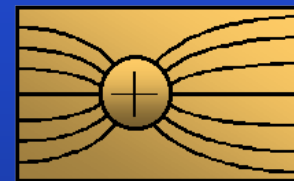




Politechnika Wrocławska



Wydział Mechaniczno-Energetyczny



Podstawy elektrotechniki

Prof. dr hab. inż. Juliusz B. Gajewski, prof. zw. PWr

Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Bud. A4 „Stara kotłownia”, pokój 359

Tel.: 71 320 3201

Fax: 71 328 3218

E-mail: juliusz.b.gajewski@pwr.edu.pl

Internet: www.itcmp.pwr.wroc.pl/elektra

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

P o l e m a g n e t y c z n e jest jednym z wielu pól istniejących w przyrodzie, w którym ładunki elektryczne są poddawane działaniu sił wytwarzanych przez *magnesy trwałe* lub *przewodniki z prądem*. Pole to z kolei oddziałuje s i ł o w o na inne magnesy lub przewodniki w nim się znajdujące.

Pole magnet(ostat)yczne odznacza się *energiją* i *bezwładnością*, a zatem podobnie do pola elektr(ostat)ycznego jest w takim samym stopniu materialne. Ponadto źródła pola mają dwa bieguny: **dodatni** (p ó ł n o c n y *N*) i **ujemny** (p o ł u d n i o w y *S*) oraz bieguny jednoimienne się odpychają, a różnoimienne — przyciągają.

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Magnesy trwałe, wywołując orientujące pole i oddziaływanie na pewne ciała w tym polu, powodują, że np. igła magnetyczna ustawia się zgodnie z kierunkiem linii sił pola, a opiłki żelaza rozsypane losowo na płaską powierzchnię wykazują tendencję do układania się na i wzdłuż linii tego pola. Przepływ prądów stałych przez nieruchome przewody obwodów elektrycznych z kolei wywołuje niezmiennie w czasie oddziaływanie między nimi, nazywane działaniami m a g n e t o s t a t y c z n y m i.

Siła magnet(ostat)yczna, nazywana czasami e l e k t r o k i n e t y c z n ą ze względu na ruch ładunków elektrycznych, działając na element obwodu z prądem i wywołując określone skutki dynamiczne zależy od pewnej wielkości wektorowej nazywanej wektorem i n d u k c j i m a g n e t y c z n e j B . Indukcja magnetyczna charakteryzuje dany punkt przestrzeni podobnie jak wektor natężenia pola elektr(ostat)ycznego E określa właściwości elektryczne punktu.

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

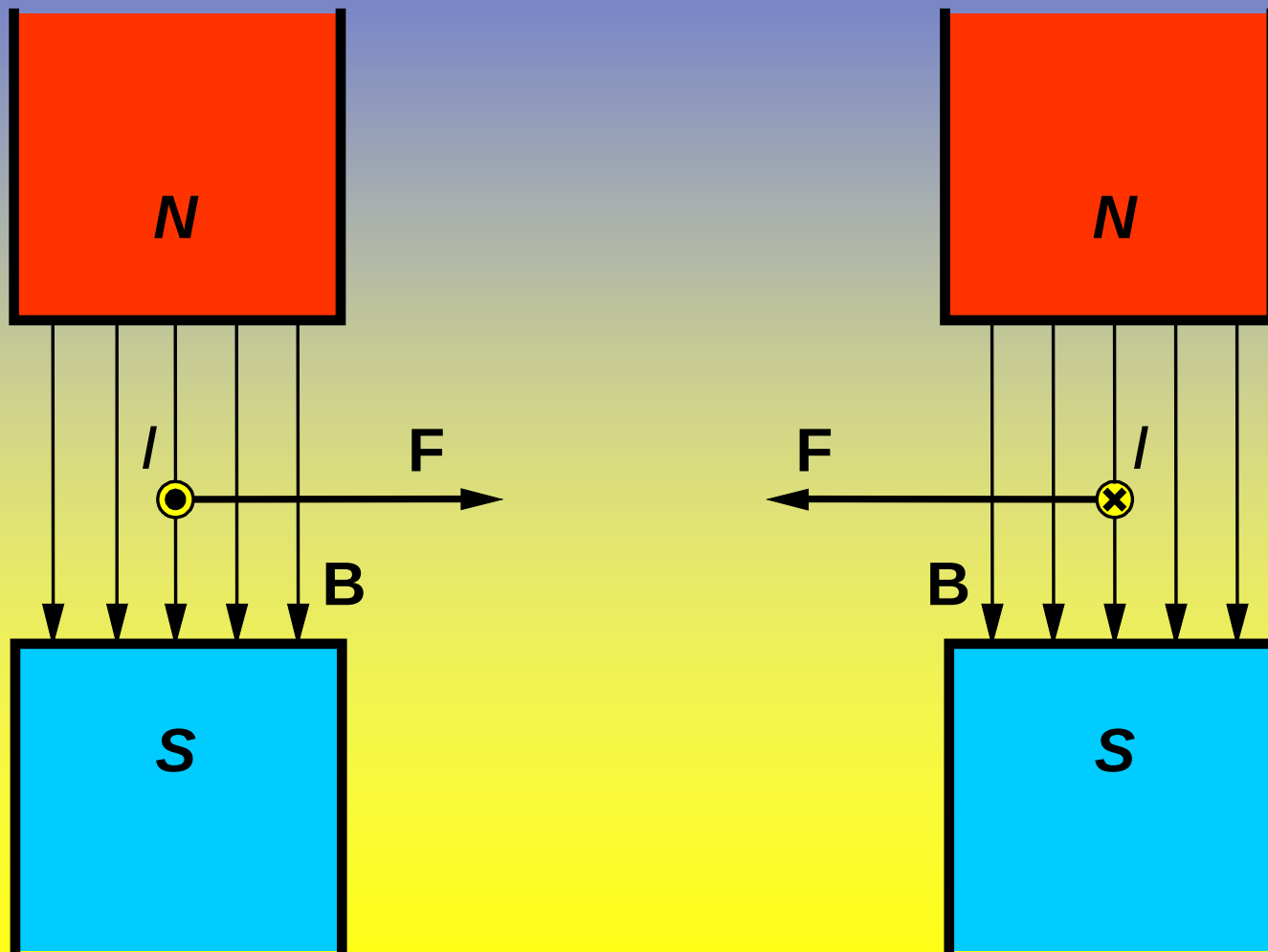
Każdemu punktowi przestrzeni wokół przewodnika z prądem przyporządkowuje się taki wektor, zatem przewód albo obwód prądowy wytwarza p o l e m a g n e t y c z n e. Źródłami takiego pola są nie tylko przewody lub obwody prądowe, ale także materiały magnetyczne, tzw. *ferromagnetyki*, a dokładniej mikroobwody prądowe w ich atomach.

Między polami elektrycznymi a polami magnetycznymi istnieje różnica w oddziaływaniach obu pól. Wynika to z ich charakteru: pole elektryczne ma charakter *centralny, promieniowy*, a linie sił są *liniami otwartymi*, podczas gdy magnetyczny ma charakter *poprzeczny*, w którym siła działająca na ładunek w ruchu jest skierowana prostopadle do kierunku ruchu a linie sił są *zamknięte*. Nie oznacza to fizycznej odrębności obu pól, ale świadczy raczej o ich wzajemnym uzupełnianiu się w opisie ogólnego p o l a e l e k t r o m a g n e t y c z n e g o.

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Pole magnet(ostat)yczne. Prawo *Ampère'a*



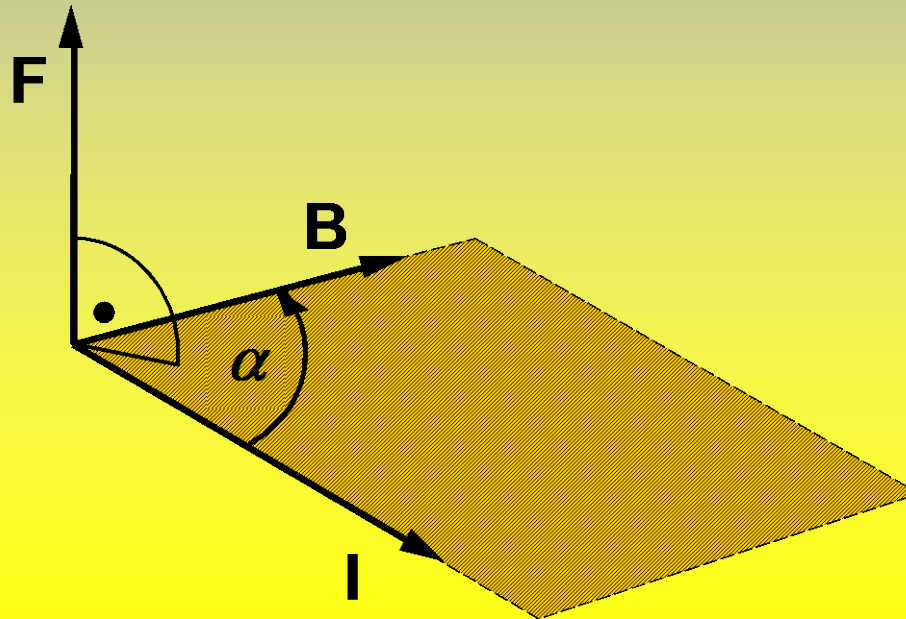
Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Pole magnetyczne. Prawo *Ampère'a*

$$F = I l B \sin \alpha = I l B \sin(\mathbf{l}, \mathbf{B})$$

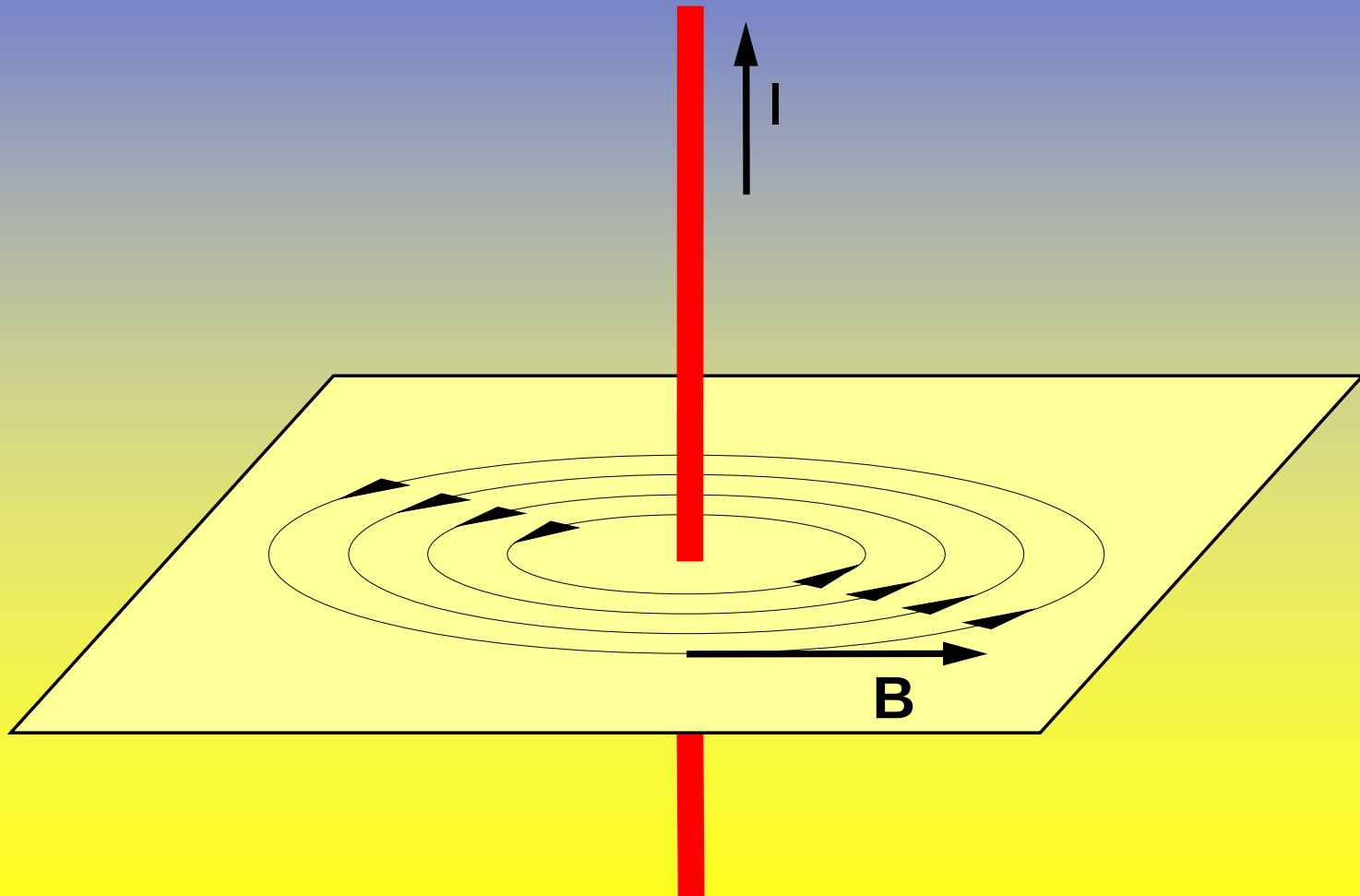
$$\mathbf{F} = I \mathbf{l} \times \mathbf{B}$$



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

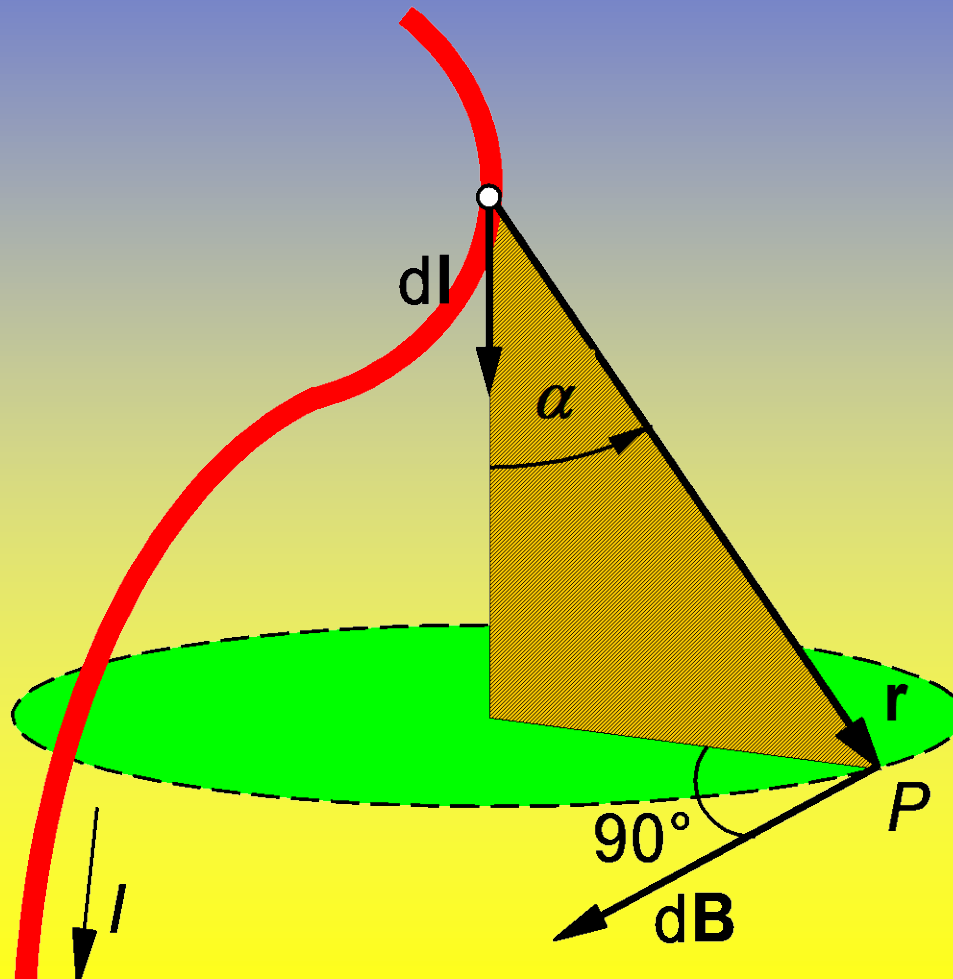
Pole magnetyczne. Prawo *Ampère'a*



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo *Biota–Savarta–Laplace’a*



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo *Biota–Savarta–Laplace’a*

Indukcja magnetyczna

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} I \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin(\mathbf{dl}, \mathbf{r})}{r^2} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}$$

μ_0 — przenikalność magnetyczna próżni ($= 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

μ — przenikalność magnetyczna względna [–]

$\mu\mu_0$ — przenikalność bezwzględna [Hm⁻¹]

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo *Biota–Savarta–Laplace’a*

Natężenie pola magnetycznego

$$d\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

$$dH = \frac{I}{4\pi} \frac{dl \sin(d\mathbf{l}, \mathbf{r})}{r^2}$$

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Superpozycja wektorów indukcji magnetycznej

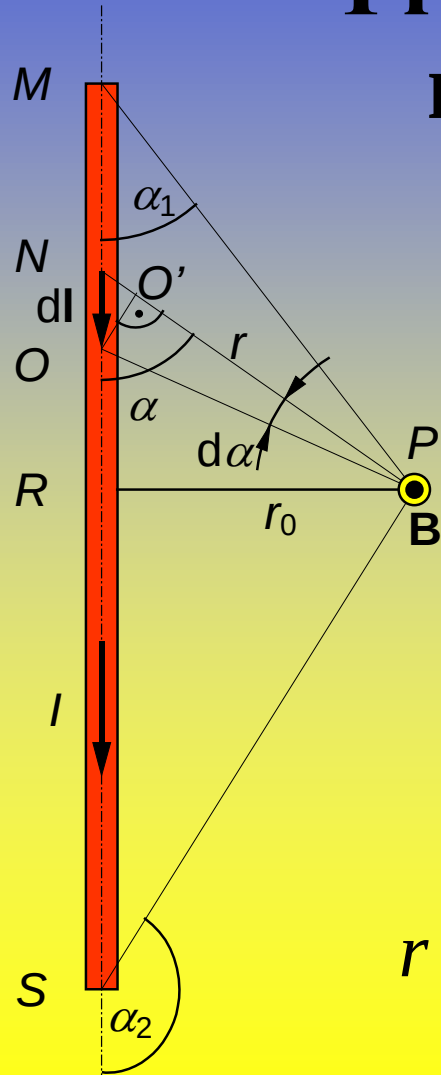
$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{B}_i$$

$$\mathbf{B} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{B}_i = \int_l d\mathbf{B}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Przykład obliczania pola magnetycznego przewodnika prostoliniowego z prądem



$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} I \int_l \frac{dl \sin \alpha}{r^2}$$

Związki geometryczne

$$r = \frac{r_0}{\sin \alpha} \text{ oraz } dl = \frac{OO'}{\sin \alpha}, \text{ gdzie } OO' = r d\alpha$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Przykład obliczania pola magnetycznego przewodnika prostoliniowego z prądem

Zatem

$$dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha} = \frac{r_0 d\alpha}{\sin^2 \alpha}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r_0} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Przykład obliczania pola magnetycznego przewodnika prostoliniowego z prądem

Gdy

$$MS \rightarrow \infty \Rightarrow \alpha_1 = 0 \wedge \alpha_2 = \pi$$



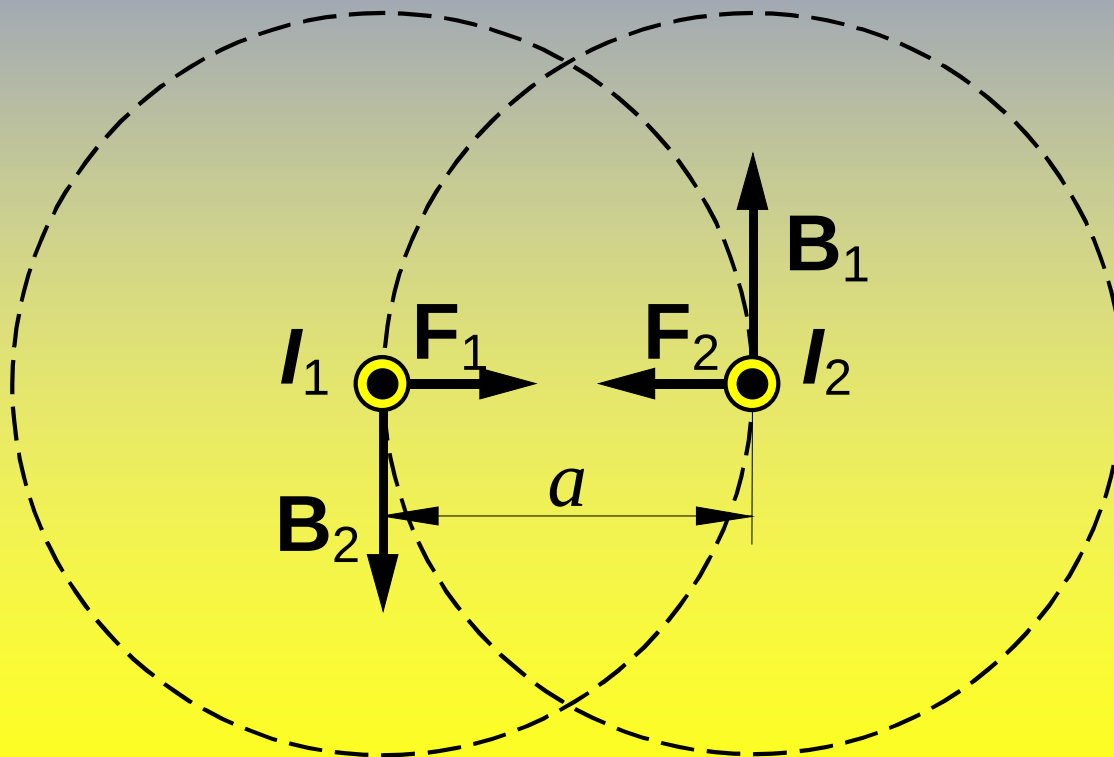
$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r_0}$$

$$H = \frac{1}{4\pi} \frac{2I}{r_0}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

**Przykład obliczania pola magnetycznego
dwóch długich równoległych
prostoliniowych przewodników z prądem**



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

**Przykład obliczania pola magnetycznego
dwóch długich równoległych
prostoliniowych przewodników z prądem**

$$dF_2 = I_2 B_1 dl \sin(\mathbf{dl}, \mathbf{B}_1)$$

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1}{a}$$

$$\mathbf{B}_1 \perp \mathbf{dl} \Rightarrow \sin(\mathbf{dl}, \mathbf{B}) = 1$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

**Przykład obliczania pola magnetycznego
dwóch długich równoległych
prostoliniowych przewodników z prądem**

$$dF_2 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{a} dl$$

$$dF_1 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{a} dl$$

$$dF = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{a} dl$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Przykład obliczania pola magnetycznego dwóch długich równoległych prostoliniowych przewodników z prądem

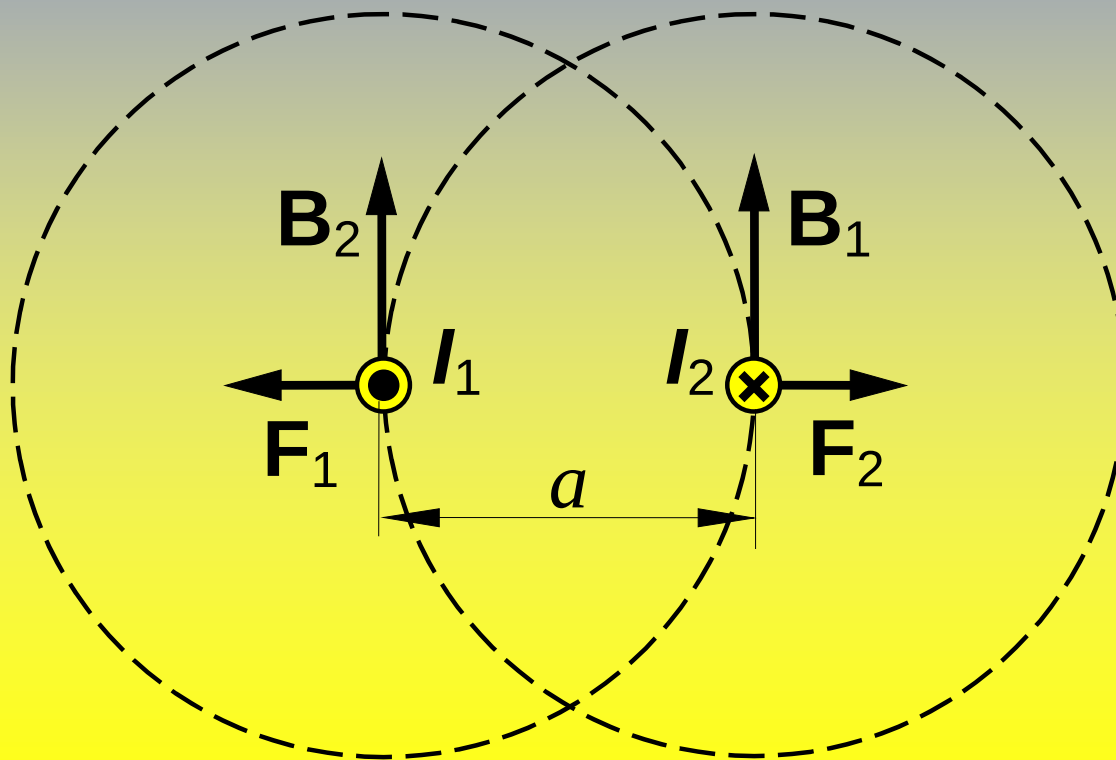
$$F = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{a} \int_0^l dl = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{a} l$$

A m p e r jest natężeniem prądu elektrycznego nie zmieniającego się, który — płynąc w dwóch równoległych przewodach prostoliniowych nieskończenie długich, o przekroju okrągłym znikomo małym, umieszczonych w odległości 1 m jeden od drugiego w próżni — wywołałby między tymi przewodami siłę równą 2×10^{-7} N na każdy metr długości przewodu.

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

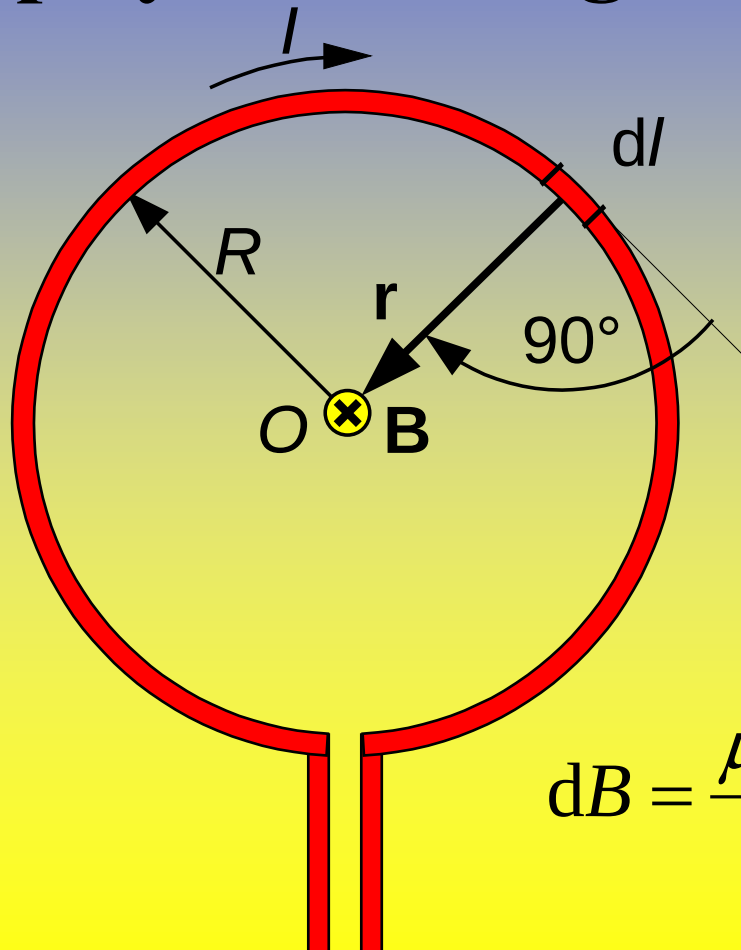
**Przykład obliczania pola magnetycznego
dwóch długich równoległych
prostoliniowych przewodników z prądem**



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Przykład obliczania pola magnetycznego prądu kołowego



$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin(\angle dl, r)}{r^2}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Przykład obliczania pola magnetycznego prądu kołowego

$$\mathbf{r} \perp d\mathbf{l} \Rightarrow \sin(\mathbf{dl}, \mathbf{r}) = 1$$

$$r = R$$

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{R^2}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Przykład obliczania pola magnetycznego prądu kołowego

$$B = \int_l dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \int_0^{2\pi R} dl$$

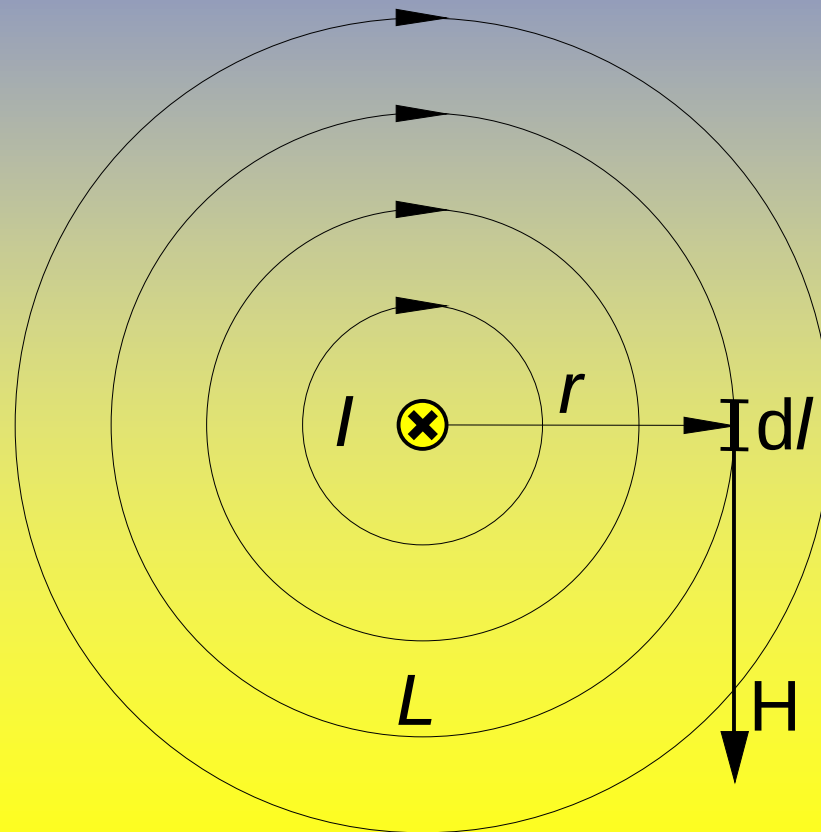
$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}$$

$$H = \frac{I}{2R}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo przepływu prądu



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo przepływu prądu

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_0^{2\pi r} \frac{1}{4\pi} \frac{2I}{r} \cos(\mathbf{H}, d\mathbf{l}) dl = \frac{1}{4\pi} \frac{2I}{r} \int_0^{2\pi r} dl$$
$$= \frac{1}{4\pi} \frac{2I}{r} 2\pi r = I$$

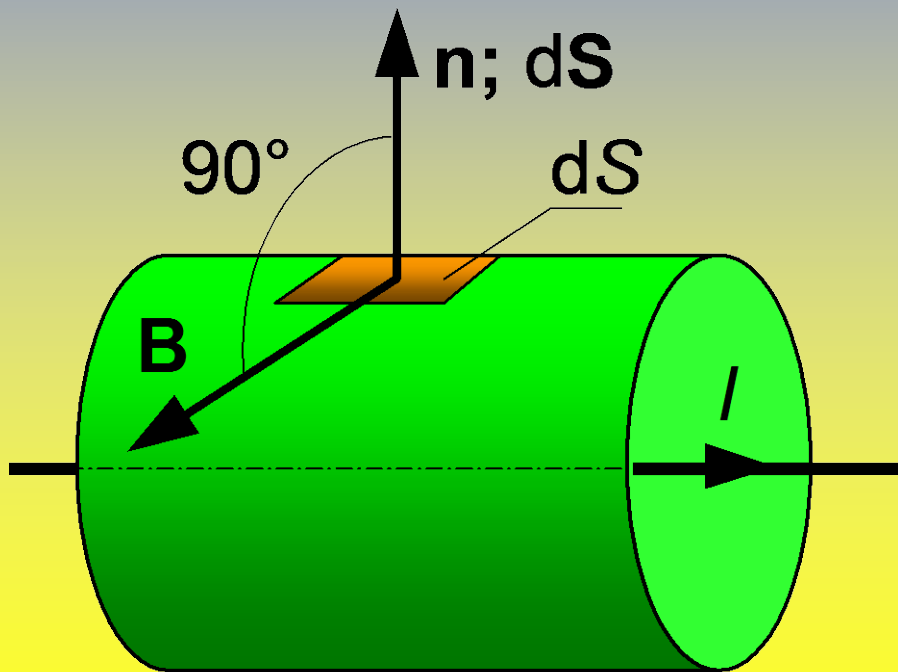
**Pole wirowe
(niepotencjalne)**

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_0^{2\pi r} H dl \cos(\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = \sum_{k=1}^n I_k$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Strumień indukcji magnetycznej



$$d\Phi_m = B_n dS = B dS \cos(\mathbf{B}, \mathbf{n})$$

$$\Phi_m = \int_S B_n dS$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Strumień indukcji magnetycznej

$$\Phi_m = BS$$

Ponieważ $\cos(\mathbf{B}, \mathbf{n}) = 0$, zatem

$$\Phi_m = \oint_S B_n dS = 0$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawa pól magnetycznych

$$\Phi_m = \frac{E_m}{R_m}$$

prawo Ohma

$$R_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S}$$

**opór magnetyczny,
reluktancja**

$$R_m = \sum_{i=1}^n R_{m_i}$$

połączenie szeregowe

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawa pól magnetycznych

$$\frac{1}{R_m} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{m_i}}$$

połączenie równoległe

$$\sum_{k=1}^n \Phi_{m_k} = 0$$

I prawo Kirchhoffa

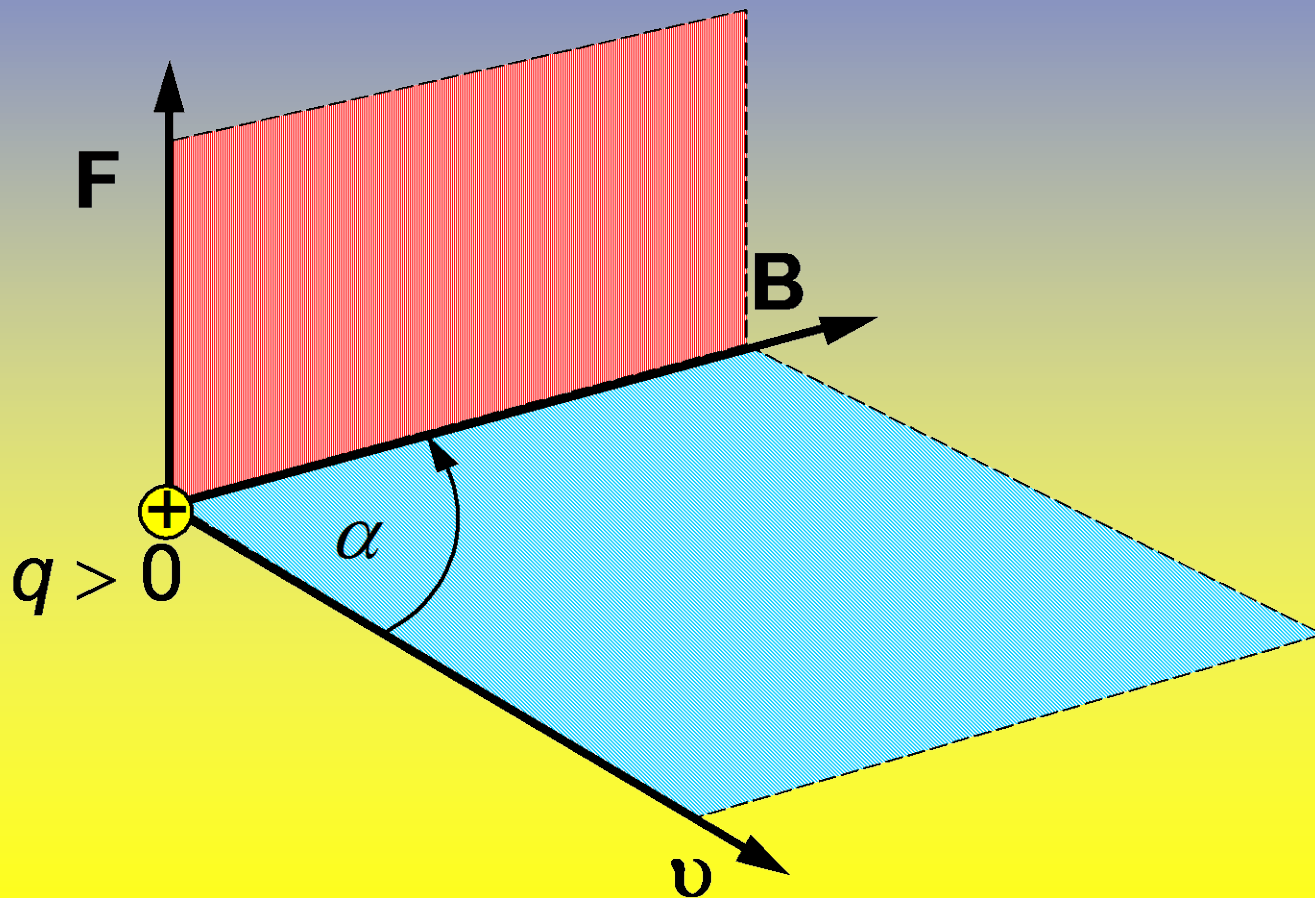
$$\sum_{k=1}^n R_{m_k} \Phi_{m_k} = \sum_{k=1}^n E_{m_k}$$

II prawo Kirchhoffa

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Siła Lorentza



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Siła Lorentza

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

$$I d\mathbf{l} = q \mathbf{v} dn$$

$$d\mathbf{F} = q dn \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

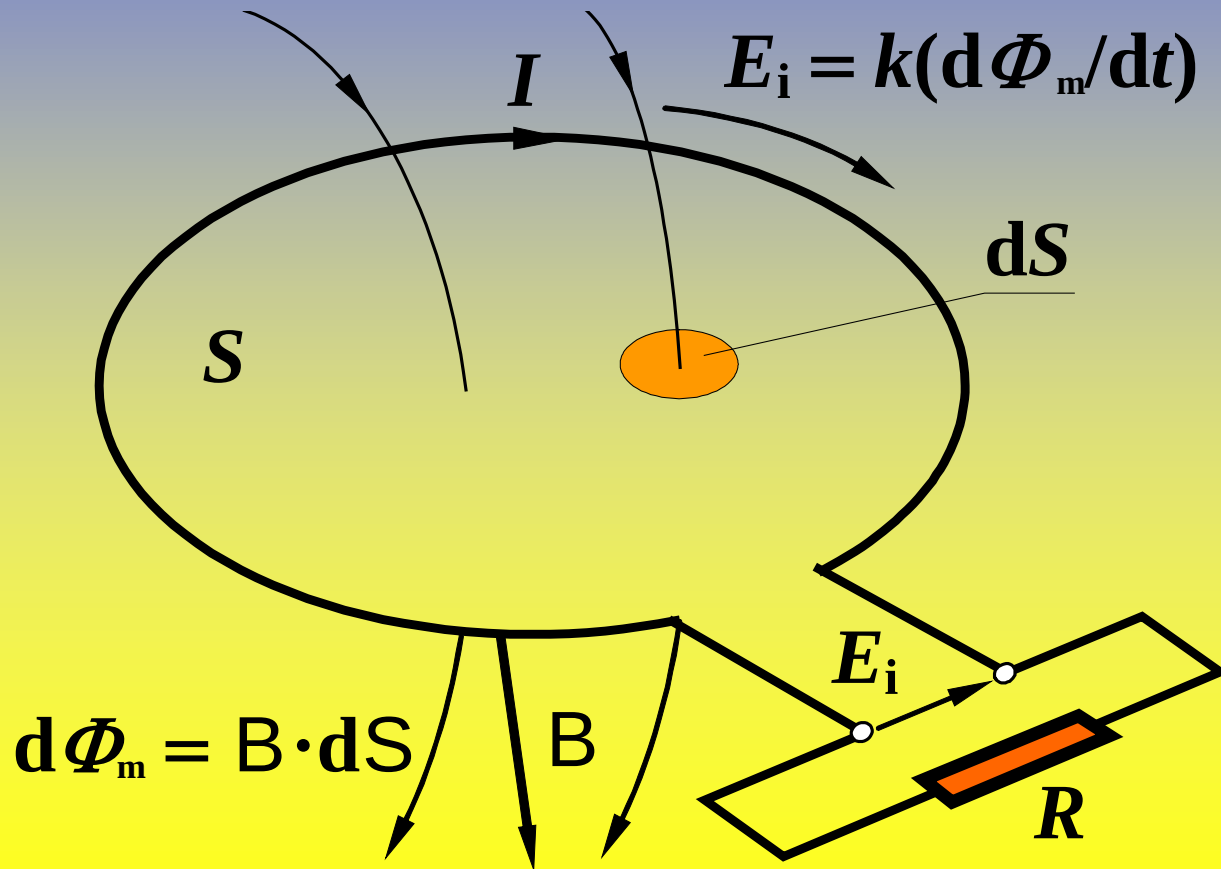
$$\mathbf{F}_L = \frac{d\mathbf{F}}{dn} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \longleftarrow \text{siła Lorentza}$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_L = q\mathbf{E} + q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \longleftarrow \text{wzór Lorentza}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo *Faradaya*



$$E_i = k \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo *Faradaya*

Prawo Faradaya *SEM indukcji elektromagnetycznej* E_i w danym obwodzie jest proporcjonalna do szybkości zmiany strumienia magnetycznego Φ_m przez powierzchnię ograniczoną przez ten obwód.

$$E_i = k \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Prawo Lenza *Prąd indukowany w obwodzie ma zawsze taki kierunek, że wytwarzany przezeń strumień magnetyczny przez powierzchnię ograniczoną przez ten obwód przeciwdziała zmianom strumienia, które wywołały pojawienie się prądu indukowanego.*

Stąd $k = -1$. Zatem

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

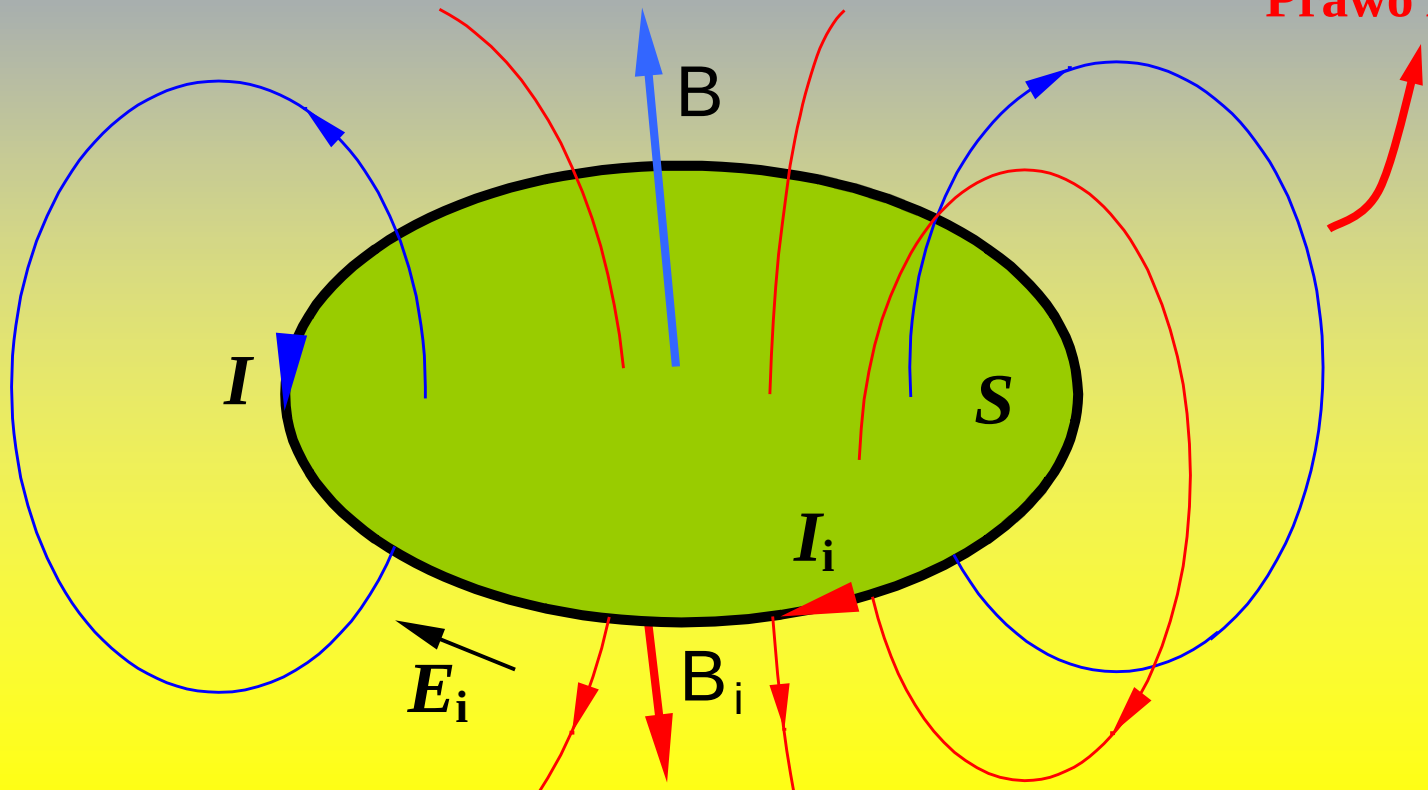
Prawo *Faradaya*

$$E_i = k \frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$\xrightarrow{k=-1}$$

$$E_i = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Prawo Lenza



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo *Faradaya*

Prawo Faradaya SEM (*siła elektromotoryczna*) indukcji elektromagnetycznej w obwodzie zamkniętym jest równa pod względem wartości bezwzględnej, lecz przeciwnego znaku, szybkości zmiany strumienia magnetycznego przez powierzchnię ograniczoną przez ten obwód:

$$E_i = -\frac{d\Phi_m}{dt}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo *Faradaya*

Dowód

$$d\mathbf{F}_L = dq \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$dW = d\mathbf{F}_L \cdot d\mathbf{r} = dq \mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r}$$

$$\mathbf{v} = d\mathbf{l}/dt$$

$$dW = \frac{d}{dt} (dq d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r})$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo *Faradaya*

$$du = \frac{dW}{dq} = \frac{d}{dt}(\mathbf{dl} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r}) = -\frac{d}{dt}(\mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} \times \mathbf{dl})$$

$$du = -\frac{d}{dt}(\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}) = -\frac{d}{dt}(d\Phi_m)$$

$$E_i = e(t) = -\frac{d\Phi_m}{dt}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prawo *Faradaya*

$$E_i = e(t) = \oint_L \mathbf{E}_z \cdot d\mathbf{l} = \oint_L (\mathbf{E} - \mathbf{E}_k) \cdot d\mathbf{l}$$

$$E_i = e(t) = \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_m}{\partial t}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Prądy wirowe *Foucaulta*

$$I_{\text{wir}} = \frac{E_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{\partial \Phi_m}{\partial t}$$

$$P_{\text{wir}} = \frac{2g^2 f^2 B_m^2}{6\rho}$$

g — grubość blach [m]

f — częstotliwość [Hz]

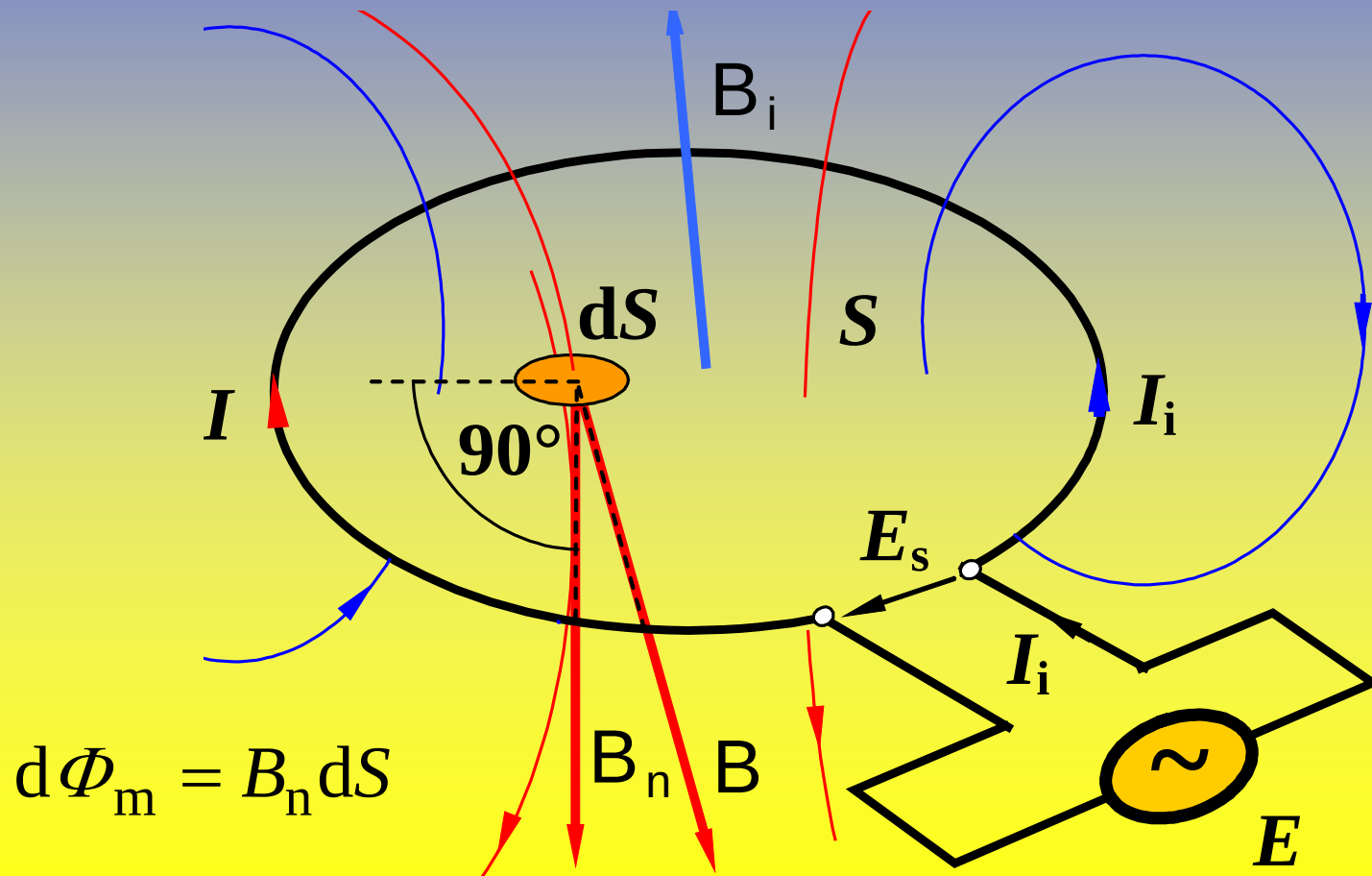
B_m — amplituda indukcji magnetycznej [T = Wb/m²]

ρ — rezystywność materiału blach [$\Omega \cdot \text{m}$]

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko samoindukcji



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko samoindukcji

$$\Phi_m = \int_S B_n dS$$

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} I \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

$$B_n = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_l \frac{\mu}{r^3} (d\mathbf{l} \times \mathbf{r})_n$$

$$\Phi_m = \int_S \frac{\mu_0}{4\pi} I \left[\int_l \frac{\mu}{r^3} (d\mathbf{l} \times \mathbf{r})_n \right] dS$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko samoindukcji

$$\Phi_m = I \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S dS \int_l \frac{\mu}{r^3} (\mathbf{dl} \times \mathbf{r})_n = IL$$

$$B = \mu\mu_0 z' I = \frac{\mu\mu_0 z I}{l}$$

$$L = \frac{\Phi_m}{I} = \frac{z \Phi'_m}{I} = \frac{zBS}{I} = \frac{z^2}{R_m}$$

$$L = \frac{\mu\mu_0 z^2 S}{l} = \mu\mu_0 z'^2 V$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko samoindukcji

$$E_s = -\frac{d}{dt}(LI)$$



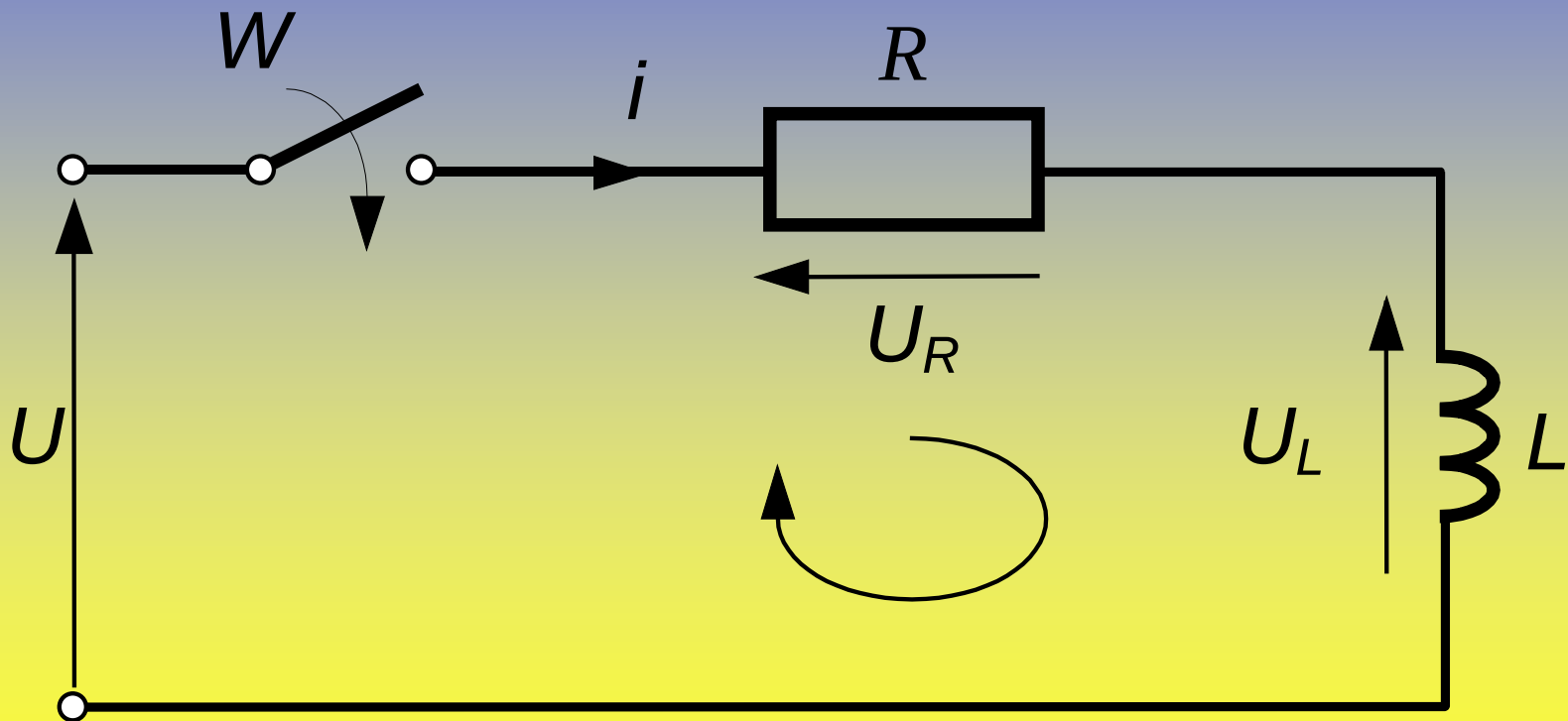
$$L \neq f(t)$$

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

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL
przy wymuszeniu stałym



$$U = Ri + u_L = Ri - E_s = Ri + L \frac{di}{dt}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL przy wymuszeniu stałym

$$i = i_u + i_p$$

składowa ustalona

składowa przejściowa

$$\frac{di_u}{dt} = 0 \Rightarrow i_u = \frac{U}{R}, \text{ gdy } t \rightarrow \infty$$


dla idealnej cewki
 $L \neq 0$ i $R_L = 0$

$$L \frac{di_p}{dt} + Ri_p = 0 \Rightarrow \frac{di_p}{i_p} = -\frac{R}{L} dt = -\frac{dt}{T}, \text{ gdy } t \rightarrow 0$$

$T = L/R$ — stała czasowa obwodu [s]

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL przy wymuszeniu stałym

$$\ln i_p = -\frac{t}{T} + \ln A \Rightarrow i_p = Be^{-\frac{t}{T}}$$

Warunek początkowy: $t = 0 \Rightarrow i(0-) = i(0) = i(0+) = 0$

$$i = \frac{U}{R} + Be^{-\frac{t}{T}} \xrightarrow{t=0} 0 = \frac{U}{R} + B \Rightarrow B = -\frac{U}{R}$$

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL przy wymuszeniu stałym

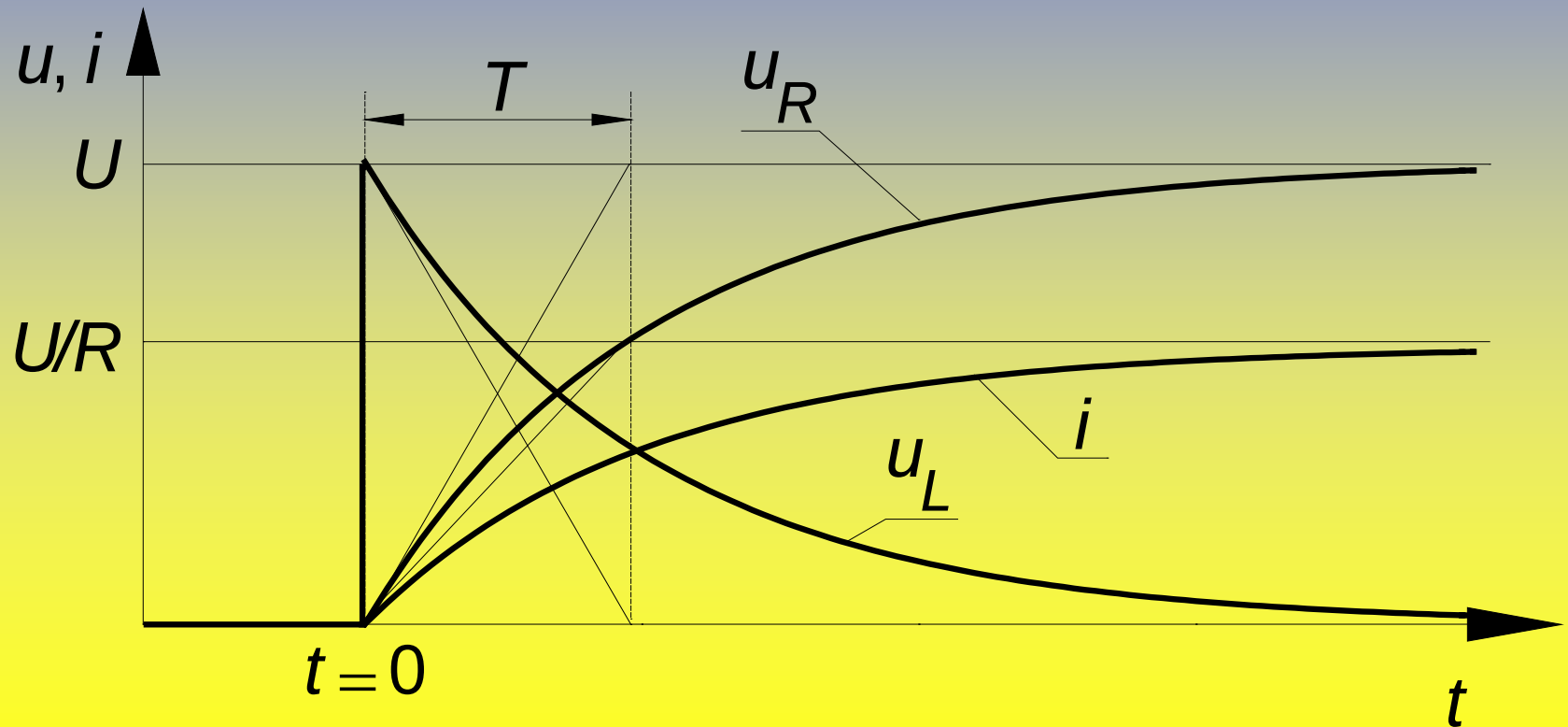
$$u_R = Ri = U \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = U e^{-\frac{t}{T}}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

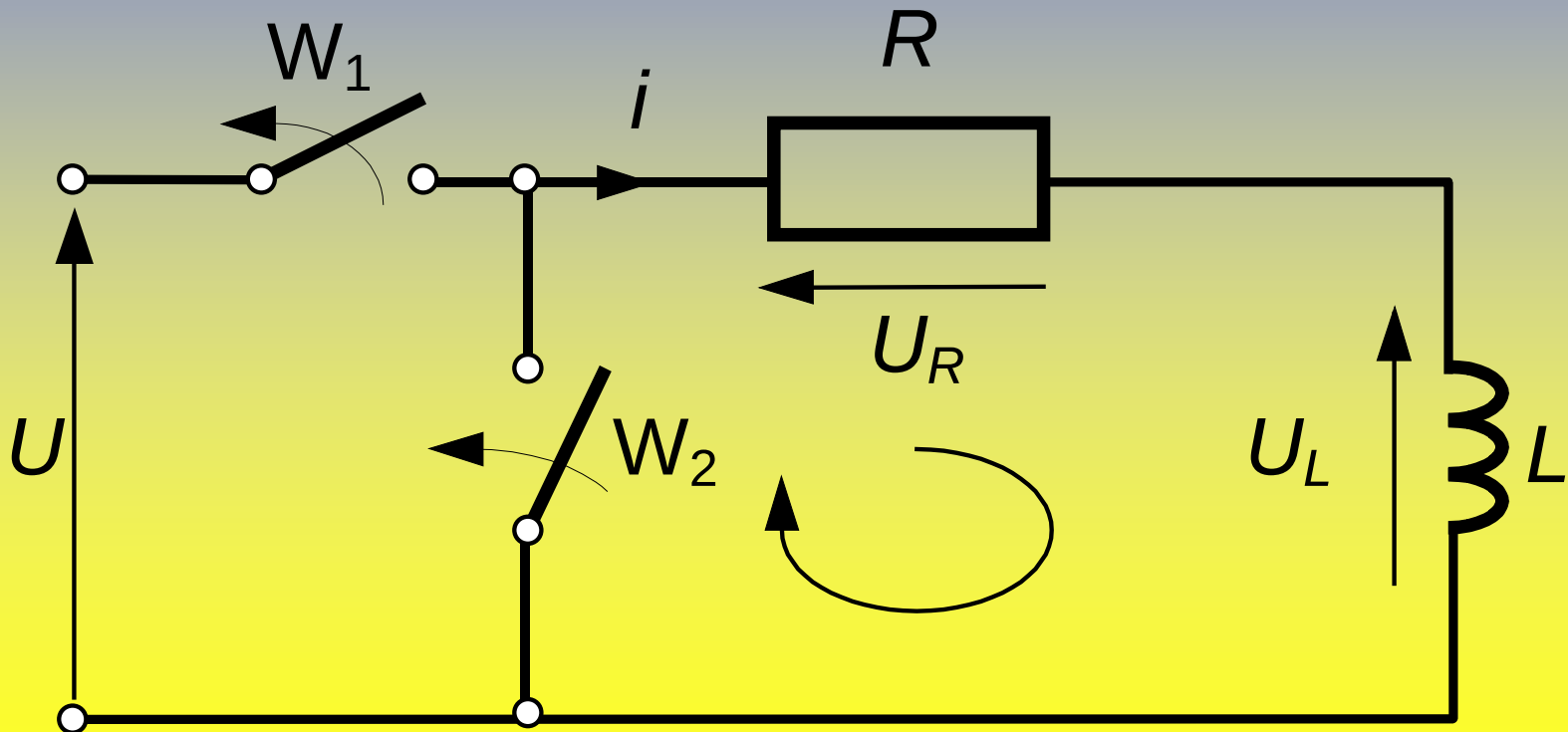
Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL przy wymuszeniu stałym



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL przy zwarciu



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL przy zwarcu

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0$$

$$\ln i = -\frac{t}{T} + \ln A \Rightarrow i = Be^{-\frac{t}{T}}$$

Warunek początkowy: $t = 0 \Rightarrow i(0-) = i(0) = i(0+) = U/R$

$$i = Be^{-\frac{t}{T}} \xrightarrow{t=0^+} \frac{U}{R} = B$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL przy zwarcu

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{T}}$$

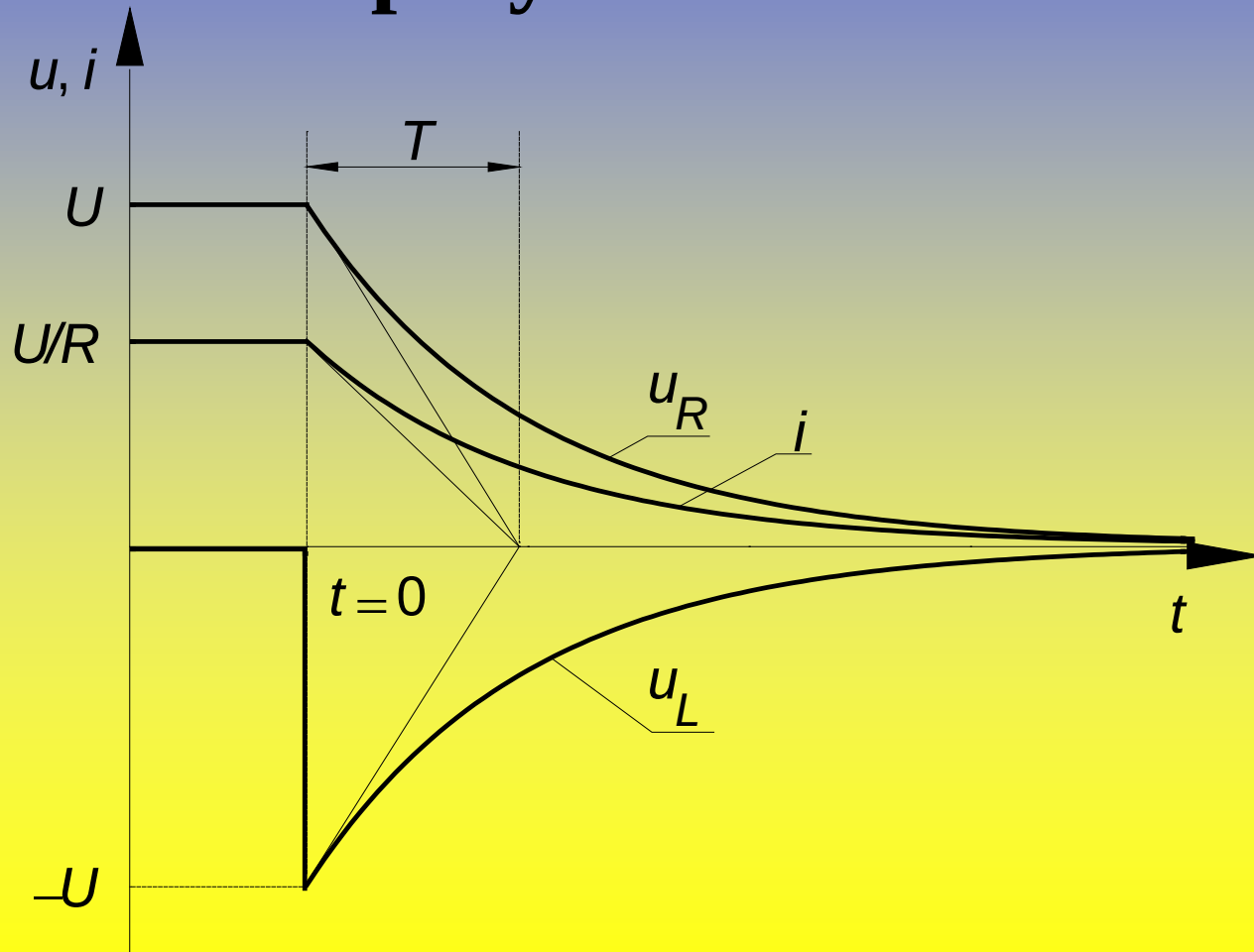
$$u_R = Ri = U e^{-\frac{t}{T}}$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -U e^{-\frac{t}{T}}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL przy zwarciu



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Stan przejściowy w gałęzi szeregowej RL przy zwarcu

Energia wydzielona na rezystorze

$$W = \int_0^{\infty} Ri^2 dt = \int_0^{\infty} R \left(\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{T}} \right)^2 dt = \frac{1}{2} L \left(\frac{U}{R} \right)^2 = \frac{1}{2} Li(0)^2$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko indukcji wzajemnej.

Indukcyjność wzajemna

$$e_2 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -z_2 \frac{d\Phi'_{12}}{dt}$$

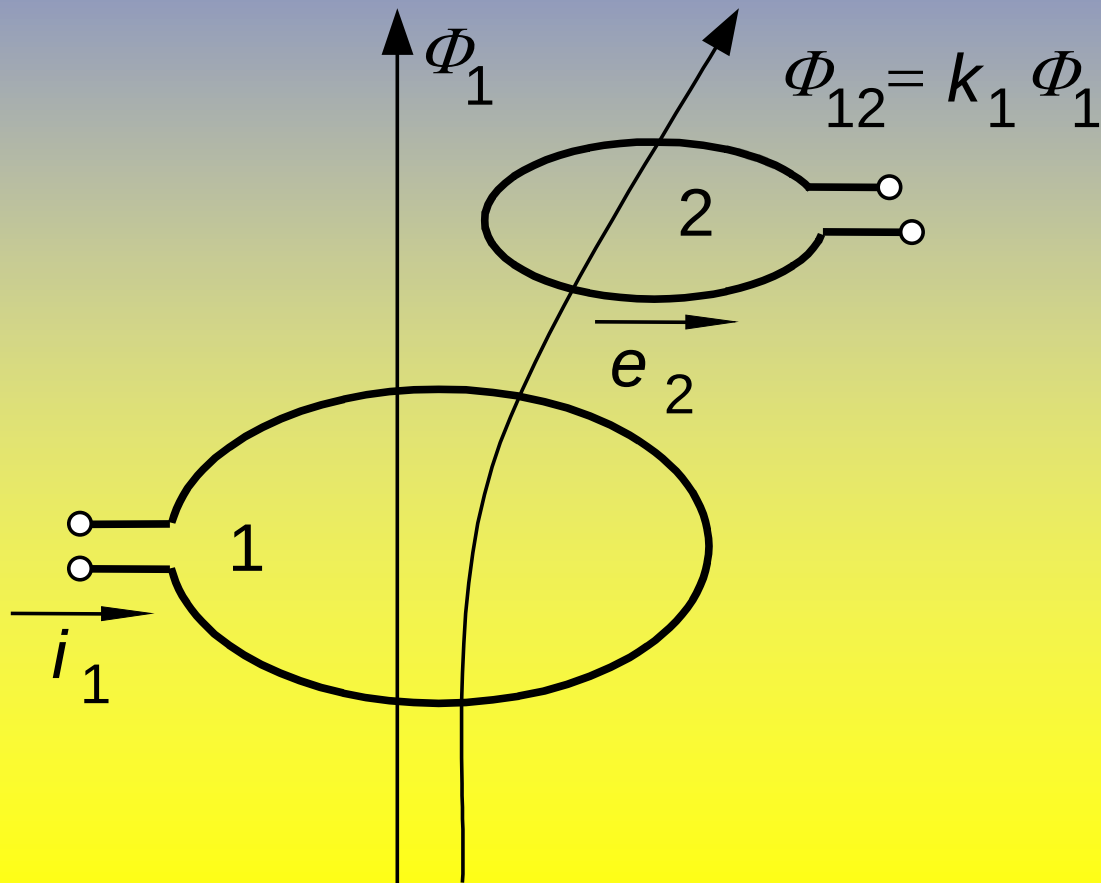
$$\Phi'_{12} = k_1 z_1 \Phi'_1 = k_1 \frac{z_1 \dot{I}_1}{R_{m1}}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko indukcji wzajemnej.

Indukcyjność wzajemna



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko indukcji wzajemnej.

Indukcyjność wzajemna

$$e_2 = -\frac{k_1 z_1 z_2}{R_{m1}} \frac{di_1}{dt} = -M_{12} \frac{di_1}{dt}$$

$$e_1 = -\frac{k_2 z_1 z_2}{R_{m2}} \frac{di_2}{dt} = -M_{21} \frac{di_2}{dt}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko indukcji wzajemnej.

Indukcyjność wzajemna

$$M_{12} = M_{21} = M$$

$$M_{12} = \sqrt{L_1 L_2}$$

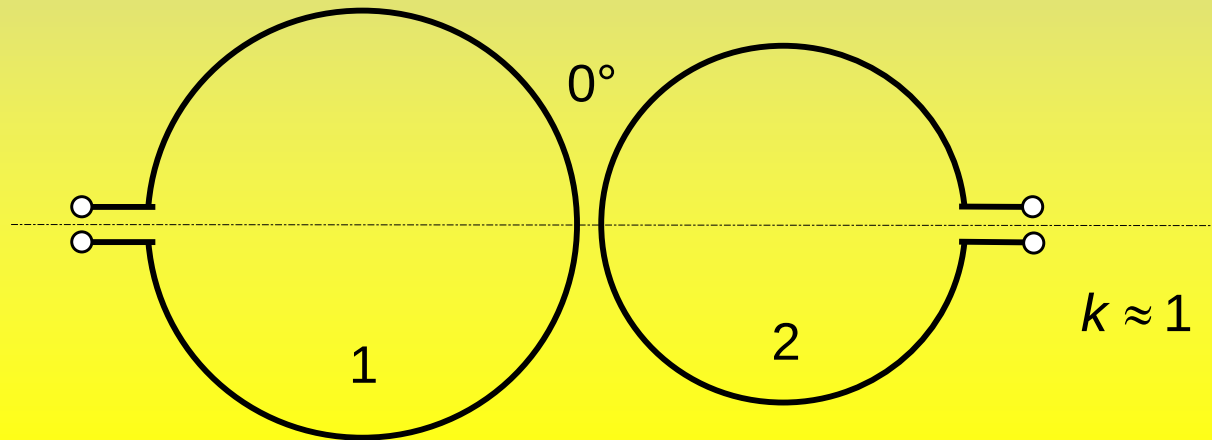
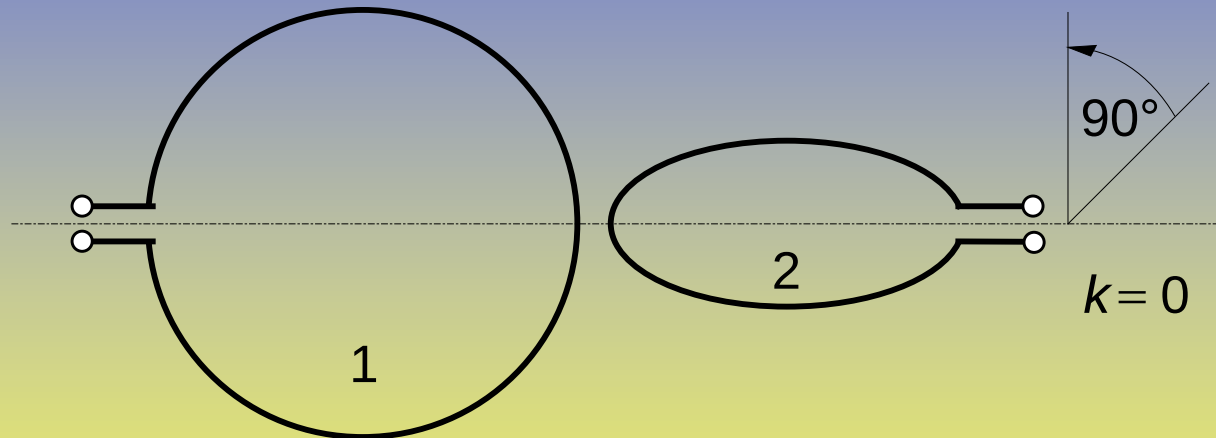
$$M_{12} = k \sqrt{L_1 L_2} \quad \text{oraz} \quad k = \sqrt{k_1 k_2}$$

Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko indukcji wzajemnej.

Indukcyjność wzajemna



Elektromagnetyzm.

Pole magnetyczne prądu stałego

Zjawisko indukcji wzajemnej.

Indukcyjność wzajemna

