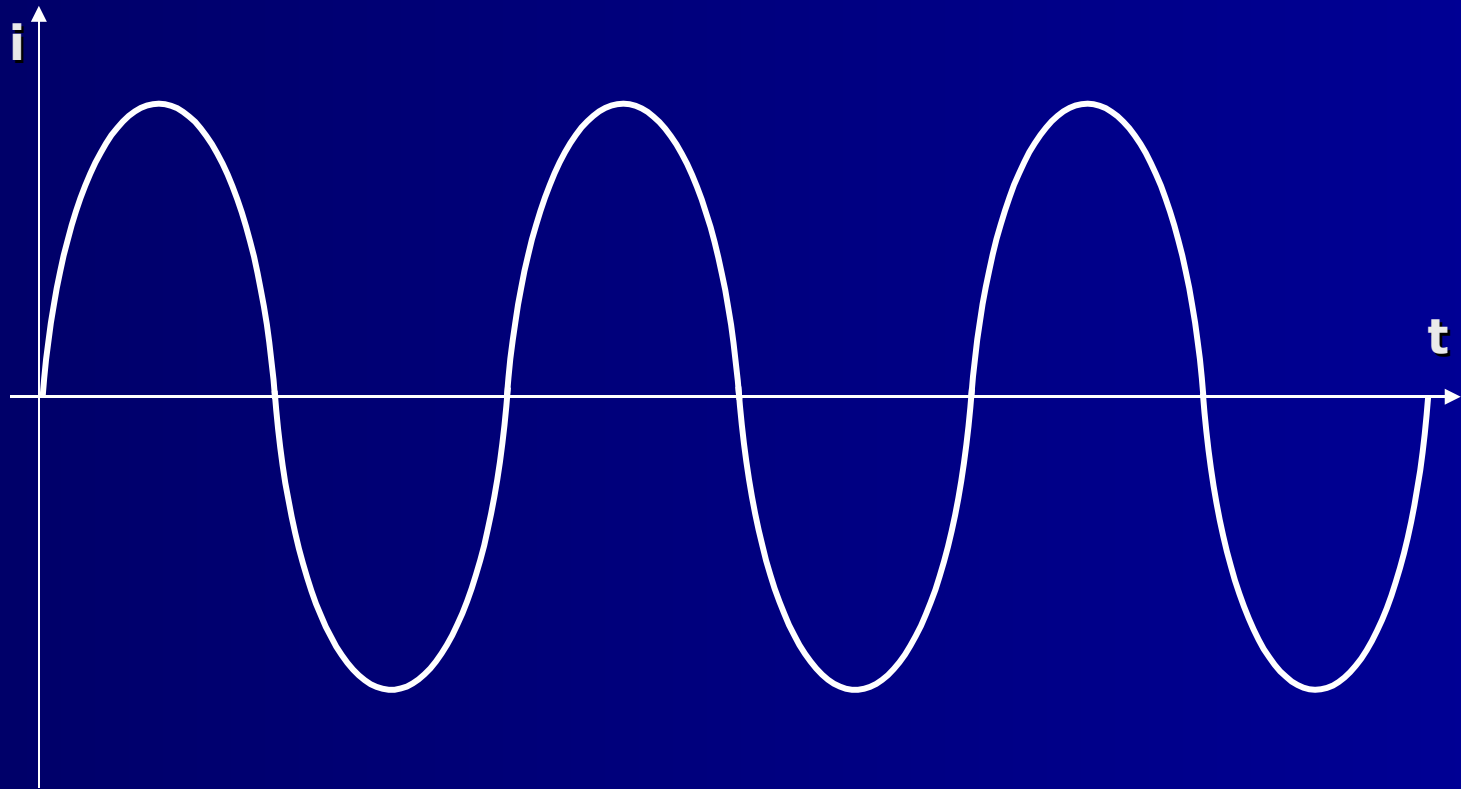
$$i = i_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$i'' = -i_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

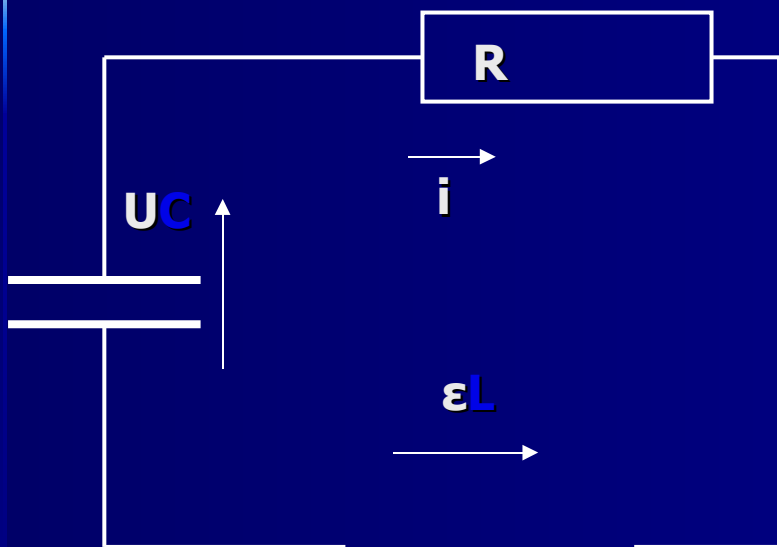
$$-i_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) = -\frac{1}{L \cdot C} \cdot i_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

Indukcja elektromagnetyczna



Indukcja elektromagnetyczna



**Rozładowanie kondensatora
w obwodzie RC**

$$U_R = i \cdot R$$

$$U_C = \frac{q}{C}$$

$$\mathcal{E}_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\mathcal{E}_L = U_C + U_R$$

Indukcja elektromagnetyczna

$$q = \int i \bullet dt \quad U_c = \frac{1}{C} \bullet \int i \bullet dt$$

$$- L \bullet \frac{di}{dt} = i \bullet R + \frac{1}{C} \bullet \int i \bullet dt$$

$$- L \bullet \frac{d^2 i}{dt^2} = R \bullet \frac{di}{dt} + \frac{i}{C}$$

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \bullet \frac{di}{dt} = - \frac{1}{L \bullet C} \bullet i$$

Indukcja elektromagnetyczna

Obwód LRC ($R \neq 0$)

$$i = i_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

Indukcja elektromagnetyczna

