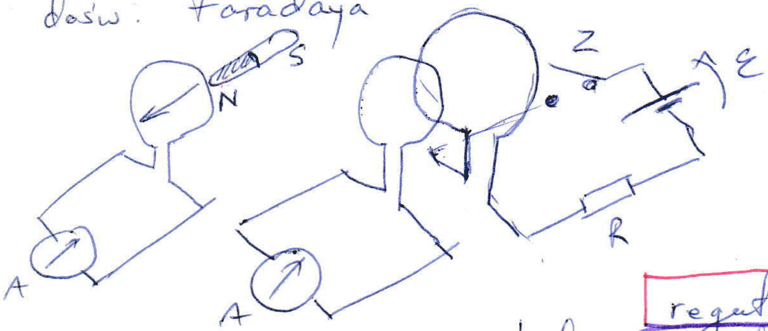
Indukcja magnetyczna

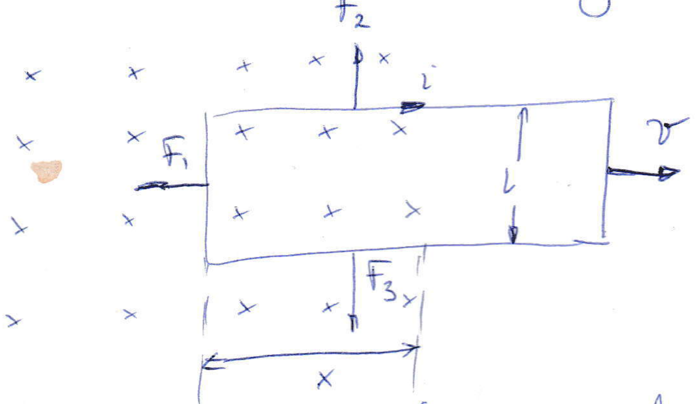
dośw. Faradaya



$$\boxed{\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}}$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{dB}{dt}\cdot S + B\frac{dS}{dt}$$

reguła Lenza: prąd indukowany ma taki zwrot, aby przeciwstawić się przyczynie, która go wywołała.



$$\Phi_B = Blx$$

$$\boxed{\mathcal{E} = -\frac{d}{dt}(Blx) = -Bl\frac{dx}{dt} = -Blv}$$

$\mathcal{E}$ – dynamiczna SEM

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{Blv}{R} \quad ; \quad \vec{F} = i\vec{l}\times\vec{B}$$

(1) przesuwanie ramki powoduje przepływ prądu i

(2) na przewodnik z prądem i działa siła $\vec{F} = i\vec{l}\times\vec{B}$

$$F_1 = ilB\sin 90^\circ = \frac{Blv}{R}lB = \frac{B^2l^2v}{R}$$

praca (moc)

$$\boxed{P = F_1 v = \frac{B^2l^2v^2}{R}}$$

Szybkość wydzielania się ciepła na oporze jak praca przy przesuwaniu ramki

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

Zmienne pole magnetyczne wywołuje pole elektryczne!

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \qquad \frac{dB}{dt}\,!$$

problem pola magnetycznego i względność ruchu!

- prądy Foucaulta (wirowe) – indukowane w płytach, blachach przewodzących umieszczonych w zmiennym polu magnetycznym (zgodnie z regułą Lenza utrudniając ruch przewodnika)
- wahadło Waltenhofena,
- hamulec elektromagnetyczny (wspomaga hamulec hydrauliczny)

Samoindukcja:

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} = \mu_0 n^2 l A$$

n – ilość zwojów na j. długości

solenoid: $B = \mu_0 n i$

$N\Phi_B = n l B A$

$N\Phi_B = (\mu_0 n i) n l A$

$$N\Phi_B = \mu_0 n^2 l A i$$

Prawo Faradaya

$$\boxed{\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}} = \oint \vec{E}\cdot d\vec{l} \qquad \mathcal{E} = -\left[\frac{dB}{dt}S + B\frac{dS}{dt}\right]$$

samoindukcja — SEM wskutek płynącego prądu w tej samej cewce

$N\Phi_B \sim i$

$$\frac{d\Phi_B^{tot}}{dt} = L\frac{di}{dt} \qquad L = \text{const} \quad (\text{indukcyjność})$$

— symbol cewki

L

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

cewka indukcyjna

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l}$$

lewo

μ – przenikalność magnet. materiału

$$1\,H = \frac{1V\cdot 1s}{1A}$$

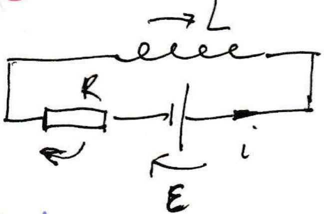
$$\Updownarrow$$

$$C = \varepsilon\varepsilon_0\frac{S}{d}$$

przewód prostoliniowy $\quad L = \mu\left[\ln\left(\frac{2l}{r}\right) - 0.75\right]\frac{l}{2\pi}$

Obwód RL

każdy obwód ma pewną L i R



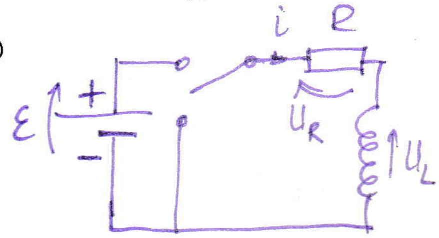
$$\mathcal{E} = iR + U_L \qquad U_L = +L\frac{di}{dt}$$

$$\mathcal{E} = iR + L\frac{di}{dt} \quad \text{lub} \quad U_R = \mathcal{E} - L\frac{di}{dt}$$

"rozładowanie" $\quad iR + L\frac{di}{dt} = 0 \qquad \int\frac{di}{i} = -\int\frac{R}{L}dt \qquad \tau = \frac{L}{R}$

$$\ln(i) = -\frac{t}{\tau} + C \qquad i(0) = 0$$

$$\boxed{i(t) = Ce^{-\frac{t}{\tau}}} \qquad U = iR$$



$$Ce^{-\frac{t}{\tau}}R + L\frac{1}{\tau}Ce^{-\frac{t}{\tau}} + LC'e^{-\frac{t}{\tau}} = \mathcal{E}$$

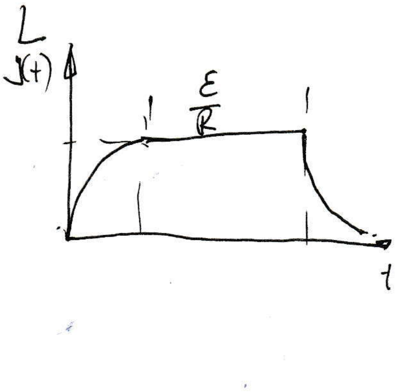
$$\mathcal{E} = \cancel{CRe^{-\frac{t}{\tau}}} - \cancel{L}\frac{R}{\cancel{L}}\cancel{Ce^{-\frac{t}{\tau}}} + LC'e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow C' = \frac{\mathcal{E}}{L}e^{\frac{t}{\tau}}$$

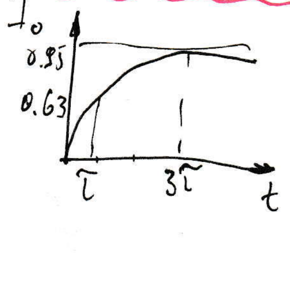
$$C = \frac{\mathcal{E}}{L}\frac{L}{R} = \frac{\mathcal{E}}{R} \qquad C = \frac{\mathcal{E}}{L}\tau e^{\frac{t}{\tau}}$$

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}}{\cancel{R}}\cancel{e^{\frac{t}{\tau}}}(+ Ce^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\boxed{i(t) = \frac{\mathcal{E}}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \qquad U_R = i(t)R = \mathcal{E}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$\boxed{U_L = +L\frac{di}{dt} = \pm\frac{\mathcal{E}}{R}\cancel{L}\frac{R}{\cancel{L}}e^{-\frac{t}{\tau}}} \qquad i(t) = i_0\left(1 - e^{-\frac{\tau}{t}}\right)$$





$$i(\tau) = i_0\left(1 - \frac{1}{e}\right) = $$

$$= i_0\left(\frac{e-1}{e}\right) = i_0\frac{2.71-1}{2.71} = 0.6$$

$$\frac{i(\tau)}{i_0} = \boxed{0.65}$$

Wyłączanie

$$\boxed{\begin{aligned} i(t) &= i_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \\ u(t) &= u_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned}}$$

$$\begin{cases} U_L = L\frac{di}{dt} = -\mathcal{E} e^{-\frac{t}{\tau_L}} \\ U_R = \mathcal{E} e^{-\frac{t}{\tau_L}} \end{cases}$$

Energia zmagazynowana w polu cewki

$$W = -\int_0^\infty I U_{ind}\, dt = \int_0^\infty I L \frac{di}{dt}\, dt = \int_0^{i_0} L i\, di = \boxed{\frac{1}{2} L i_0^2}$$

do pokonania ~~energii~~ indukcji napięcia indukowanego

$$U_{ind} = -L\frac{di}{dt}$$

gęstość energii pola magnetycznego

$$u_B = \frac{dW}{dV} = \frac{\frac{1}{2} L i_0^2}{S l} = \frac{\frac{1}{2} \mu N^2 \cancel{S} i_0^2}{\cancel{S} l^2} \qquad \boxed{L = \mu \frac{N^2 S}{l}}$$

$W = \frac{1}{2}$

z prawa Ampère'a dla cewki $\boxed{B = \mu_0 N i_0}$

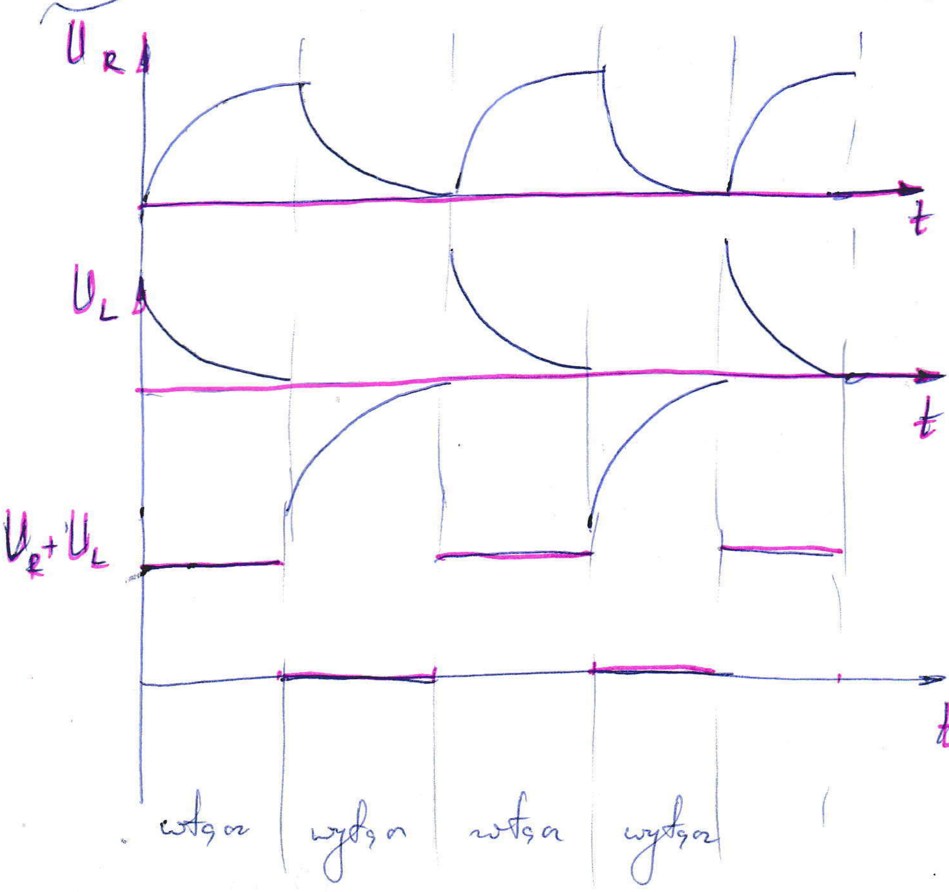
$$\mu N^2 i_0^2 = \frac{B^2}{\mu} \Rightarrow \boxed{u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}} \text{ dla próżni}$$

$$\cancel{u_B = B^2} \qquad B = \mu_r \mu_0 H \qquad \boxed{\mu = \mu_r \mu_0}$$

dla cewki z rdzeniem $\boxed{u_B = \frac{B^2}{2\mu}}$

$u_E = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$ (podobny wzór)

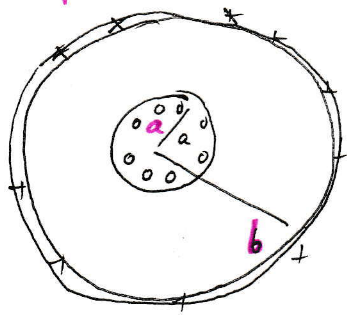
gęstość energii pola B



$$L\frac{di}{dt} + iR = \mathcal{E}$$

(przykład gęstości energii pola B)

Kabel koncentryczny



$$u_B = \frac{1}{2\mu_0}B^2 = \frac{1}{2\mu_0}\left(\frac{\mu_0 i}{2\pi r}\right)^2 = \frac{\mu_0 i^2}{8\pi^2 r^2}$$

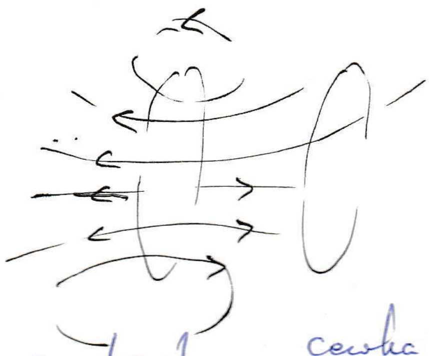
$$dU = u_B\, dV = \cancel{2\mu_0}\frac{\mu_0 i^2}{8\pi^2 r^2} 2\pi r l\, dr$$

$$dU = \frac{\mu_0 i^2 l}{4\pi}\frac{dr}{r} \qquad U = \int dU = \frac{\mu_0 i^2 L}{4\pi}\int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 i^2 L}{4\pi}\ln\frac{b}{a}$$

$$U_B = \frac{1}{2}Li^2 \Longleftrightarrow U_E = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$$

$$\boxed{L = \frac{2U}{i} = \frac{\mu_0 L}{2\pi}\ln\frac{b}{a}}$$

Indukcja wzajemna



$$\boxed{M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{i_1} \qquad L = \frac{N\Phi_B}{i}}$$

$$M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{i_1}$$

$$M_{21} i_1 = N_2 \Phi_{21}$$

$$M_{21}\frac{di_1}{dt} = N_2\frac{d\Phi_{21}}{dt}$$

cewka 1
N_1 (zwoje)
i_1 (prąd)

cewka 2
N_2 (zwoje)
i_2 (prąd)

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

$$\boxed{\begin{aligned} \mathcal{E}_2 &= -M_{21}\frac{di_1}{dt} & \mathcal{E}_1 &= -M_{12}\frac{di_2}{dt} \\ \mathcal{E}_2 &= -M\frac{di_1}{dt}\ ; & \mathcal{E}_1 &= -M\frac{di_2}{dt} \end{aligned}}$$

Własności magnetyczne (1)

$\vec{B} = \mu \vec{H}$ $\qquad \mu = \mu_r \mu_0$

$L_s = \frac{1}{2}\hbar$

$L_s = 0.527 \times 10^{-34}\ J \cdot s$

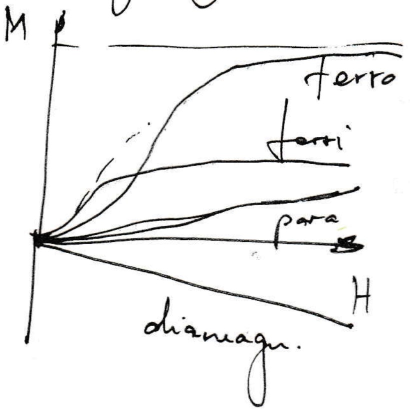
magnesowanie pod wpływem pola $\vec{H}$

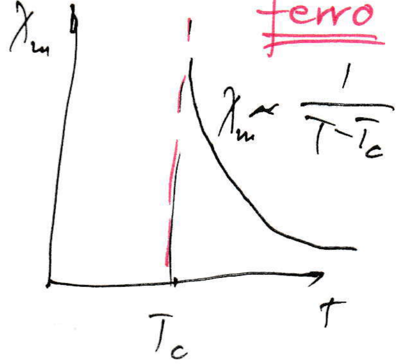
$$\boxed{\vec{M} = \chi_m \vec{H}}$$

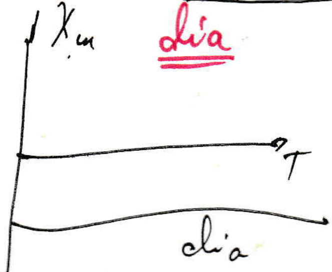
podatność magnetyczna

podział materiałów

diamagnetyki $\qquad$ paramagnetyki $\qquad$ ferromagnetyki

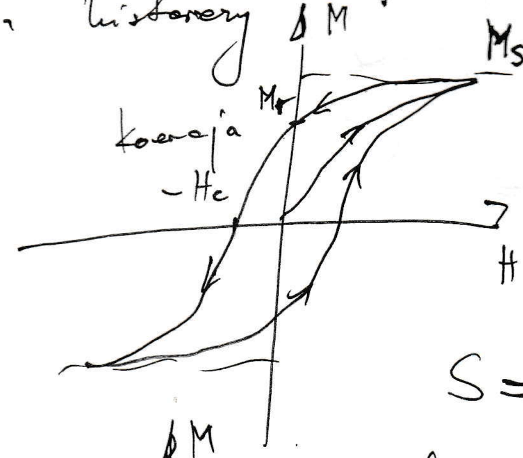






$\chi_m < 0$ wypychane z pola

pętla histerezy



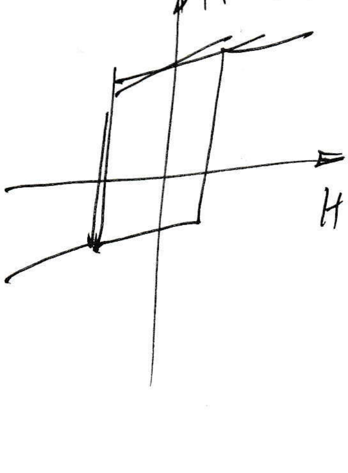
nasycenie

M_r – namagnesowanie szczątkowe

H_c – pole koercji

miękkie ferro – wąskie

$S = \oint M\,dH$ – praca



do pamięci komputerowych !

stroma ale duże pole H_c

Namagnesowanie $\qquad \vec{M} = \frac{\vec{\mu}}{V}$

Własności materii (2)

$$\Phi_B = \oint \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0$$

i – A

orbitalny moment dipolowy

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = \frac{m v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m r}}$$

$$\omega = \frac{v}{r} = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m r^3}}$$

$$\mu_L = i A = e v \pi r^2 = \frac{e^2}{4}\sqrt{\frac{r}{\pi\varepsilon_0 m}} \quad [\mu = -g\mu_B m]$$

diamagnetyzm

$$F = m\omega_0^2 r$$

$$F_B = e v B$$

lub $\vec{F}_B = q(\vec{v}\times\vec{B})$

moment pędu $L_L = m v r$

$$L_L = \sqrt{\frac{e^2 m r}{4\pi\varepsilon_0}}$$

$$\boxed{\mu_L = L_L\frac{e}{2m}}$$

spinowy

$$\mu_S = \pm\frac{1}{2}\hbar$$

$$\mu = N i A = 1 e \cancel{v}\pi r^2 = \frac{e\omega}{2\pi}\pi r^2 = \frac{1}{2}e r^2\omega$$

Trzy wektory magnetyczne

$$\boxed{\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0(i + i_M)}$$

$$\boxed{\vec{B} = \mu_0\vec{H} + \mu_0\vec{M}}$$

$$\oint \vec{H}\cdot d\vec{l} = i$$

$$\vec{B} = \mu_T\mu_0\vec{H} \quad (\text{dia} + \text{para})$$

$$\vec{M} = (\varkappa_m - 1)\vec{H}$$

Nazwa	Symbol	Związek	Uwagi
indukcja mag.	$\vec{B}$	z wszelkie prądy	
natężenie	$\vec{H}$	tylko prądy przewodz.	
magnetyzacja	$\vec{M}$	prądy magnes.	znika w próżni
	$\vec{F} = q\vec{v}\times\vec{B}$ $\vec{F} = i\vec{l}\times\vec{B}$ $\vec{B} = \mu_0\vec{H} + \mu_0\vec{M}$ $\oint\vec{H}\cdot d\vec{l} = i$		
empiria	$\vec{B} = \mu_T\mu_0\vec{H}$ $\vec{M} = (\mu_T - 1)\vec{H}$	paramagnet + diamagnet.	

moment magnet.

$$\mu = -\mu_B g m$$

$$\mu_L = g_L\mu_B\sqrt{L(L+1)}$$

$$\mu_S = g_S\mu_B\sqrt{S(S+1)}$$