

Podstawy fizyki – sezon 2

5. Indukcja Faradaya

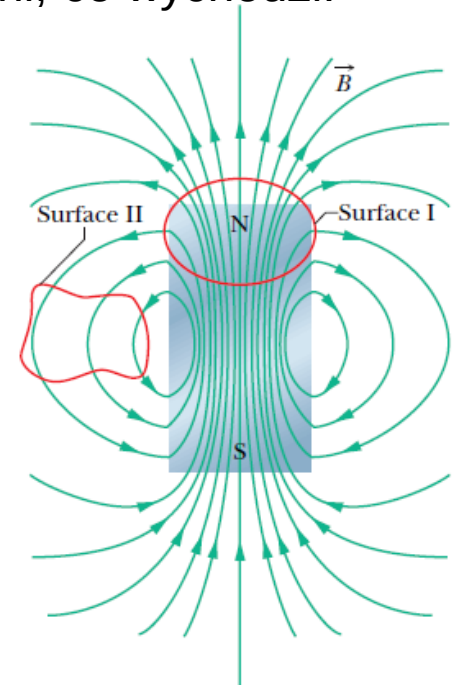
Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Prawo Gaussa dla pola magnetycznego

- Nie ma monopoli magnetycznych – magnes po podzieleniu nadal ma DWA bieguny (bo magnetyzm jest związany z ustawieniem spinów, mikrostrukturą)
- Jeśli zatem otoczmy magnes powierzchnią Gaussa (czyli dowolną powierzchnią zamkniętą) – całkowity „ładunek magnetyczny” wewnątrz niej wyniesie zero! Tyle samo linii pola wchodzi do powierzchni, co wychodzi. Pole magnetyczne jest **BEZŹRÓDŁOWE!!!**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

prawo Gaussa dla pola magnetycznego:
wypadkowy strumień magnetyczny przechodzący
przez dowolną powierzchnię zamkniętą wynosi
zero



Dotychczas pokazaliśmy:

- Poznaliśmy dotychczas trzy równania opisujące pola elektryczne i magnetyczne:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

????

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$



źródłowość pola:

pole elektryczne - pojedyncze ładunki elektryczne,

pole magnetyczne jest bezźródłowe, brak monopoli magnetycznych

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_P$$

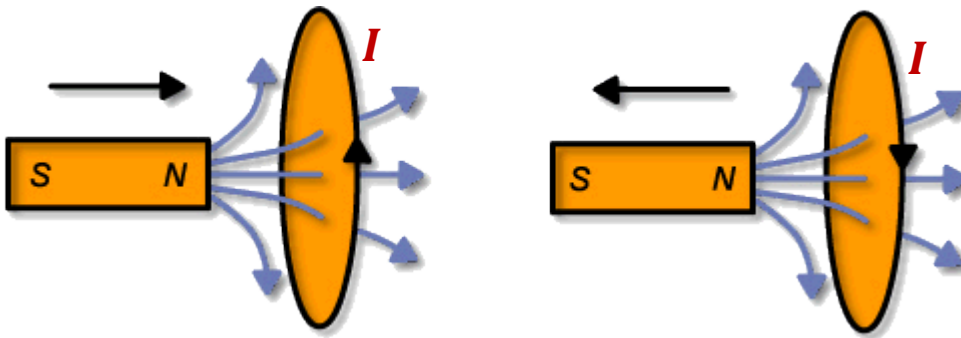


Źródłem pola magnetycznego może również być prąd elektryczny.

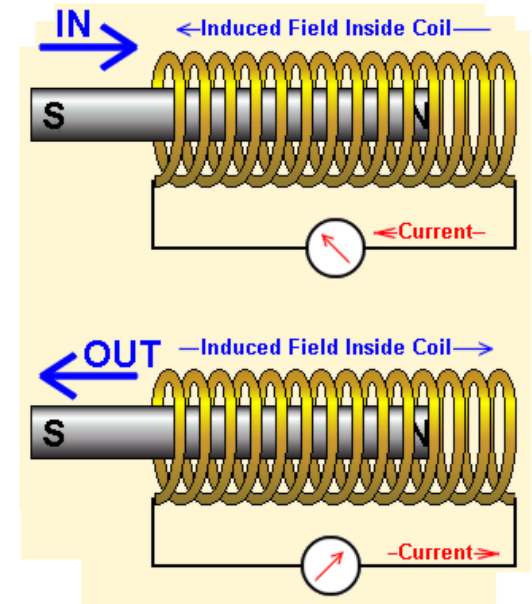
Czy źródłem pola elektrycznego może być pole magnetyczne ???

Michael Faraday

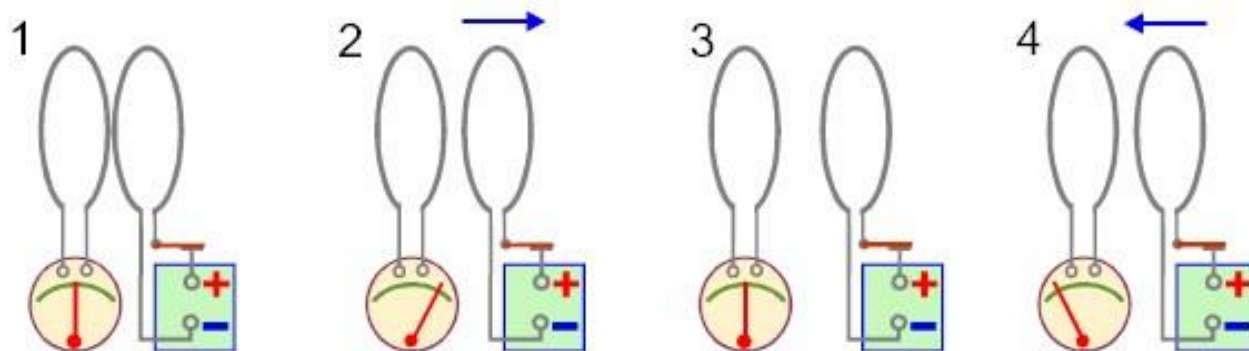
- 1833 – M. Faraday wykazał, że jeżeli obwód z przewodnika **włożymy w zmienny strumień pola magnetycznego**, to popłynie w tym obwodzie prąd.



- Oznaczało to, że w przewodniku powstała siła elektromotoryczna.
- Faraday zauważył, że wartość SEM zależy od liczby zwojów cewki i szybkości jej poruszania



Zabawy (obserwacje) Faradaya



- W drugim obwodzie indukowany był prąd gdy:
 - a) do cewki wkładany lub wyciągany z niej był magnes
 - b) poruszaliśmy obwodem z prądem,
 - c) włączaliśmy lub wyłączaliśmy prąd w pierwszym obwodzie

Jaką wspólną cechą mają te obserwacje?

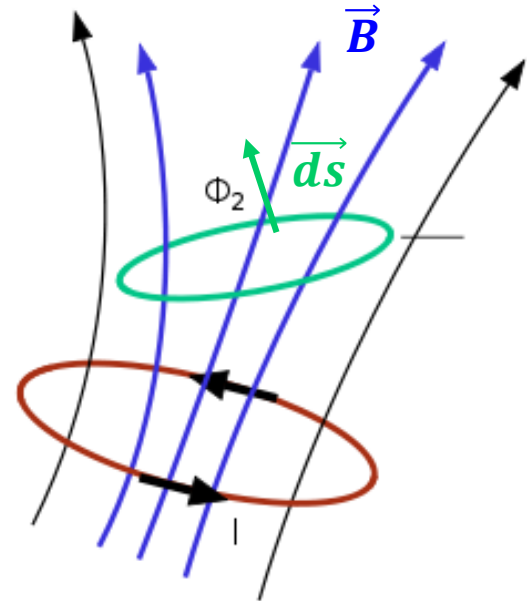
Strumień pola magnetycznego

- Strumień pola magnetycznego wytworzonego przez pętlę z prądem I

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

- W drugiej pętli popłynie prąd **tylko wtedy**, gdy znajdzie się ona w **zmiennym strumieniu** pola magnetycznego, tzn. w każdej chwili pętla **obejmuje inną liczbę linii pola** magnetycznego wytworzonego przez pierwszą pętlę.

$$\frac{d\Phi_B}{dt} \Rightarrow \text{pole elektryczne}$$



Prawo indukcji Faradaya

- Zmienny w czasie strumień pola magnetycznego powoduje powstanie SEM w przewodniku

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

prawo Faradaya

?? (niedługo)

- Siła elektromotoryczna $\mathcal{E}$ powstająca w obwodzie jest proporcjonalna do **szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej** obejmowanego przez ten obwód

$$\mathcal{E}_{ind} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s} \qquad \mathcal{E}_{ind} \rightarrow I_{ind} = \frac{\mathcal{E}_{ind}}{R}$$

- SEM zatem może być indukowane gdy:
 - porusza się źródło pola magnetycznego (magnes, pętla, cewka)
 - zmienia się wartości indukcji B pola magnetycznego (np. przez zmienny prąd wytwarzający pole magnetyczne)

Wiele dróg prowadzi do indukcji prądu...

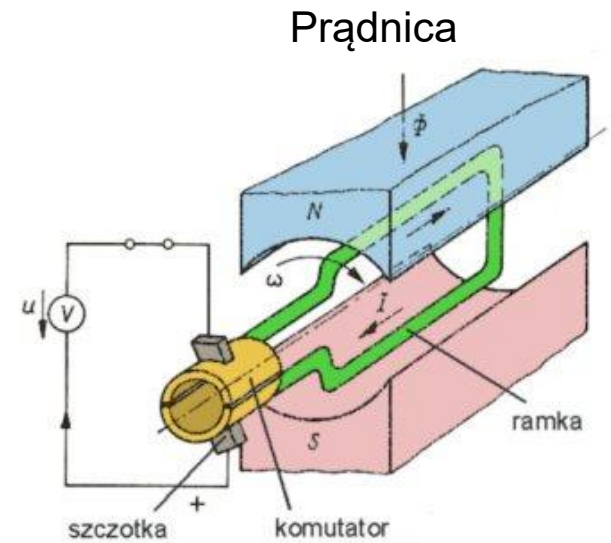
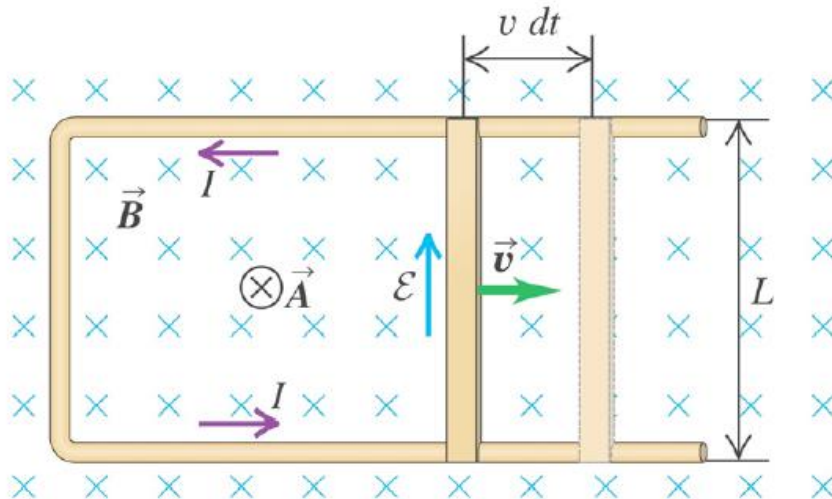
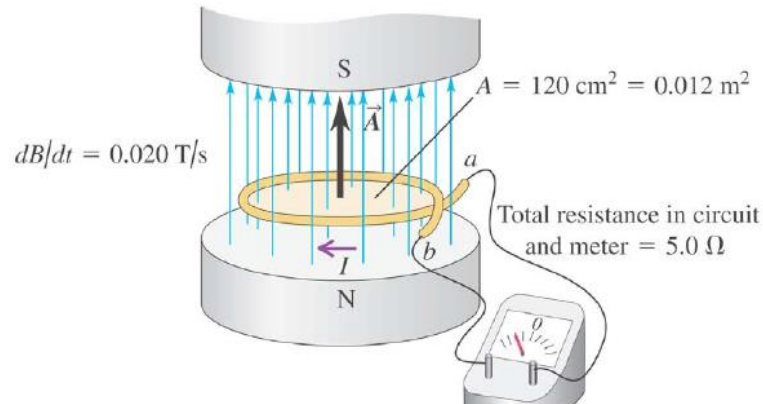
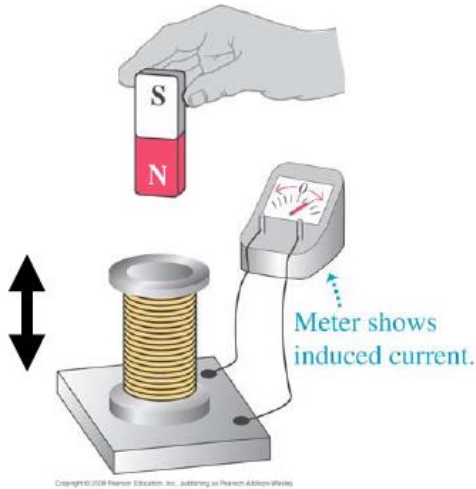
$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

- Zmiana strumienia magnetycznego, która jest źródłem indukcji SEM może być spowodowana:
 - a) poruszaniem magnesu lub przewodem z prądem w pobliżu przewodzącej pętli – powstaje niejednorodne, zależne od czasu, pole magnetyczne (zmienne $\vec{B}$),
 - b) umieszczeniem przewodzącej pętli w zmiennym polu magnetycznym (zmienne $\vec{B}$),
 - c) obracaniem pętli w stałym i jednorodnym polu magnetycznym (zmienne ustawienie wektorów $\vec{B}$ i $d\vec{s}$),
 - d) zmianą powierzchni pętli w czasie (zmienne s)

Lub kombinacją powyższych procesów.

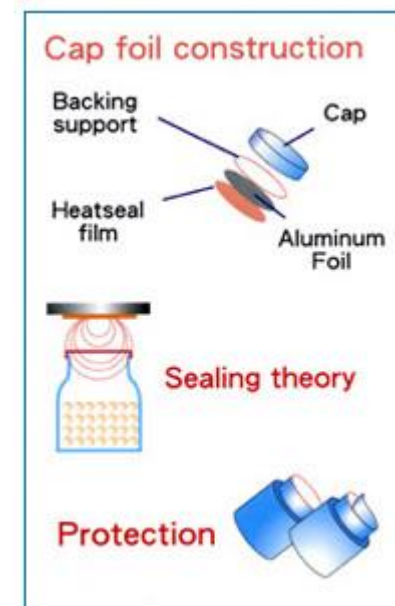
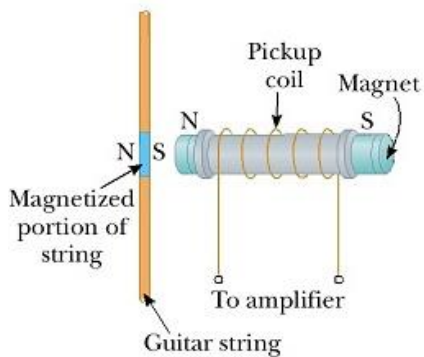
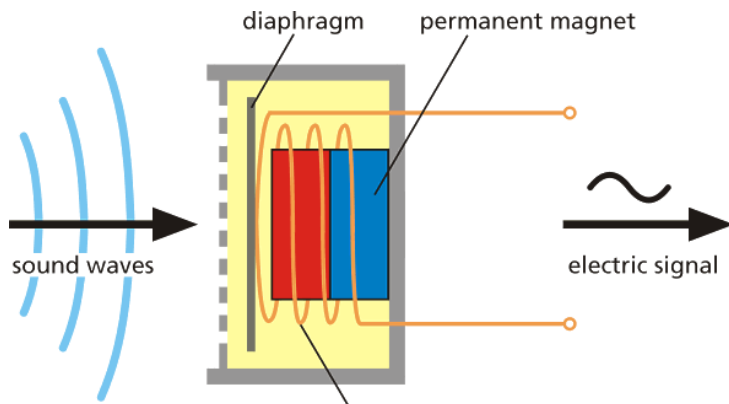
Wiele dróg prowadzi do indukcji prądu...

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$



Indukcja elektromagnetyczna - zastosowania

❓ Mikrofon



Reguła Lenza

- H.F. Lenz – reguła pozwalająca na wyznaczenie kierunku prądu indukowanego w obwodzie (jest to właściwie zasada zachowania energii):

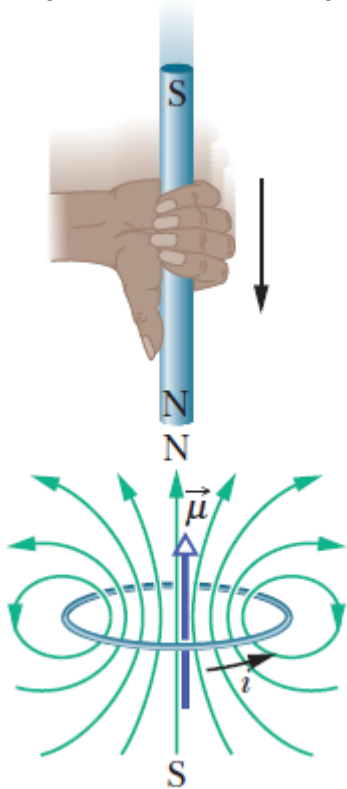
Indukowany prąd płynie w takim kierunku, że wytworzone pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia magnetycznego, która wywołała ten prąd

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

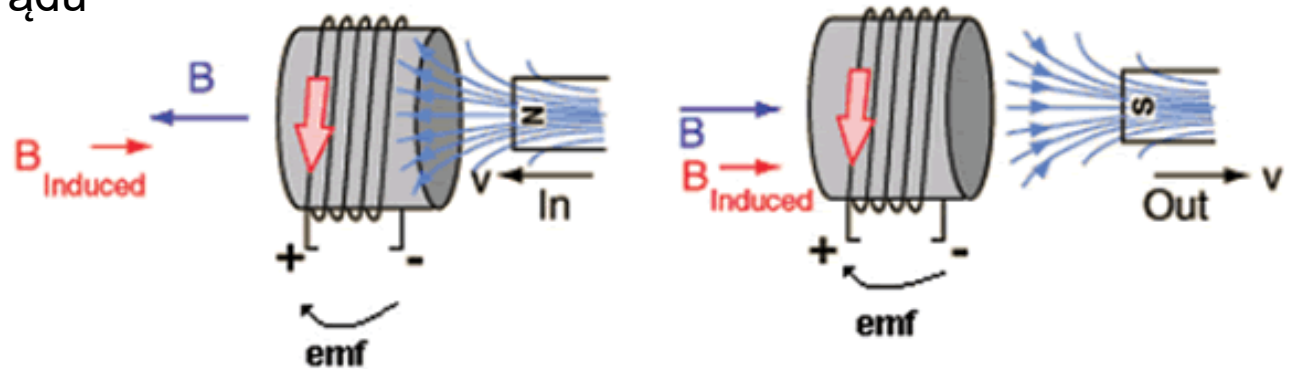
- Procedura wyznaczania kierunku indukowanego prądu (potrzebna głowa i dwie ręce):
 - określ potencjalną przyczynę wyindukowania prądu (ruch magnesu, cewki, zmiana prądu w obwodzie-źródle),
 - określ kierunek zmiany – przybliżanie, oddalanie magnesu, narastanie, zmniejszanie się prądu,
 - zaznacz kierunek (zwrot) indukcji magnetycznej w nowym obwodzie (ma przeciwdziałać przyczynie, która ją wywołała, tzn, odpychać lub przyciągać)
 - znając zwrot $\vec{B}$, określ kierunek indukowanego prądu.

Reguła Lenza - praktyka

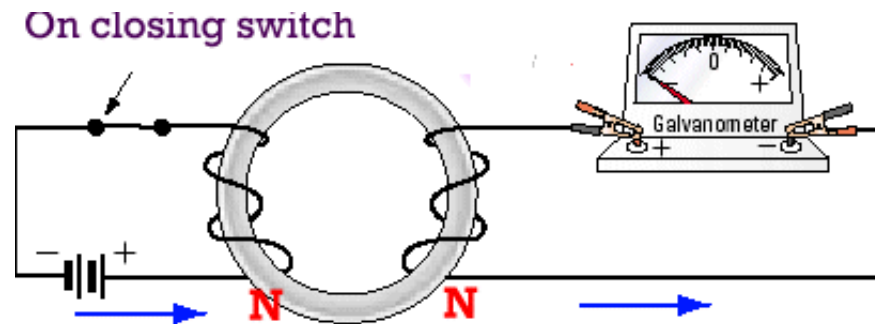
1. Ruch magnesu powoduje, że w obwodzie wytworzyło się pole magnetyczne przeciwdziałające temu ruchowi, zmienny strumień pola mag. wywołał przepływ prądu



Wyjaśnij!

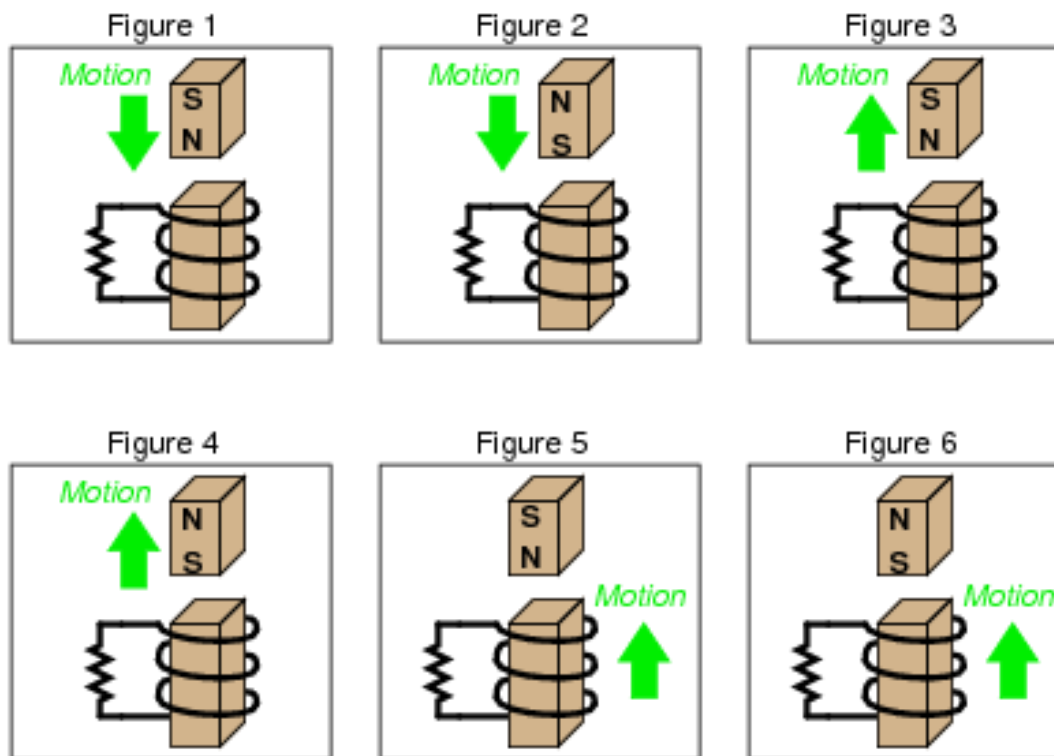


2. Zamknięcie przełącznika – wzrost prądu, indukowane pole ma przeciwdziałać przyczynie



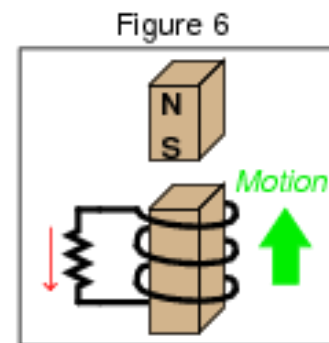
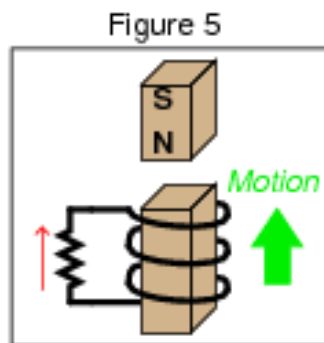
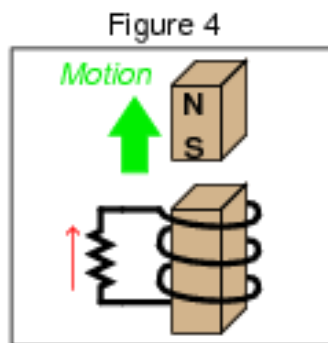
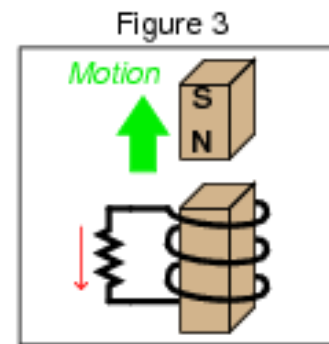
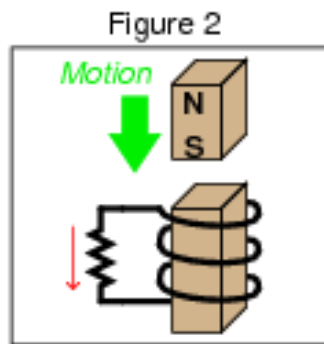
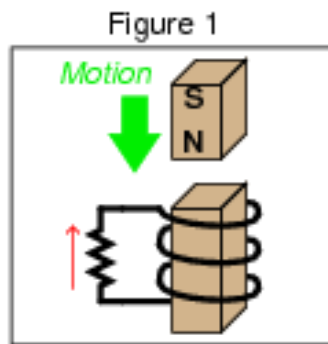
Quiz

- Sprawdź, czy potrafisz określić kierunek indukowanego prądu...



Quiz

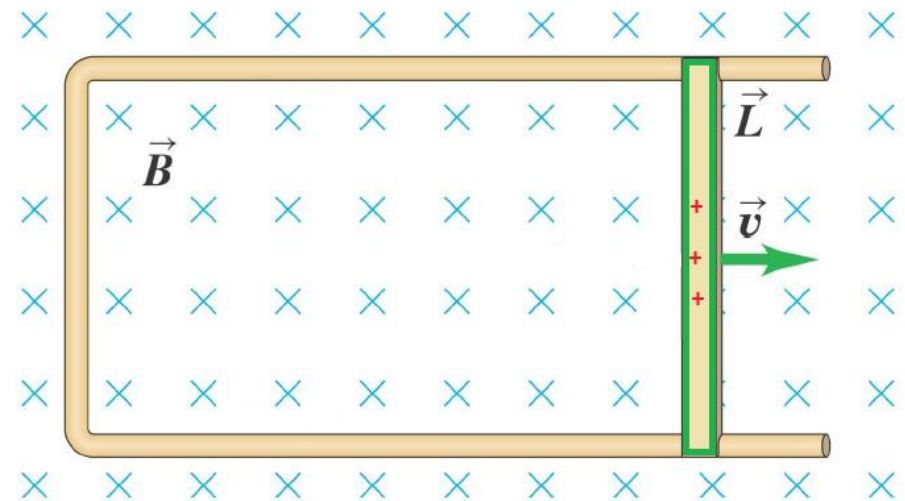
- A teraz sprawdź wynik!



Zjawisko indukcji elektromagnetycznej - wyjaśnienie

- W celu zrozumienia, dlaczego **wywołanie SEM pod wpływem zmiennego w czasie strumienia pola magnetycznego**, rozważmy układ:

ruchomy przewód o długości L
porusza się z prędkością v w
jednorodnym polu magnetycznym
o indukcji B (o zwrocie za
rysunek)



- Jako doświadczeni fizycy zrobimy
analizę procesu:

mamy zamknięty obwód w polu magnetycznym,
gdy przewód nie porusza się – prąd nie płynie, ale gdy będzie się poruszał....

Na poruszające się ładunki w polu magnetycznym

... działa siła Lorentza: $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej - wyjaśnienie

... działa siła Lorentza: $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$,
która powoduje rozsuniecie ładunków w przewodzie

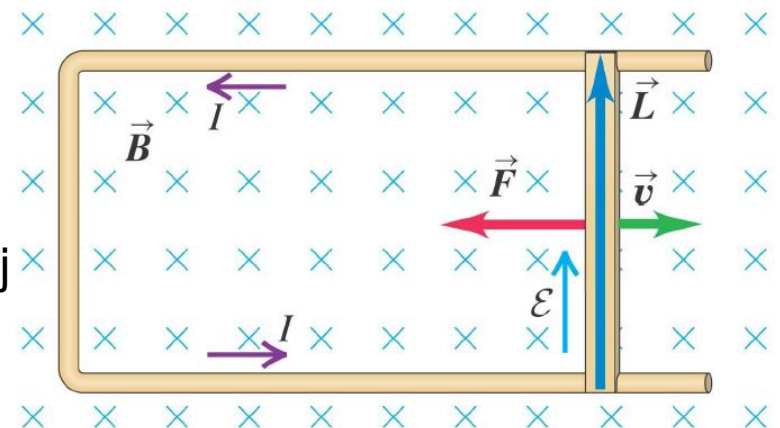
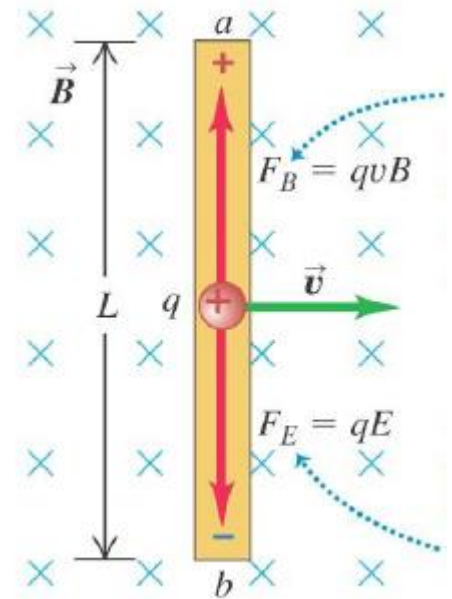
A jak na końcach przewodnika powstanie różnica potencjałów, to....

... powstanie siła elektryczna: $\vec{F}_E = q\vec{E}$

... i popłynie w nim prąd: $\mathcal{E}_{ind} \rightarrow I_{ind} = \frac{\mathcal{E}_{ind}}{R}$

A na przewodnik z prądem w polu magnetycznym działa **siła Lorentza** $\vec{F}$, której zwrot jest przeciwny do zwrotu prędkości przewodnika (przewodnik hamuje, aż do pewnej prędkości granicznej).

...



Zjawisko indukcji magnetycznej

- Gdy przewodnik przesuwamy w polu $\mathbf{B}$, na ładunek q w ruchomej części przewodnika działa siła Lorentza.
- Spowoduje ona przemieszczanie się ładunków tak długo, aż powstałe pole elektryczne zrównoważy działanie siły Lorentza.

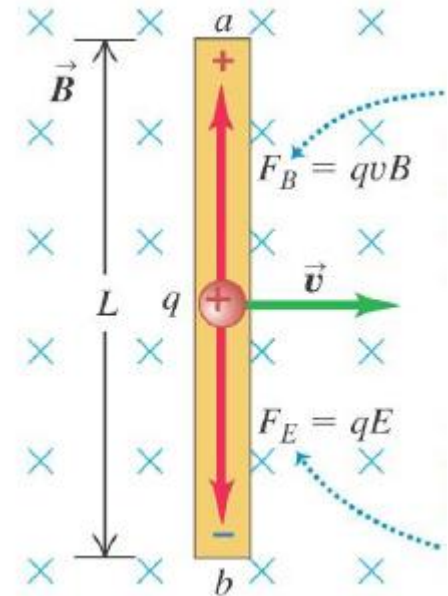
$$\left. \begin{array}{l} F_L = F_E \\ qvB = qE \end{array} \right\} \quad E = vB \quad \text{wiemy, że: } E = \frac{U}{l}$$

$$U \equiv \mathcal{E} = E l = vB l = \frac{dx}{dt} B l = B \frac{dS}{dt} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

pamiętamy?

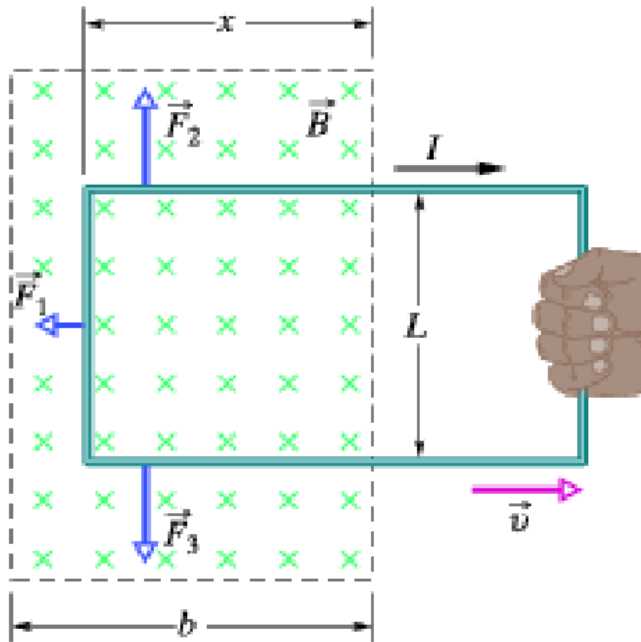
$$U = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \text{to prawo Faradaya jest w postaci:}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$



Prąd indukowany w ramce

- Ruch ramki z przewodnika w polu magnetycznym:

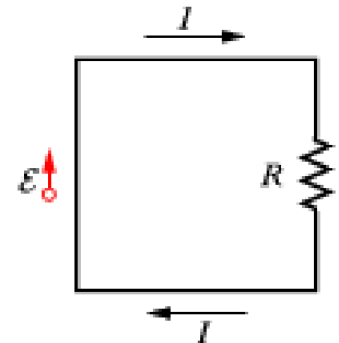


Ramka jest wysuwana z pola magnetycznego – maleje strumień pola objęty przez ramkę – jest to przyczyna indukcji prądu w ramce (kierunek!).

$$\Phi_B = B S = B L x$$

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi_B}{dt} = BL \frac{dx}{dt} = BLv$$

jest to zatem model układu elektrycznego:

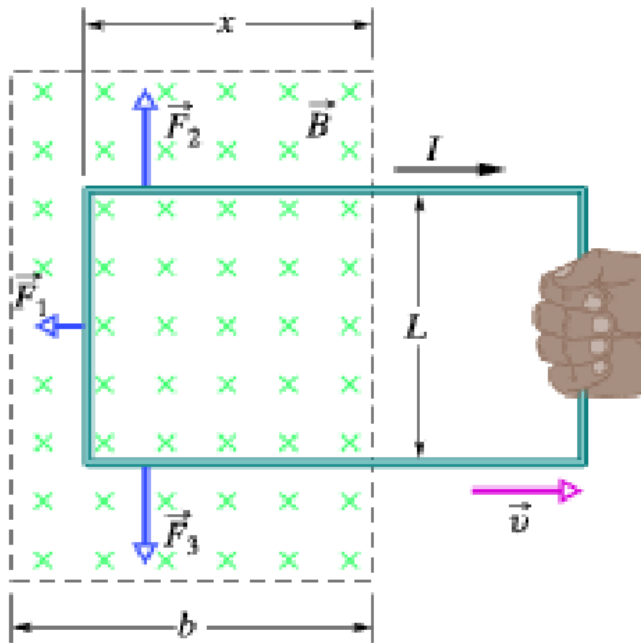


$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BLv}{R} \\ F &= ILB \end{aligned} \right\} P = F v = I^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

moc: szybkość wykonania pracy,
wyzdzielania ciepła

Prąd indukowany w ramce

- Ruch ramki z przewodnika w polu magnetycznym:

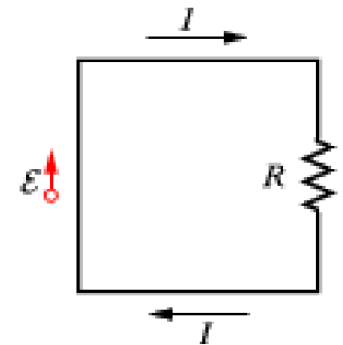


Ramka jest wysuwana z pola magnetycznego – maleje strumień pola objęty przez ramkę – jest to przyczyna indukcji prądu w ramce (kierunek!).

$$\Phi_B = B S = B L x$$

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi_B}{dt} = BL \frac{dx}{dt} = BLv$$

jest to zatem model układu elektrycznego:



$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BLv}{R} \\ F &= ILB \end{aligned} \right\} P = F v = I^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

moc: szybkość wykonania pracy,
wyzdzielania ciepła

Dotychczas pokazaliśmy:

- Poznaliśmy dotychczas trzy równania opisujące pola elektryczne i magnetyczne:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$



źródłowość pola:

pole elektryczne - pojedyncze ładunki elektryczne,

pole magnetyczne jest bezźródłowe, brak monopoli magnetycznych

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_P$$



Źródłem pola magnetycznego może również być prąd elektryczny.

Źródłem pola elektrycznego jest **zmienny w czasie strumień** pola magnetycznego.

Prawo indukcji Faradaya – przypomnienie po tygodniu

- Zmienny w czasie strumień pola magnetycznego powoduje powstanie SEM w przewodniku

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

prawo Faradaya

- Siła elektromotoryczna $\mathcal{E}$ powstająca w obwodzie jest proporcjonalna do **szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej** obejmowanego przez ten obwód

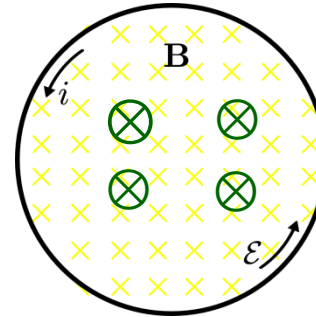
$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

- SEM zatem może być indukowane gdy:
 - porusza się źródło (lub obwód) pola magnetycznego (magnes, pętla, cewka)
 - zmienia się wartości indukcji B pola magnetycznego (np. przez zmienny prąd wytwarzający pole magnetyczne)

Pole elektryczne z magnetycznego

- Umieszczamy przewodzący pierścień w zmiennym polu magnetycznym B .

- Pole B narasta – pojawia się SEM, płynie prąd i .
- Skoro jest prąd, musi być i pole elektryczne E ! → dyskusja

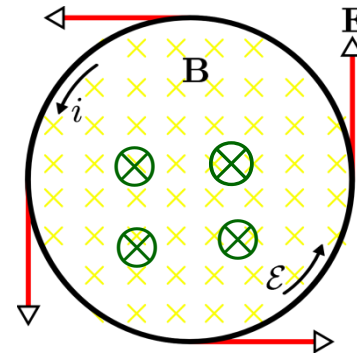


$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

- Wynika stąd wniosek, że:

zmienne pole magnetyczne
wytwarza pole elektryczne

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

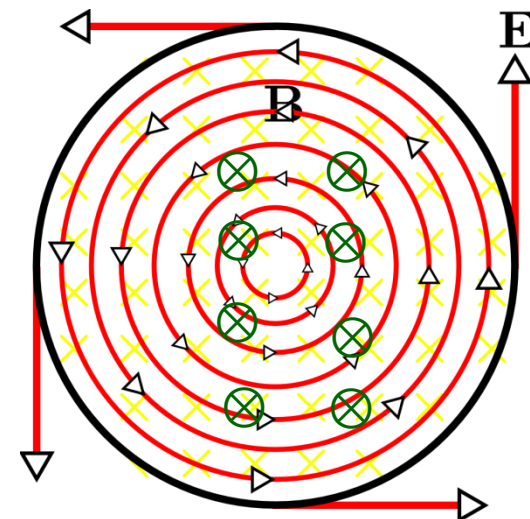


$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

pole elektryczne jest indukowane niezależnie, czy w zmiennym polu jest przewodnik, czy nie (obwód pozwala jedynie sprawdzić, czy pole jest).

Pole magnetyczne z elektrycznego

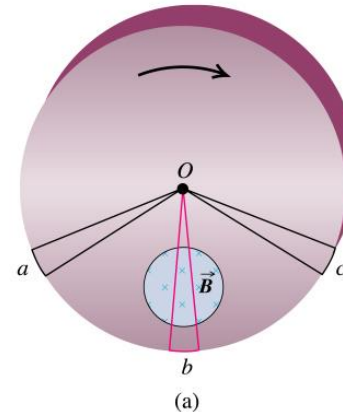
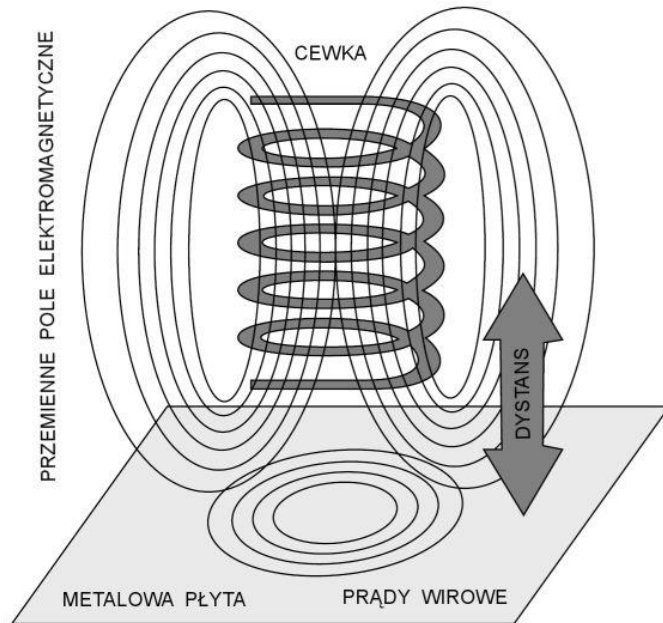
- Zmienne pole magnetyczne wywołało wirowe pole elektryczne (zmienne pole magnetyczne zmieniło przestrzeń wytwarzając w niej pole elektryczne!)
- Pola magnetyczne i elektryczne są ze sobą związane.
- Indukowane pole elektryczne różni się od pola wytworzonego przez stacjonarne ładunki:
 - ma zamknięte linie,
 - nie można określić dla niego potencjału (bo jak linie są zamknięte, to powinno być: $W = q\Delta V = q \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$, a jest:



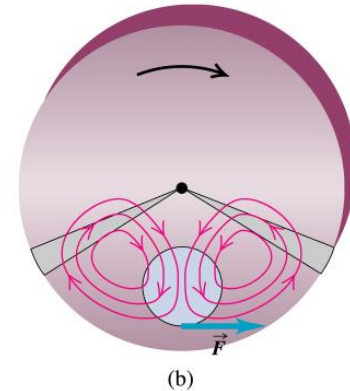
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Prądy wirowe

- W płytach metalowych znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym, indukowane prądy mają kształt wiru i często są szkodliwe (rozpraszają energię).
- Takie prądy nazywamy **prądami wirowymi**.

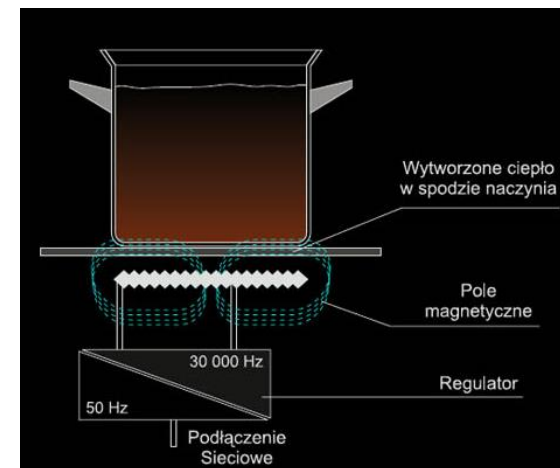
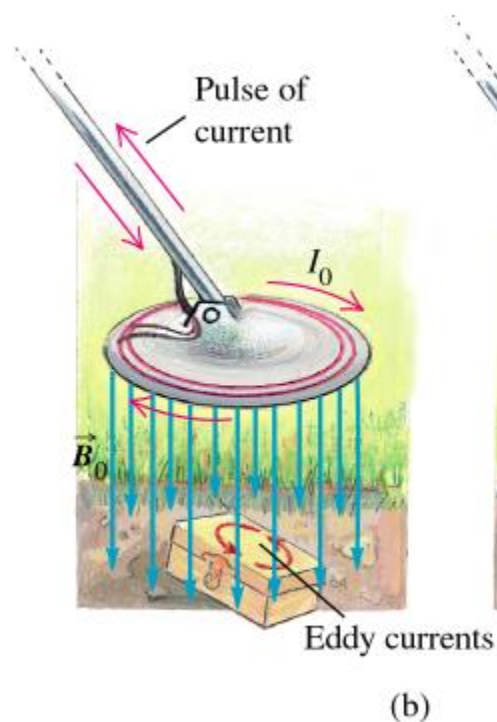
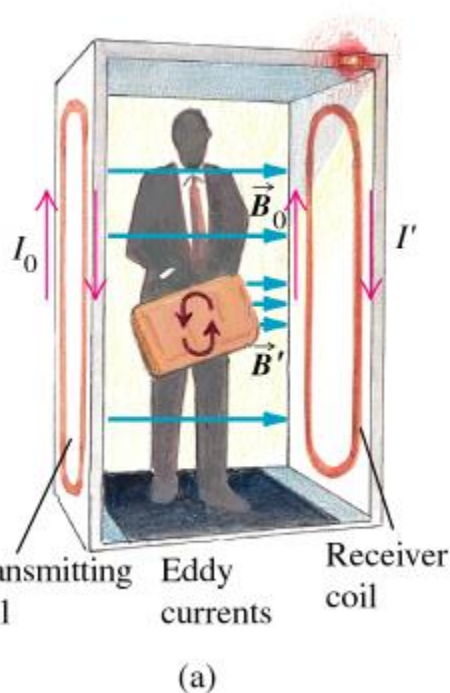


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Prądy wirowe

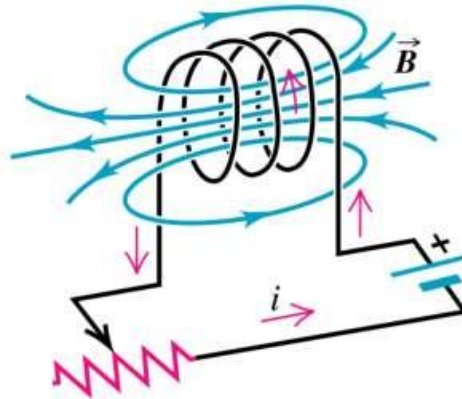
- Prądy wirowe są również wykorzystane w technice – pomiary struktur, kuchnia, wykrywacze metalu....



Indukowany w przewodniku zmienny prąd prąd jest źródłem własnego, indukowanego pola magnetycznego, rejestrowanego przez drugą cewkę.

Indukcyjność

- Cewka (zwinięty drut) służy do wytwarzania pola magnetycznego.



- Prąd przechodzący przez uzwojenie cewki wytwarza strumień magnetyczny Φ_B
- Indukcyjność cewki określamy jako:

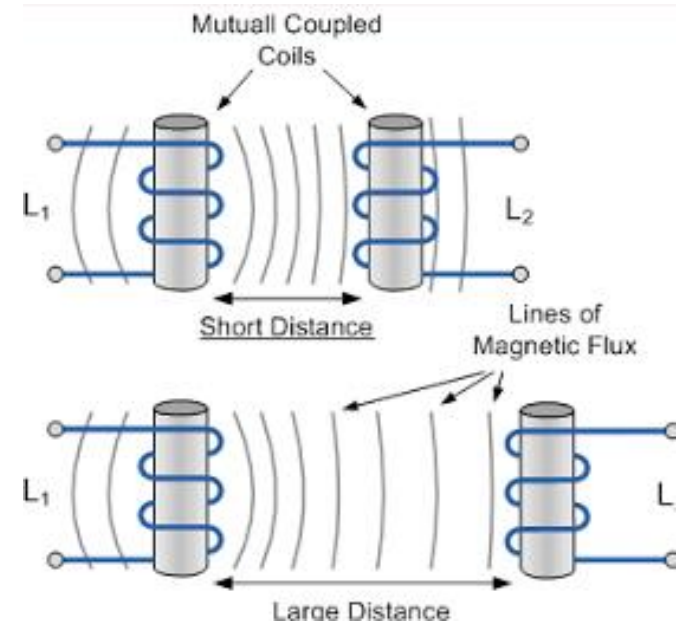
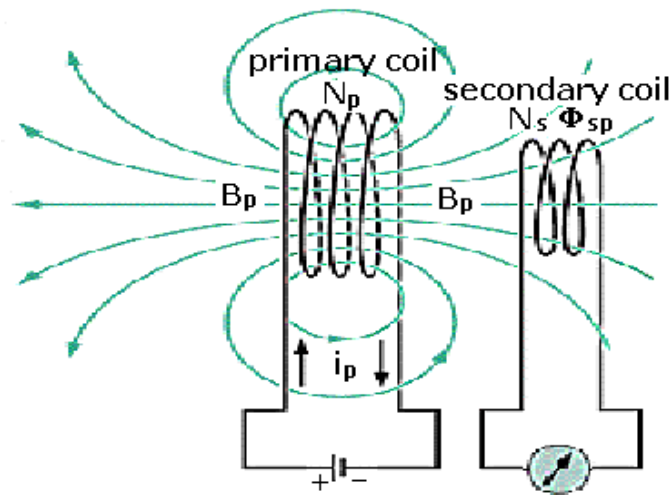
$$L = N \frac{\Phi_B}{I}$$

$$\Phi_B = L N I$$

Indukcyjności policzymy na ćw.

Dwie cewki

- Jeśli jedną cewkę z prądem umieścimy w pobliżu drugiej (bez prądu), to w tej drugiej wyindukuje się prąd.
- Zjawisko takie nazywamy **samoindukcją**.



- A opiszemy poprzez zdef. **indukcyjności wzajemnej** cewki 2 względem 1:

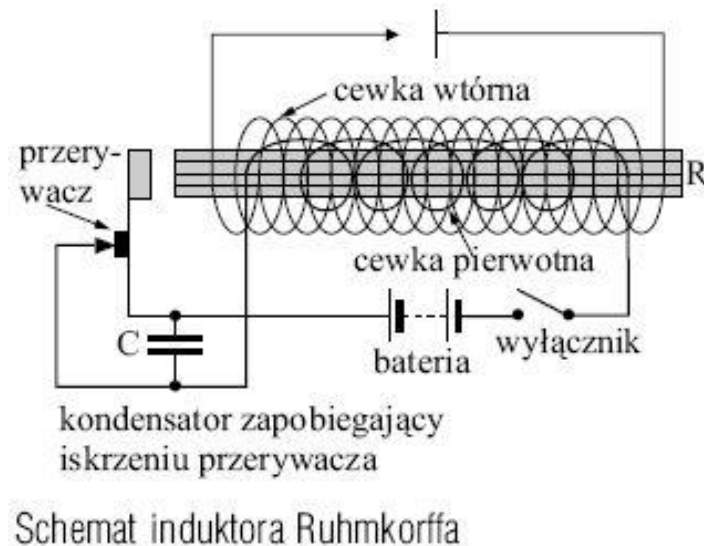
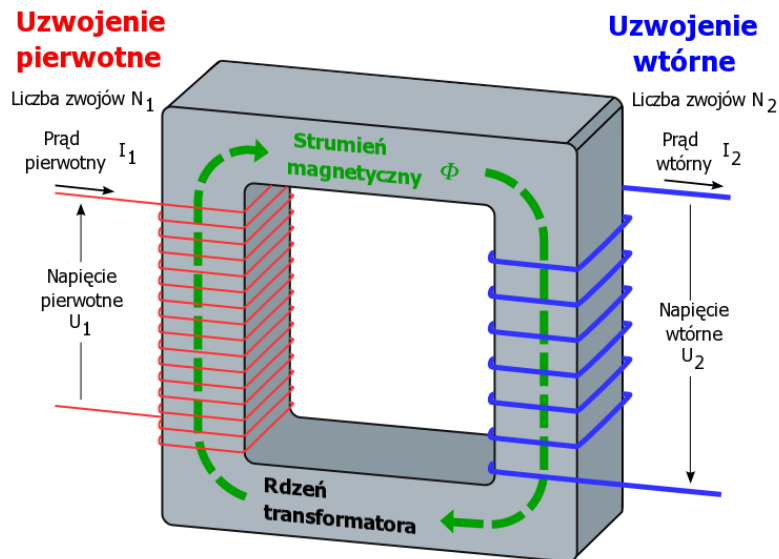
$$M_{21} = N \frac{\Phi_{21}}{I_1}$$

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

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{dI_1}{dt}$$

Indukcja wzajemna

- Dwie cewki mogą być nawinięte na jeden rdzeń (żelazny) lub jedna w drugiej:



skoro:

$$L = N \frac{\Phi_B}{I}$$

$$\varepsilon_L = N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\left. \begin{array}{l} L = N \frac{\Phi_B}{I} \\ \varepsilon_L = N \frac{d\Phi_B}{dt} \end{array} \right\} \varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}$$

dla transformatora idealnego

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Dodatkowy składnik

- Równania opisujące pola elektryczne i magnetyczne:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$



równania niezależne od czasu,
stacjonarne,
pola elektryczne i magnetyczne
są niezależne od siebie

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

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_P + ???$$



Czy źródłem pola magnetycznego może
być zmienny w czasie strumień pola
elektrycznego?

Źródłem pola elektrycznego
jest **zmienny w czasie
strumień** pola
magnetycznego.

Dotychczas pokazaliśmy:

- Równania opisujące pola elektryczne i magnetyczne:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

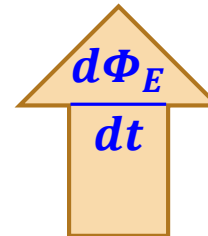


równania niezależne od czasu,
stacjonarne,
pola elektryczne i magnetyczne
są niezależne od siebie

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

Źródłem pola elektrycznego
jest zmienny w czasie
strumień pola
magnetycznego.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_P + ???$$



Czy źródłem **pola magnetycznego** może
być **zmienny w czasie strumień pola
elektrycznego**?

Pole elektryczne z magnetycznego - powtórka

- Umieszczamy przewodzący pierścień w polu magnetycznym B .

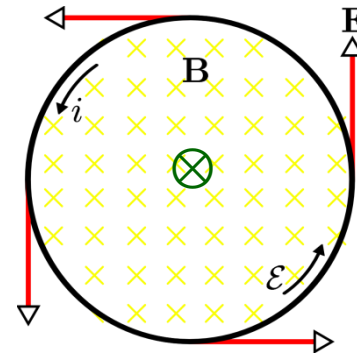
- Pole narasta – pojawia się SEM, płynie prąd i .
- Skoro jest prąd, musi być i pole elektryczne E !

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

- Wynika stąd wniosek, że:

zmienne pole magnetyczne
wytwarza pole elektryczne

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$



$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

pole elektryczne jest indukowane niezależnie, czy w zmiennym polu jest przewodnik, czy nie (obwód pozwala jedynie sprawdzić, czy pole jest).

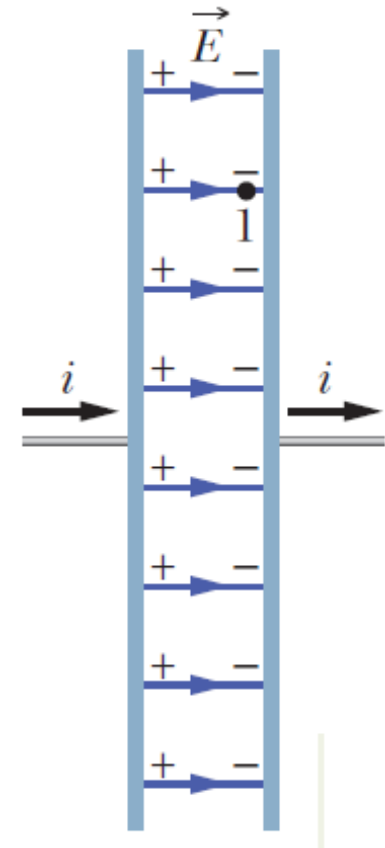
Pole magnetyczne z elektrycznego

- Czy zamiana w poprzednich równaniach liter B na E da równania opisujące obserwowane zjawiska?

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \propto \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Mamy płaski kondensator o kołowych okładkach.

- Ładujemy kondensator stałym prądem I – ładunek na okładkach zwiększa się ze stałą szybkością.
- Rośnie zatem natężenie pola elektrycznego (ze stałą szybkością) pomiędzy okładkami.



Indukowane pole magnetyczne

- Wewnątrz kondensatora indukuje się pole magnetyczne...

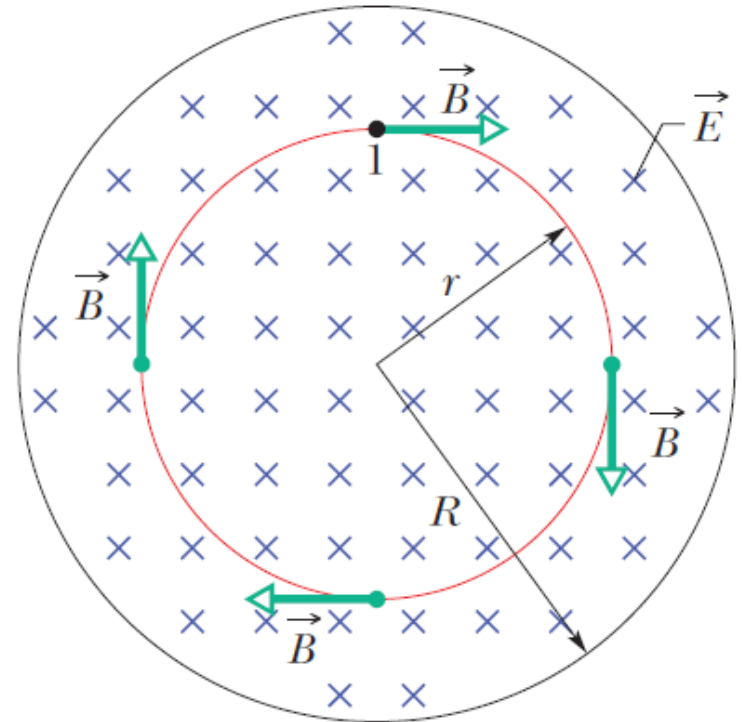
zmienne pole elektryczne
wytwarza pole magnetyczne

Dokładniej:

- przez dowolny kontur przechodzi zmienny strumień pola elektrycznego $\frac{d\Phi_E}{dt}$ – jest on przyczyną indukcji pola magnetycznego

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Uwaga! Brak „-” !



Indukowane pole magnetyczne – porównanie!

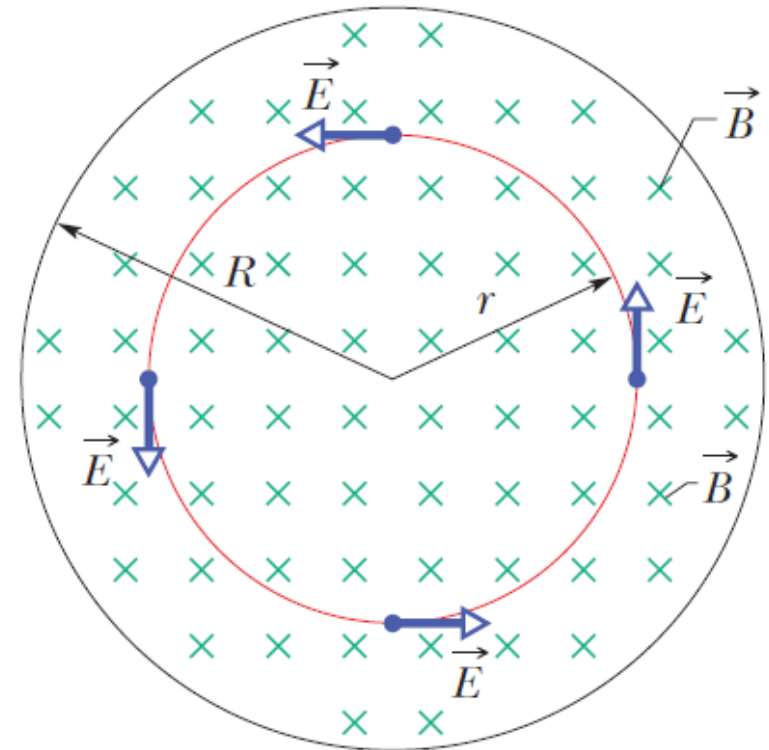
- Wewnątrz kondensatora indukuje się pole magnetyczne...

zmienne pole elektryczne
wytworza pole magnetyczne

Dokładniej:

- przez dowolny kontur przechodzi zmienny strumień pola elektrycznego $\frac{d\Phi_E}{dt}$ – jest on przyczyną indukcji pola magnetycznego

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$



Uwaga! Brak „-” ! Oznacza, że pole magnetyczne indukowane jest polem elektrycznym w przeciwną stronę niż elektryczne magnetycznym

Prąd przesunięcia

- Czy ktoś pamięta prawo Ampera?

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_P$$

- A teraz mamy:

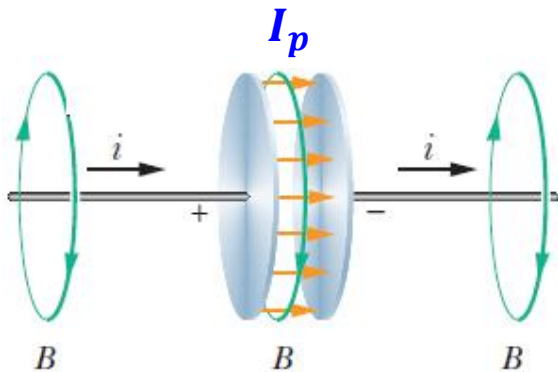
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

- Co daje razem:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \underbrace{\mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}} + \mu_0 I$$

uogólnione prawo Ampera

umownie nazywamy ten czynnik „prądem przesunięcia” I_p



pole magnetyczne jest wytworzone przez rzeczywisty prąd I wokół przewodnika

oraz

przez umowny prąd przesunięcia I_p w kondensatorze, ale

zawsze obowiązuje reguła „prawej dłoni” w wyznaczeniu zwrotu B

Równania Maxwella – postać całkowa

- Źródłem pola elektrycznego są ładunki elektryczne - strumień pola elektrycznego przechodzący przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest równy całkowitemu ładunkowi objętemu tą powierzchnią (prawo Gaussa).
- Pole elektryczne jest indukowane zmiennym w czasie strumieniem pola magnetycznego (prawo Faradaya).
- Nie istnieją monopole magnetyczne - strumień pola magnetycznego przechodzący przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest równy zero (prawo Gaussa dla pola magnetycznego).
- Źródłem pola magnetycznego jest prąd elektryczny lub zmienny w czasie strumień pola elektrycznego (uogólnione prawo Ampera)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I$$

Równania Maxwella – postać różniczkowa

- Źródłem pola elektrycznego jest ładunek elektryczny (gęstość ładunku) (prawo Gaussa).

$$\underbrace{\nabla \cdot \vec{E}}_{\text{operator dywergencji}} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$$

operator dywergencji
opisuje źródłowość pola

- Źródłem pola elektrycznego jest zmienne pole magnetyczne (prawo Faradaya).

$$\underbrace{\nabla \times \vec{E}}_{\text{operator rotacji}} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

operator rotacji
opisuje wirowość pola

- Pole magnetyczne jest bezźródłowe (prawo Gaussa dla pola magnetycznego).

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

- Źródłem pola magnetycznego jest prąd elektryczny lub zmienne pole elektryczne (uogólnione prawo Ampera)

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Podsumowanie

- Prawo Faradaya i reguła Lenza – zastosowania.
- Indukowane pole elektryczne.
- Indukcyjność.
- Cewki, indukcja wzajemna.
- Cztery równania elektromagnetyzmu.
- Indukowane pole magnetyczne.
- Uogólnione prawo Ampera, prąd przesunięcia.

Zamiast podsumowania

- Zamiast podsumowania ... przejrzymy ponownie slajdy.
- Proszę o pytania!

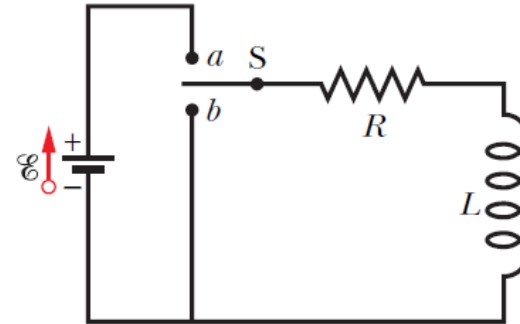


A może jednak trzeba
było studiować
filozofię?

nieeeeee....

Układy RL

- Mamy obwód z opornikiem i cewką:
- Najpierw (pozycja „a” przełącznika) prąd ze źródła napięcia zaczyna płynąć przez opornik i cewkę.
- Prąd rośnie, zatem w cewce wytwarza zmienne pole magnetyczne i wyindukowane SEM:
- Rozwiązaniem tego równania jest:

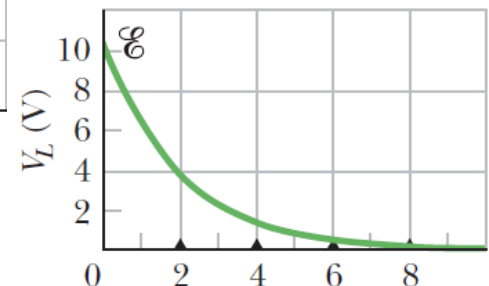
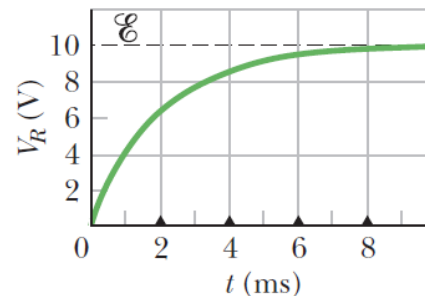


$$L \frac{di}{dt} + Ri = \mathcal{E}$$

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$

stała czasowa układów RL:

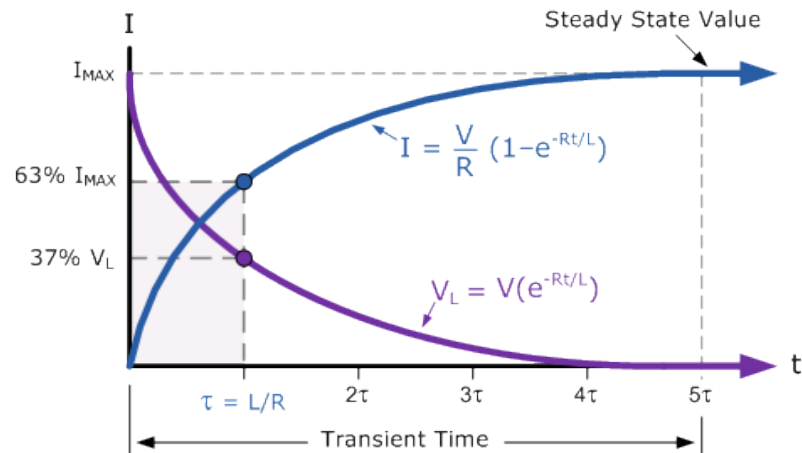
$$\tau_L = \frac{L}{R}$$



Układy RL

- Prąd w cewce rośnie do wartości maksymalnej

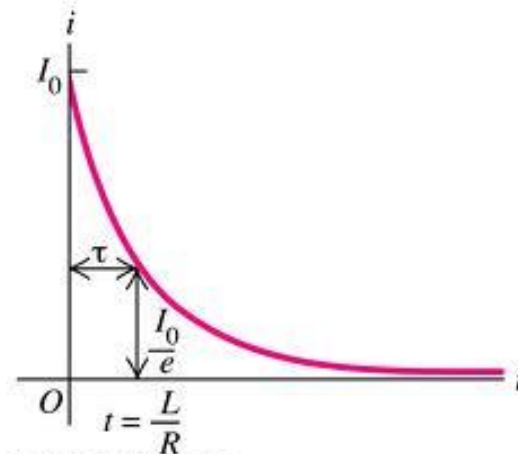
$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$



- Jeżeli odłączymy źródło:

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

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/\tau_L} = i_0 e^{-t/\tau_L}$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Ciekawe

Bardzo

