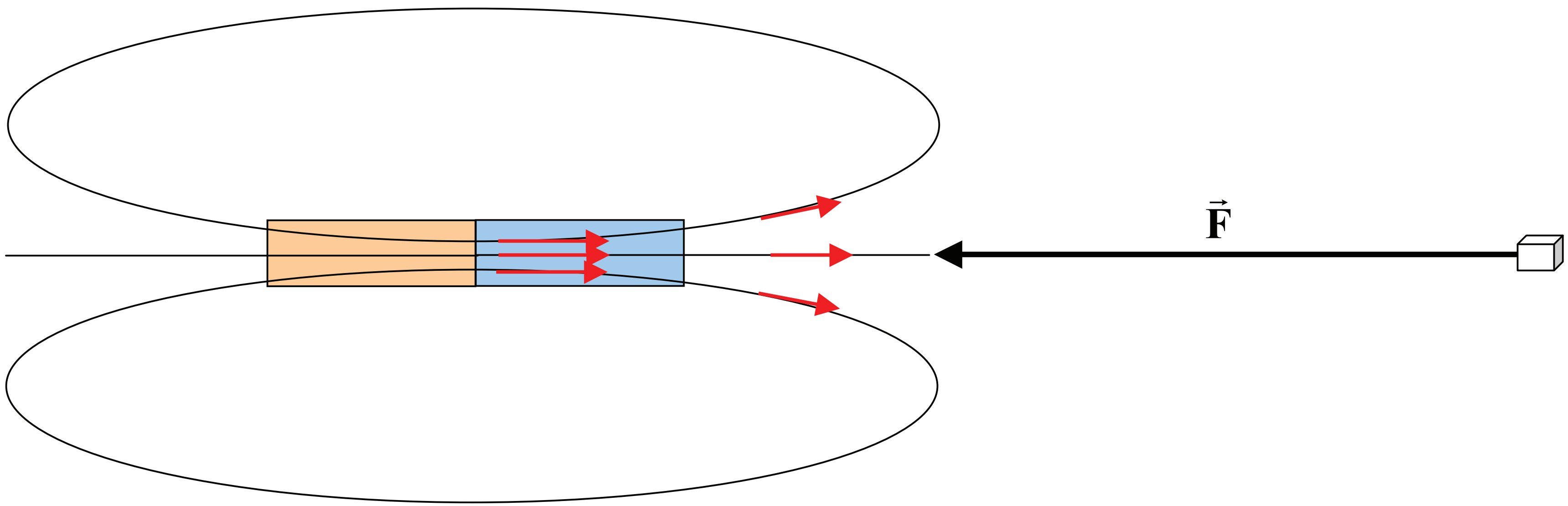
Ferromagnetyzm

zjawisko występowania spontanicznego namagnesowania (nawet w zerowym polu $\vec{H}$).
Wyjaśniamy to istnieniem bardzo silnego sprzężenia między spinowymi (czasem też orbitalnymi) momentami magnetycznymi elektronów, które mają tendencję do ustawiania się równolegle w jednym kierunku. Jest to dla nich korzystne energetycznie.
Przykłady: Fe, Co, Ni, Dy, Gd, ich związki i stopy, niektóre stopy pierwiastków nieferromagnetycznych, np. Cu_2MnAl, niektóre tlenki pierwiastków nieferromagnetycznych, np. EuO.

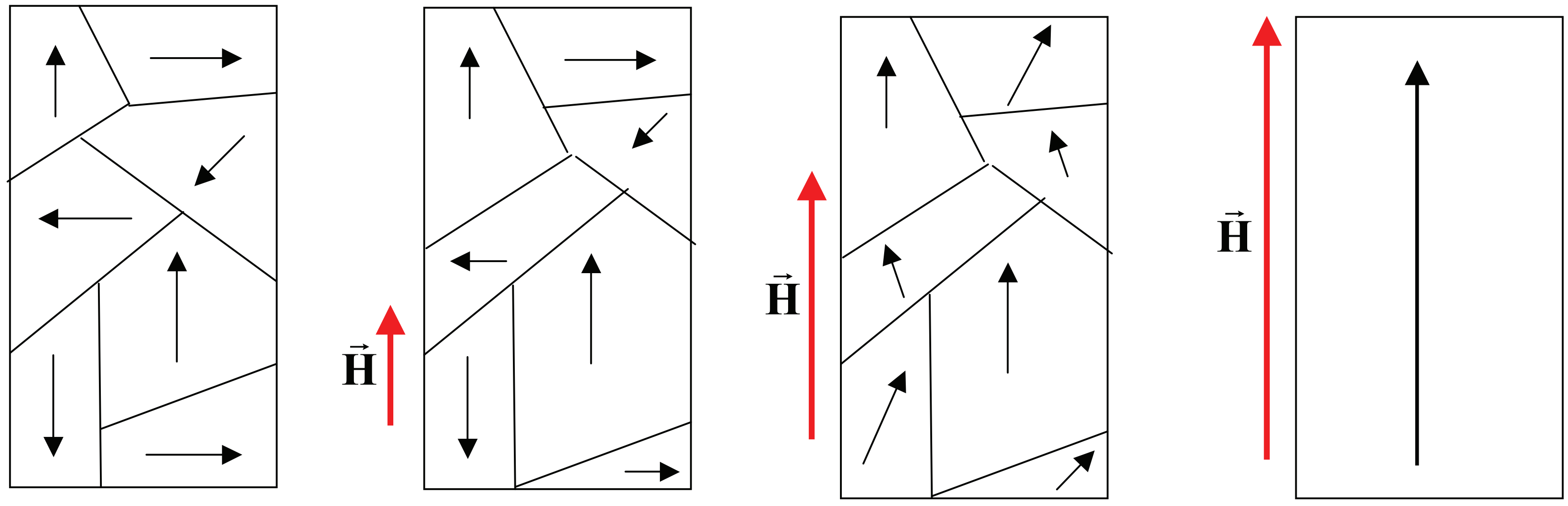
Test doświadczalny:

1. **uzyskiwanie bardzo dużego momentu magnetycznego nawet w słabym polu (duża χ)**
2. **bardzo silne wciąganie w obszar większego pola**



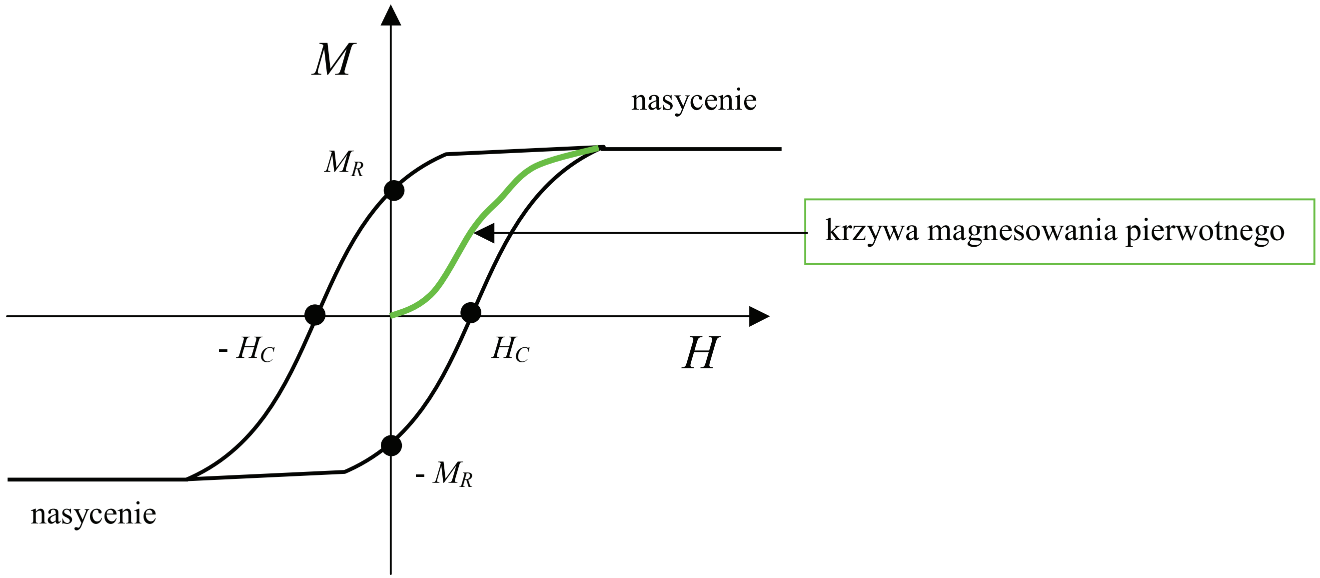
Problem: dlaczego kawałek żelaza na ogół nie jest magnesem, chociaż Fe jest ferromagnetykiem?

Samorzutne uporządkowanie spinowych momentów magnetycznych zachodzi w małych obszarach, zwanych domenami. Momenty magnetyczne domen skierowane są całkowicie przypadkowo. Ich suma wektorowa jest równa zeru.



$\vec{H} = 0$ **słabe pole** **silne pole** **pole nasycające**

Po wyłączeniu pola stan nasycenia się nie utrzyma, ale pozostanie różne od zera namagnesowanie. Otrzymamy magnes trwały. Pełny cykl przemagnesowania opisuje pętla histerezy.



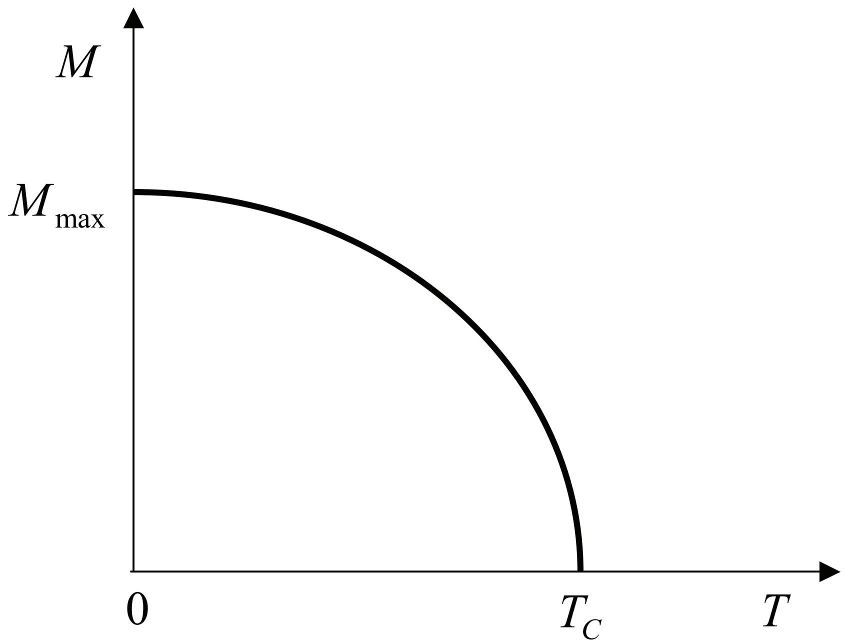
Pętla histerezy

M_R **- pozostałość magnetyczna (remanencja)**

H_C **- pole koercji**

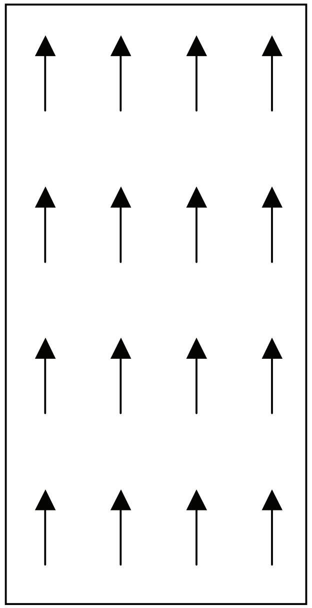
Pole wewnątrz pętli jest miarą pracy na przemagnesowanie (w jednym cyklu).

Zależność namagnesowania od temperatury wewnątrz jednej domeny

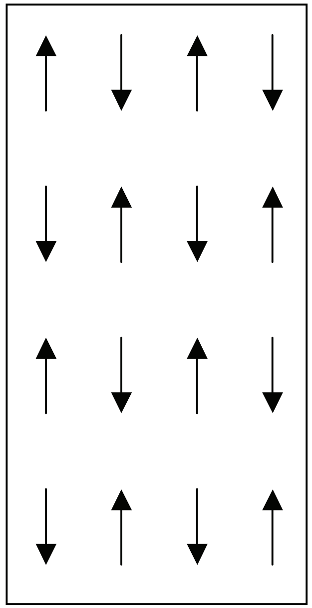


- **idealne uporządkowanie (maksymalne namagnesowanie) jest możliwe tylko w T=0**
- **ze wzrostem temperatury uporządkowanie zmniejsza się**
- **istnieje temperatura krytyczna T_C , w której namagnesowanie spontaniczne spada do zera**
- **powyżej T_C ferromagnetyk staje się paramagnetykiem**
- **T_C nazywamy temperaturą Curie**

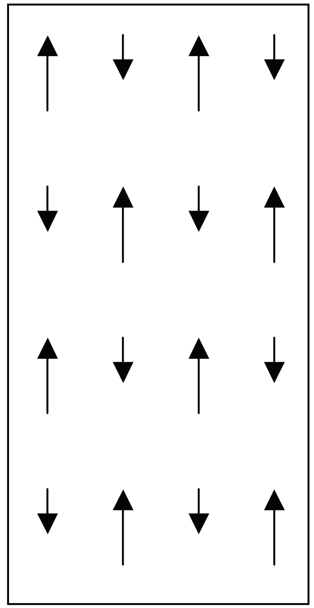
Niektóre rodzaje uporządkowania magnetycznego
(rysunki dla $T \approx 0$)



ferromagnetyk
(np. Fe, Co, Ni)



antyferromagnetyk
(np. Cr, FeO)

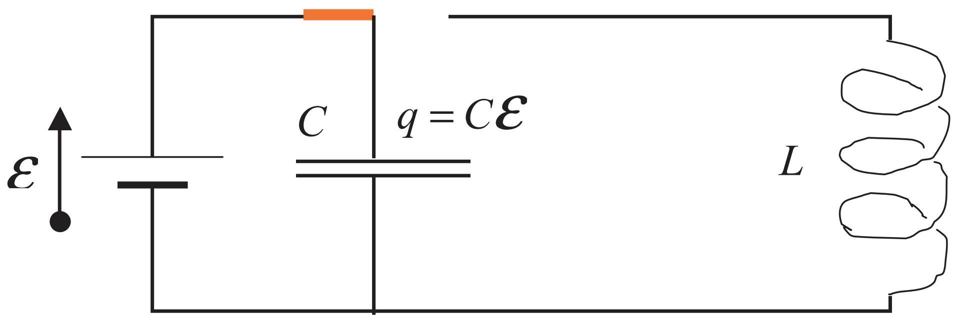


ferrimagnetyk
(niektóre ferryty,
tj. $MO \cdot Fe_2O_3$,
m. in. magnetyt,
Fe_3O_4)

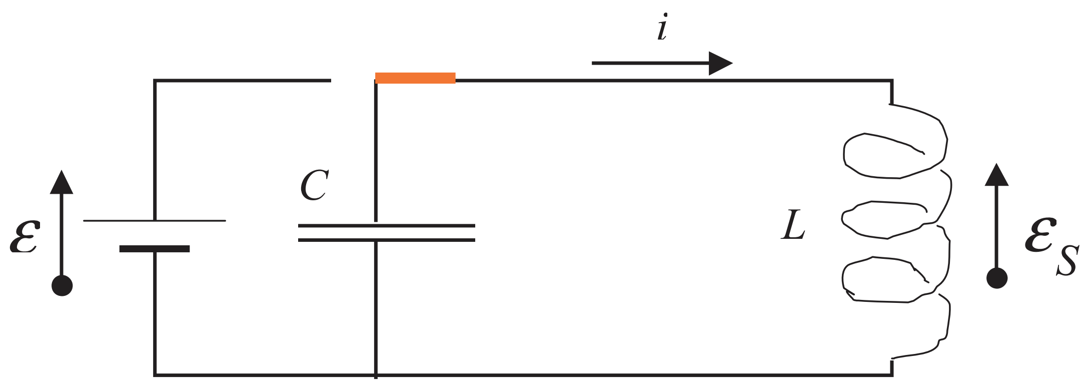
Wszystkie mają zastosowanie techniczne: w elektrotechnice, radiotechnice i technice komputerowej.

Obwód LC

a) ładowanie pojemności C



b) rozładowanie pojemności C przez indukcyjność L



$$\frac{q}{C} + \mathcal{E}_S = 0$$

$$\frac{q}{C} - L\frac{di}{dt} = 0$$

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

$$L\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{C} = 0$$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0$$

analogia mechaniczna:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$$

$$x = A\cos(\omega t + \varphi)$$

rozwiązanie naszego problemu:

$$q = q_{\max}\cos(\omega t + \varphi)$$

gdzie

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \qquad q_{\max} = C\mathcal{E}$$

fazę początkową wyznaczamy z warunków początkowych:

$$q = q_{\max} = C\mathcal{E} \ \textbf{dla}\ t = 0\textbf{, stąd}\ \varphi = 0$$

Ładunek na kondensatorze wykonuje drgania harmoniczne nietłumione, a więc niegasnące:

$$q = q_{\max}\cos(\omega t)$$

podobnie napięcie na kondensatorze

$$U = \frac{q_{\max}}{C}\cos(\omega t) = \mathcal{E}\cos(\omega t)$$

natężenie prądu

$$i = -\frac{dq}{dt} = q_{\max}\omega\sin(\omega t) = \frac{C\mathcal{E}}{\sqrt{LC}}\sin(\omega t) = \mathcal{E}\sqrt{\frac{C}{L}}\sin(\omega t)$$

SEM samoindukcji

$$\mathcal{E}_S = -L\frac{di}{dt} = -Lq_{\max}\omega^2\cos(\omega t) = -LC\mathcal{E}\frac{1}{LC}\cos(\omega t) = -\mathcal{E}\cos(\omega t) = -U$$

Przemiany energetyczne w obwodzie LC

Energia pola elektrycznego zgromadzona jest w kondensatorze

$$U_E = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} = \frac{1}{2}\frac{q_{\max}^2}{C}\cos^2(\omega t)$$

Energia pola magnetycznego zgromadzona jest w solenoidzie

$$U_B = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}Lq_{\max}^2\omega^2\sin^2(\omega t) = \frac{1}{2}Lq_{\max}^2\frac{1}{LC}\sin^2(\omega t) == \frac{1}{2}\frac{q_{\max}^2}{C}\sin^2(\omega t)$$

Energie oscylują, są przesunięte w fazie o $\frac{\pi}{2}$. Suma tych energii jest stała:

$$U_E + U_B = \frac{1}{2}\frac{q_{\max}^2}{C} = const$$

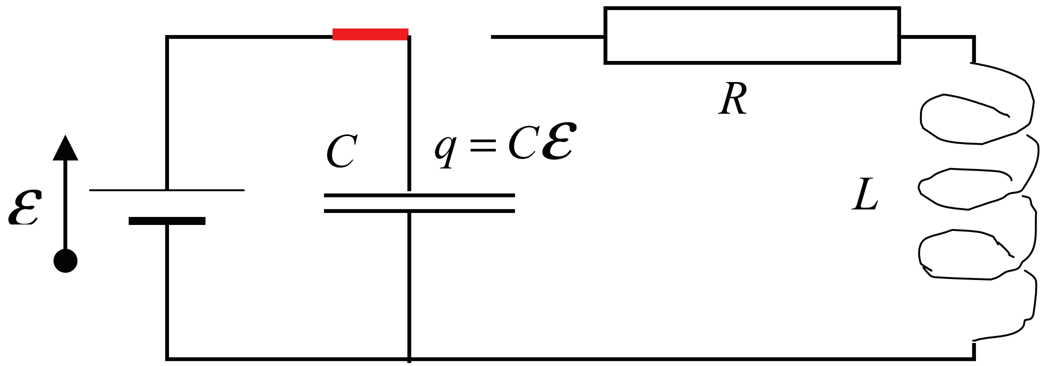
Jest to idealizacja. W rzeczywistych obwodach zawsze występują straty energii.

Przyczyny:

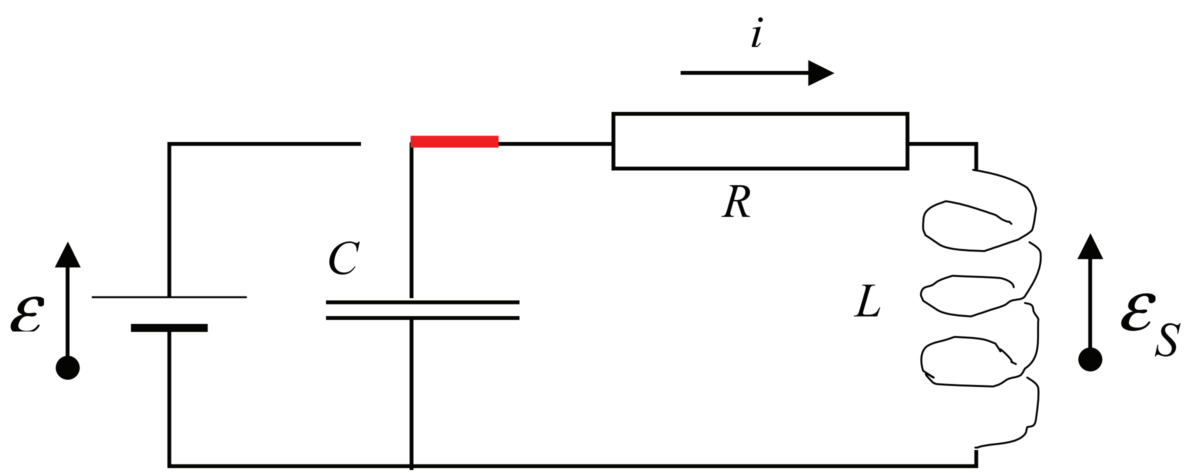
1. **opór elektryczny**
2. **promieniowanie.**

Obwód RLC – drgania gasnące

a) ładowanie pojemności C



b) rozładowanie pojemności C przez indukcyjność L i opór R



$$\frac{q}{C} - iR + \mathcal{E}_S = 0$$

$$\frac{q}{C} - iR - L\frac{di}{dt} = 0$$

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

$$L\frac{d^2q}{dt^2} + R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0$$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}q = 0$$

analogia mechaniczna:

$$\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{\gamma}{m}\frac{dx}{dt}+\omega^2x=0$$

$$x=A\mathrm{e}^{-\frac{\gamma}{2m}t}\cos(\omega' t+\varphi)$$

rozwiązanie naszego problemu:

$$q=q_{\max}\mathrm{e}^{-\frac{R}{2L}t}\cos(\omega' t+\varphi)$$

gdzie

$$\omega'=\sqrt{\frac{1}{LC}-\left(\frac{R}{2L}\right)^2},\qquad q_{\max}=C\mathcal{E}$$

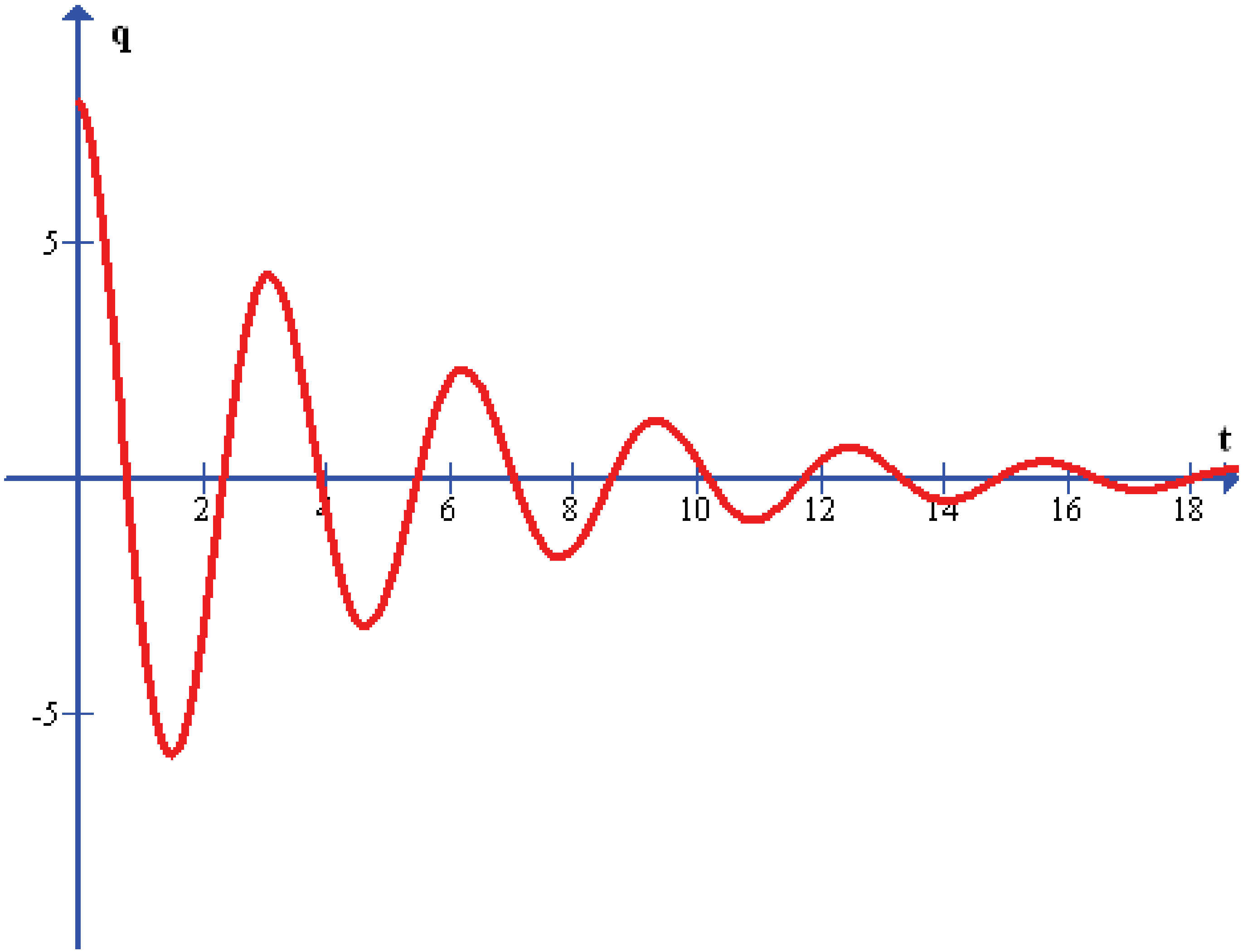
fazę początkową wyznaczamy z warunków początkowych:

$$q=q_{\max}=C\mathcal{E}\ \textbf{dla}\ t=0\textbf{, stąd}\ \varphi=0$$

Ładunek na kondensatorze wykonuje drgania harmoniczne tłumione, a więc gasnące:

$$q=q_{\max}\mathrm{e}^{-\frac{R}{2L}t}\cos(\omega' t)$$

analogicznie napięcie na kondensatorze, natężenie prądu, SEM samoindukcji.

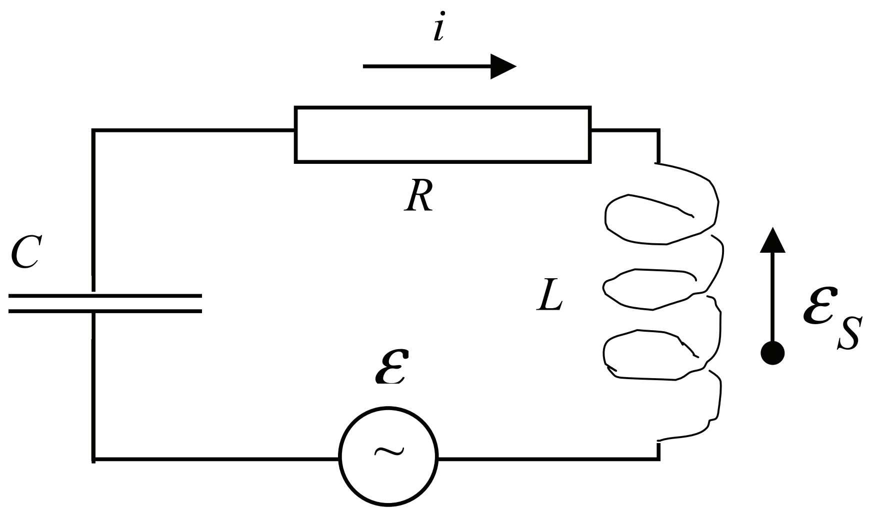


Zależność $q(t)$ w obwodzie RLC

Energia pola elektromagnetycznego zgromadzona w obwodzie maleje (straty na ciepło Joule'a). Dla podtrzymania drgań potrzebne jest zasilanie zewnętrzną SEM.

Obwód RLC zasilany zewnętrzną SEM

SEM musi być zmienna, gdyż pojemność stanowi nieskończony opór dla prądu stałego



$$L\frac{d^2q}{dt^2}+R\frac{dq}{dt}+\frac{q}{C}=\mathcal{E}(t)$$

Załóżmy SEM harmoniczną

$$L\frac{d^2q}{dt^2}+R\frac{dq}{dt}+\frac{q}{C}=\mathcal{E}\cos(\omega'' t)$$

Rozwiązanie naszego problemu jest sumą szczególnego rozwiązania tego równania i ogólnego rozwiązania dla obwodu RLC z $\mathcal{E}$=0:

$$q=q_{\max}\mathrm{e}^{-\frac{R}{2L}t}\cos(\omega' t)$$

które szybko zanika. Zostaje rozwiązanie szczególne:

$$q = \frac{\mathcal{E}}{G}\sin(\omega'' t - \varphi)$$

gdzie

$$G = \omega''\sqrt{\left(\omega'' L - \frac{1}{\omega'' C}\right)^2 + R^2}$$

$$\varphi = \arccos\frac{R\omega''}{G}$$

Natężenie prądu

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{\omega''\mathcal{E}}{G}\cos(\omega'' t - \varphi) = i_{\max}\cos(\omega'' t - \varphi)$$

$$i_{\max} = \frac{\omega''\mathcal{E}}{G} = \frac{\mathcal{E}}{\sqrt{\left(\omega'' L - \frac{1}{\omega'' C}\right)^2 + R^2}}$$

Opór uogólniony (zawada)

$$Z = \sqrt{\left(\omega'' L - \frac{1}{\omega'' C}\right)^2 + R^2}$$

jest najmniejszy

$$Z = R$$

jeśli spełniony jest warunek

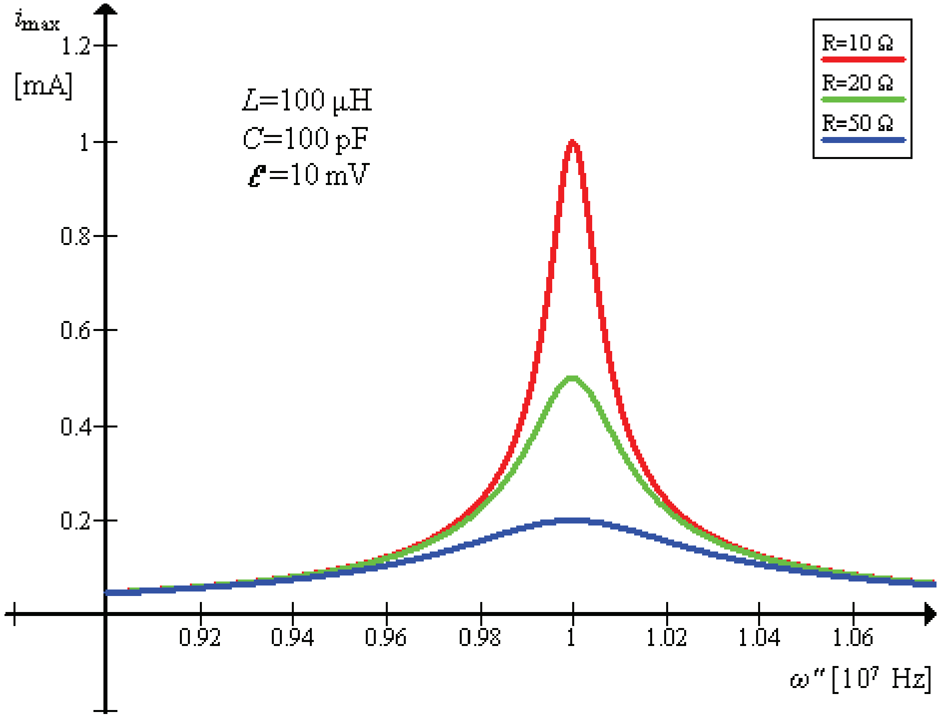
$$\omega'' L - \frac{1}{\omega'' C} = 0$$

$$\omega'' L = \frac{1}{\omega'' C}$$

$$\omega'' = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega$$

Jest to warunek rezonansu. Amplituda natężenia prądu osiąga wtedy wartość maksymalną

$$i_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{R}$$



Jest to rezonans natężenia.

Dla tej samej wartości ω'' zachodzi również rezonans napięć.

Na pojemności:

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{\mathcal{E}}{GC}\sin(\omega'' t - \varphi)$$

$$U_{C\max} = \frac{\mathcal{E}}{GC}$$

Na indukcyjności

$$U_L = L\frac{d^2 q}{dt^2} = -L\frac{\mathcal{E}}{G}\omega''^2 \sin(\omega'' t - \varphi)$$

$$U_{L\max} = L\frac{\mathcal{E}}{G}\omega''^2$$

w rezonansie

$$\omega'' = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$G = \omega'' R$$

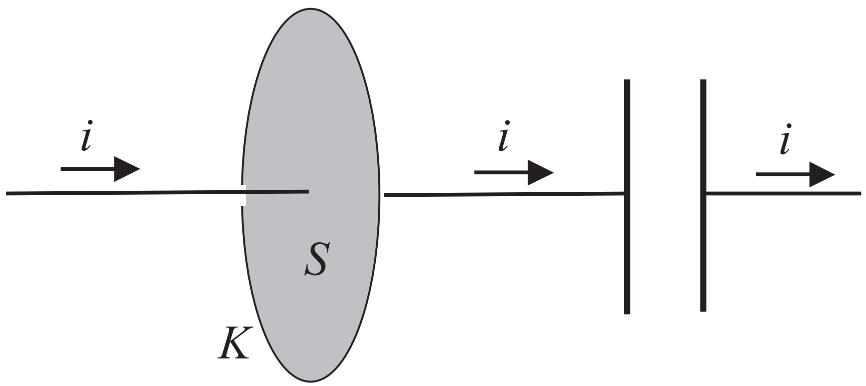
$$G = \frac{R}{\sqrt{LC}}$$

$$U_{C\max} = U_{L\max} = \frac{\mathcal{E}}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

$\frac{\mathcal{E}}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$ **może być dużo większe niż $\mathcal{E}$**

Uzupełnione prawo Ampera

Obwody z pojemnością stwarzają pewien problem matematyczny



Prawo Ampere'a:

$$\oint_K \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 i$$

Twierdzenie matematyczne:

$$\oint_K \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \int_S \mathrm{rot}\, \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{S}}$$

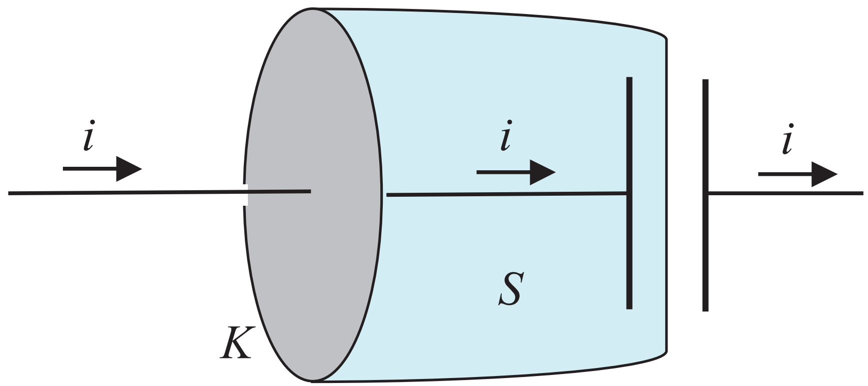
dla każdej powierzchni S napiętej na krzywej K, gdzie

$$\mathrm{rot}\, \vec{\mathbf{B}} \equiv \nabla \times \vec{\mathbf{B}} \equiv \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z},\ \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x},\ \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right)$$

Stąd

$$\int_S \mathrm{rot}\, \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{S}} = \mu_0 i$$

gdzie i jest prądem przepływającym przez powierzchnię S.



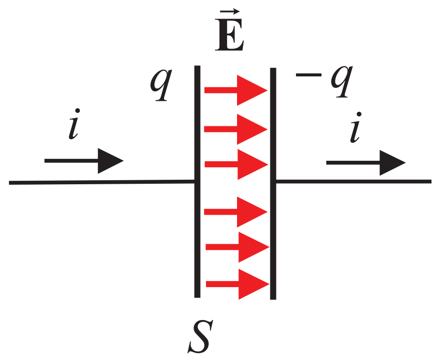
Tutaj ten prąd = 0. Natomiast całka $\neq$0.
Poprawka Maxwella dla obszaru między okładkami:

$$\int_S \text{rot}\,\vec{\mathbf{B}}\cdot d\vec{\mathbf{S}} = \mu_0 i_p, \qquad \textbf{gdzie } i_p \textbf{ - prąd przesunięcia}$$

Powinno być

$$i_p = i$$

Propozycja Maxwella



$$i_p = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_{\mathbf{E}}}{dt}$$

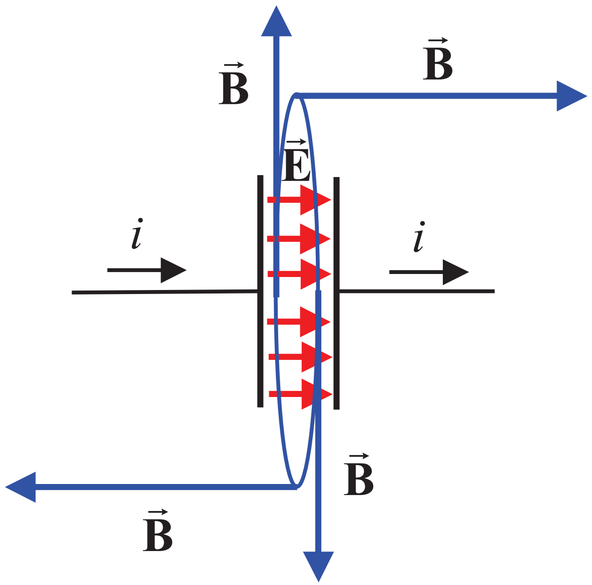
$$\Phi_{\mathbf{E}} = ES = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}S = \frac{q}{\varepsilon_0 S}S = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

$$i_p = \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left(\frac{q}{\varepsilon_0}\right) = \frac{dq}{dt} = i$$

Stąd dla obszaru między okładkami

$$\oint_K \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_{\mathbf{E}}}{dt}$$

Wniosek fizyczny: zmienny strumień pola elektrycznego również wytwarza wirowe pole magnetyczne.



Kompletne prawo Ampere'a:

$$\oint_K \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 i + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_{\mathbf{E}}}{dt}$$

Równania Maxwella w postaci całkowej i ich interpretacja fizyczna

$$\oint_{S} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{S}} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

Źródłami pola elektrycznego są ładunki elektryczne

$$\oint_{S} \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{S}} = 0$$

Pole magnetyczne jest bezźródłowe (nie ma ładunków magnetycznych)

$$\oint_{K} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Zmienny w czasie strumień magnetyczny wytwarza wirowe pole elektryczne

$$\oint_{K} \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 i + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_{\mathbf{E}}}{dt}$$

Prąd elektryczny oraz zmienny w czasie strumień elektryczny wytwarzają wirowe pole magnetyczne

Równania Maxwella w postaci różniczkowej i ich sens fizyczny

$\mathrm{div}\,\vec{\mathbf{E}} = \dfrac{\rho}{\varepsilon_0}$ **Źródłami pola elektrycznego są ładunki elektryczne**

$\mathrm{div}\,\vec{\mathbf{B}} = 0$ **Pole magnetyczne jest bezźródłowe (nie ma ładunków magnetycznych)**

$\mathrm{rot}\,\vec{\mathbf{E}} = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$ **Zmienne w czasie pole magnetyczne wytwarza wirowe pole elektryczne**

$\mathrm{rot}\,\vec{\mathbf{B}} = \mu_0 \vec{\mathbf{j}} + \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{\partial \vec{\mathbf{E}}}{\partial t}$ **Prąd elektryczny oraz zmienne w czasie pole elektryczne wytwarzają wirowe pole magnetyczne**