

Podstawy elektrotechniki

Pole magnetyczne

Rozwój elektrodynamiki wykazał, że magnetyzm jest nierozdzielnie związany z elektrycznością. W ujęciu klasycznym pole magnetyczne powstaje w wyniku ruchu ładunków elektrycznych, natomiast w ujęciu kwantowym jego źródłem są również własności wewnętrzne cząstek, takie jak spin i moment magnetyczny elektronu. Z tego względu magnetyzm nie jest jedynie cechą magnesów trwałych, lecz powszechnym przejawem oddziaływań elektromagnetycznych obecnych zarówno w skali makroskopowej, jak i mikroskopowej.

Podstawową wielkością opisującą zjawiska magnetyczne jest **indukcja magnetyczna \mathbf{B}** , a także **natężenie pola magnetycznego \mathbf{H}** . W próżni wielkości te są proporcjonalne, natomiast w ośrodkach materialnych zależność między nimi staje się bardziej złożona i zależy od właściwości magnetycznych materii.

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

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,
 $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

μ_r – przenikalność magnetyczna środowiska, –

Jednostkami **\mathbf{B}** jest T [tesla] i **\mathbf{H}** [A/m].

Materiał	μ_r [-]	Typ materiału
próżnia	1	odniesienie
miedź	0,99999	diamagnetyk
H ₂ O	0,99999	
bismut	0,99983	
powietrze	1,00000037	paramagnetyk
aluminium	1,00002	
platyna	1,00029	
wolfram	1,000068	
stal miękka	500 – 5000	ferromagnetyk
żelazo techniczne	2000 – 10000	
blacha transformatorowa	do 100000	
permalloy	20000 – 100000	

Diamagnetyki – materiały, które minimalnie osłabiają pole magnetyczne $\mu_r < 1$. Wypychają linie pola z wnętrza swojej struktury.

Choć efekt ten jest słaby, ma to ogromne znaczenie teoretyczne i stanowi podstawę wielu „spektakularnych” zjawisk, takich jak lewitacja magnetyczna czy nadprzewodnictwo (efekt Meissnera).

Elektrony w atomach poruszają się wokół jąder, tworząc mikroskopowe prądy orbitalne. W stanie równowagi ich efekty magnetyczne w dużej mierze się znoszą, przez co atom jako całość nie wykazuje trwałego momentu magnetycznego. Sytuacja zmienia się jednak w obecności zewnętrznego pola magnetycznego. Pole to wpływa na ruch elektronów, modyfikując ich trajektorie w sposób wynikający z działania siły *Lorentza*. Zgodnie z zasadą *Lenza*, każda zmiana wywołana przez pole zewnętrzne generuje odpowiedź przeciwdziałającą tej zmianie. W kontekście magnetyzmu oznacza to, że indukowany moment magnetyczny ma kierunek przeciwny do przyłożonego pola.

Paramagnetyki – materiały, które słabo wzmacniają pole magnetyczne $\mu_r > 1$.

W przeciwieństwie do diamagnetyków, które zawsze przeciwdziałają przyłożonemu polu magnetycznemu, materiały paramagnetyczne reagują na pole w sposób zgodny z jego kierunkiem – zostają przez nie przyciągane, choć efekt ten jest stosunkowo słaby.

W niskich temperaturach materiały paramagnetyczne reagują silniej na zewnętrzne pole magnetyczne, natomiast w wysokich temperaturach – ich „magnetyzacja” staje się coraz słabsza – prawo *Curie*.

Ferromagnetyki – materiały, które bardzo silnie wzmacniają pole magnetyczne ($\mu_r \gg 1$, rzędu setek lub tysięcy). Charakteryzują się nieliniowością i zjawiskiem histerezy.

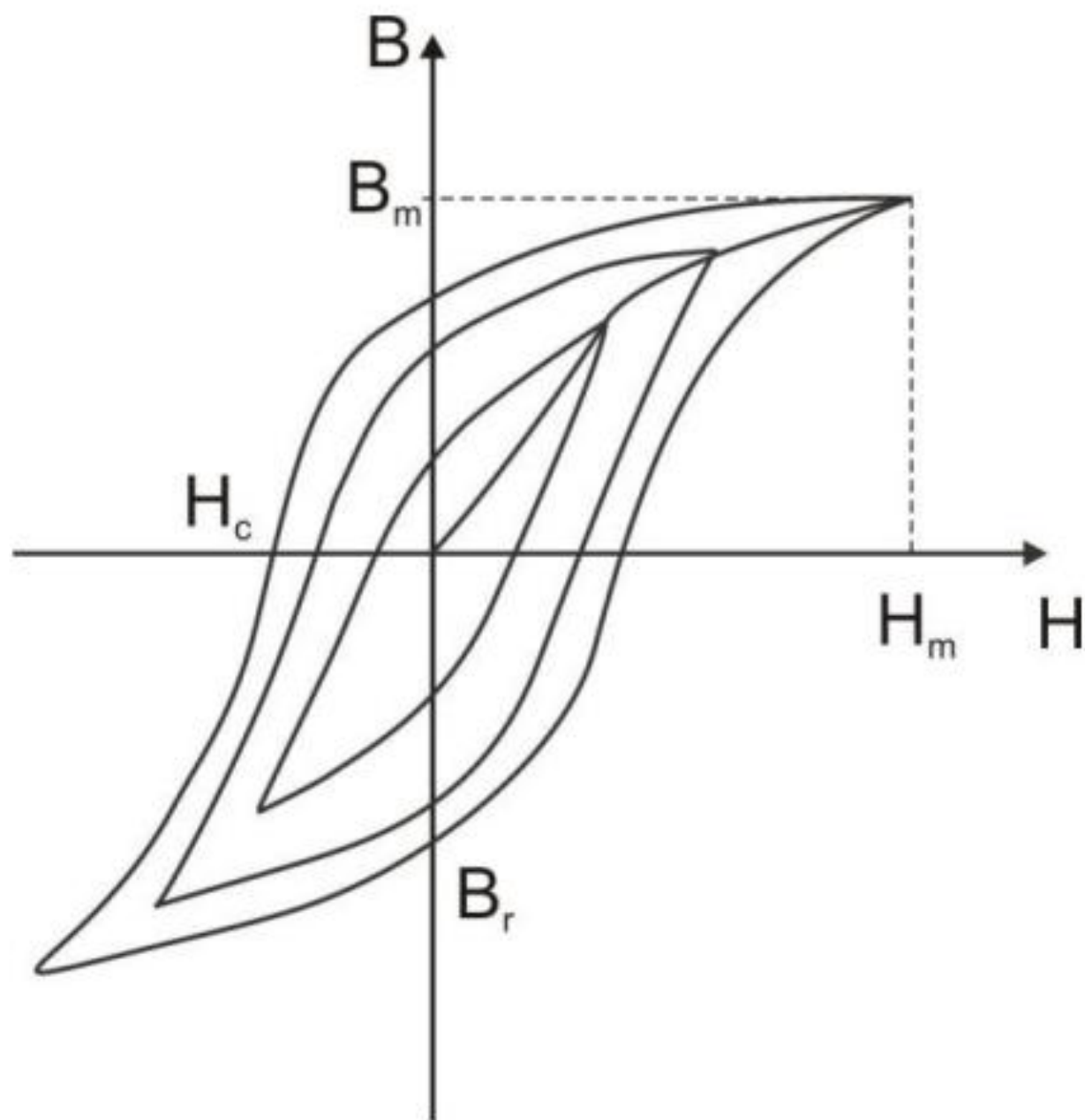
Histereza odgrywa kluczową rolę w zastosowaniach technicznych. Materiały o szerokiej pętli histerezy, które trudno rozmagnesować, wykorzystywane są jako magnesy trwałe. Z kolei materiały o wąskiej pętli histerezy, które łatwo ulegają przemagnesowaniu, stosowane są w rdzeniach transformatorów i urządzeniach elektrycznych, gdzie istotne jest minimalizowanie strat energii.

Wraz ze wzrostem temperatury rośnie chaotyczny ruch termiczny, który przeciwdziała uporządkowaniu spinów elektronów. W pewnej temperaturze krytycznej, zwanej temperaturą *Curie*, uporządkowanie zanika całkowicie, a materiał przechodzi w stan paramagnetyczny.

Histereza ferromagnetyków to zjawisko polegające na tym, że stan namagnesowania materiału zależy nie tylko od aktualnego zewnętrznego pola magnetycznego, ale także od jego historii (wcześniejszych zmian). Wynika to z oporu, jakie stawiają domeny magnetyczne podczas przestawiania się w zewnętrznym polu.

Zjawisko to najlepiej obrazuje **pętla histerezy** – wykres zależności indukcji magnetycznej **B** od natężenia pola **H** . Do jej kluczowych punktów należą:

- **punkt nasycenia**, maksymalne namagnesowanie materiału przy silnym polu,
- **indukcja remanencji B_r** , namagnesowanie, które pozostaje w ferromagnetyku po wyłączeniu zewnętrznego pola,
- **natężenie koercyjne H_c** , pole magnetyczne o przeciwnym zwrocie, które trzeba przyłożyć, aby wyzerować namagnesowanie.



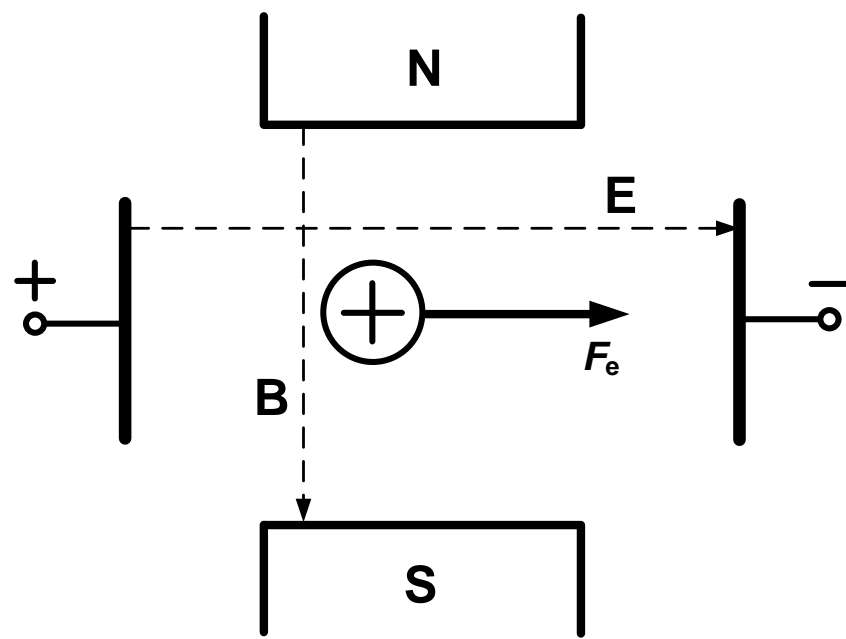
Znaczenie pola magnetycznego najlepiej ujawnia się w oddziaływaniu z poruszającymi się ładunkami. Siłę \mathbf{F} działającą na ładunek q , poruszający się z prędkością \mathbf{v} w polu magnetycznym \mathbf{B} , opisuje **siła Lorentza**.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q \cdot \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

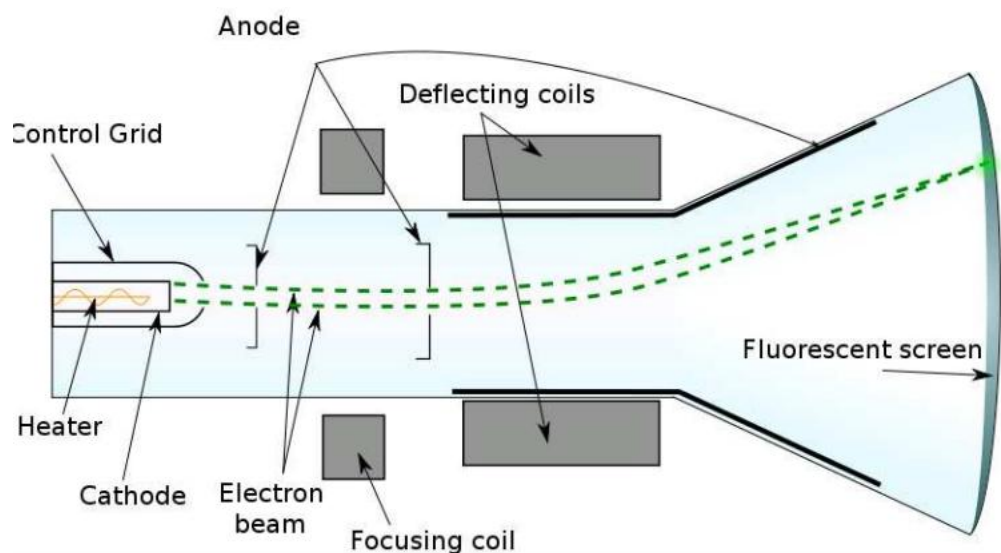
\mathbf{E} – natężenie pola elektrycznego

Z tego prawa wynika, że magnetyzm nie działa na ładunki spoczywające, lecz wyłącznie na ładunki będące w ruchu. Jest to cecha odróżniająca pole magnetyczne od pola elektrycznego. Magnetyzm zmienia więc najczęściej kierunek ruchu cząstek, a nie ich energię kinetyczną, ponieważ siła magnetyczna jest zawsze prostopadła do prędkości cząstki.



Na poruszający się ładunek w polu magnetycznym będzie działać siła *Lorentza*, która skierowana jest do ekranu.

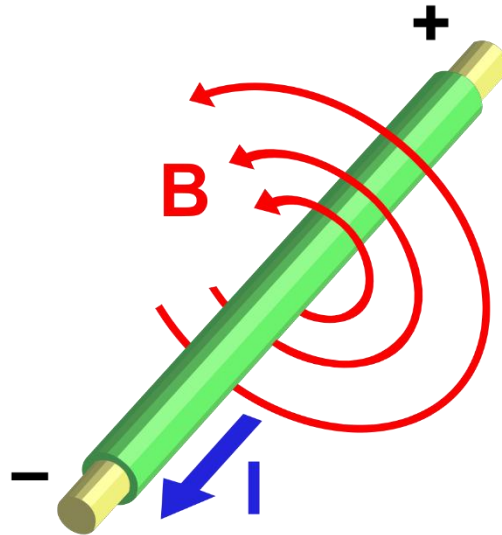
Kineskop – lampa elektronowa służąca do wyświetlania obrazu. Zastosowanie: oscyloskopy, telewizory.



Prawo Ampère'a – prawo wiążące indukcję magnetyczną \mathbf{B} wokół przewodnika z natężeniem prądu elektrycznego I przepływającego w tym przewodniku.

Linie pola magnetycznego \mathbf{B} są zawsze liniami zamkniętymi.

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

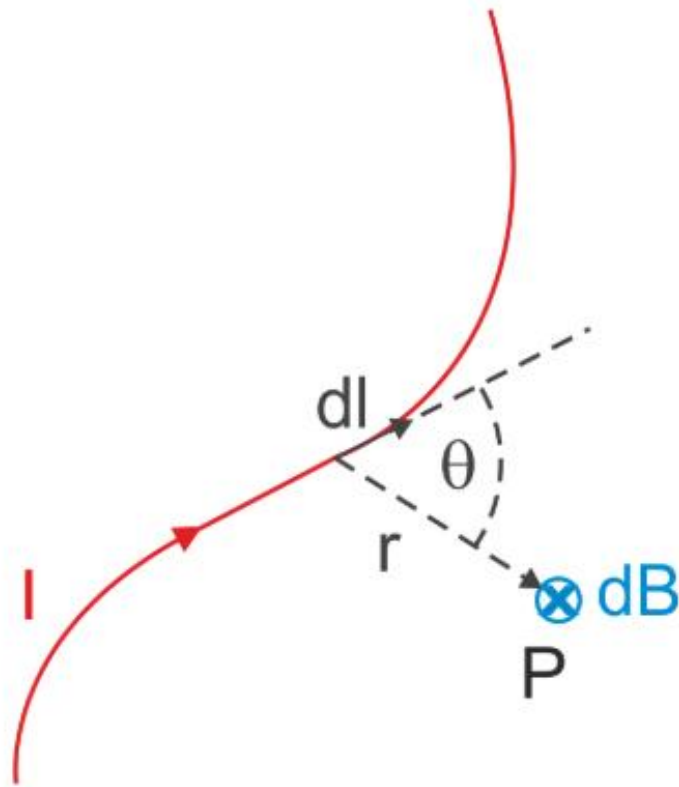


Zgodnie z prawem *Ampera* dla prostoliniowego nieskończenie długiego przewodnika o promieniu r przez który płynie prąd I wzór na indukcję magnetyczną ma postać:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2\pi \cdot r}$$

Jeśli przewodnik ma skończoną długość lub nie jest prostoliniowy to do wyznaczenia indukcji magnetycznej trzeba skorzystać z prawa Biota-Savarta.

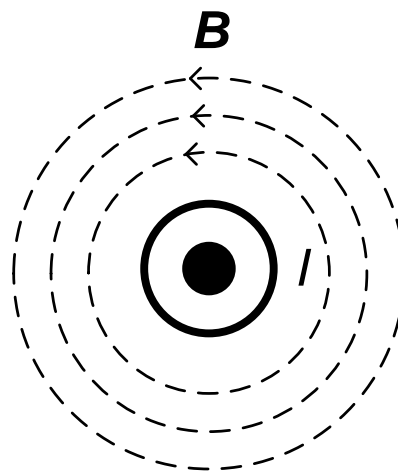
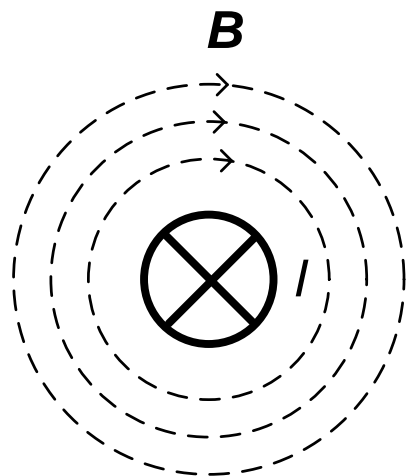
$$d\vec{B} = \mu_0 \mu_r \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi \cdot r^3}$$



Jeżeli śruba prawoskrętna porusza się wzdłuż przewodnika w kierunku przepływu prądu, to kierunek jej obrotu wskazuje kierunek linii pola magnetycznego wokół tego przewodnika.

albo inaczej

Kierunek prądu wyznacza przesuw śruby, a kierunek jej obrotu – kierunek pola magnetycznego.



⊗ – prąd płynie do ekranu

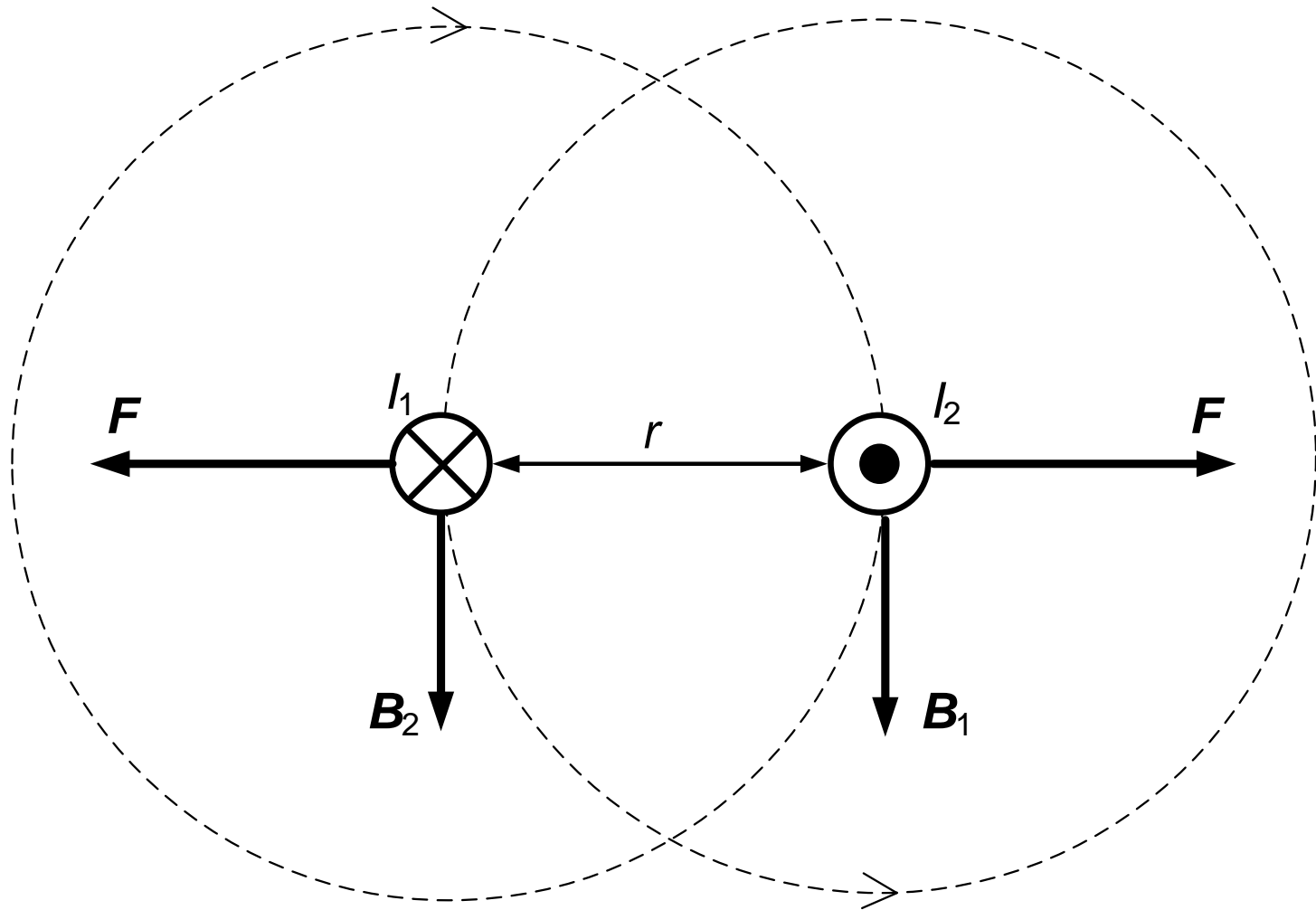
⊙ – prąd płynie od ekranu

Siła elektrodynamiczna to siła, z jaką pole magnetyczne działa na przewodnik, przez który płynie prąd elektryczny. Jest to efekt makroskopowy, wynikający z sumowania sił *Lorentza* działających na wszystkie poruszające się ładunki wewnątrz przewodnika.

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

\mathbf{l} – długość przewodnika z prądem I , który jest „obejmowany” polem magnetycznym \mathbf{B} .

Kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej wyznaczamy za pomocą **reguły lewej dłoni**: ustaw lewą dłoń tak, aby linie pola magnetycznego wchodziły w jej wnętrze (od północnego bieguna **N** do południowego **S**). Wyprostowane palce ułoż zgodnie z kierunkiem przepływu prądu (od + do -). Odstawiony pod kątem prostym kciuk wskaże kierunek i zwrot działającej siły elektrodynamicznej.



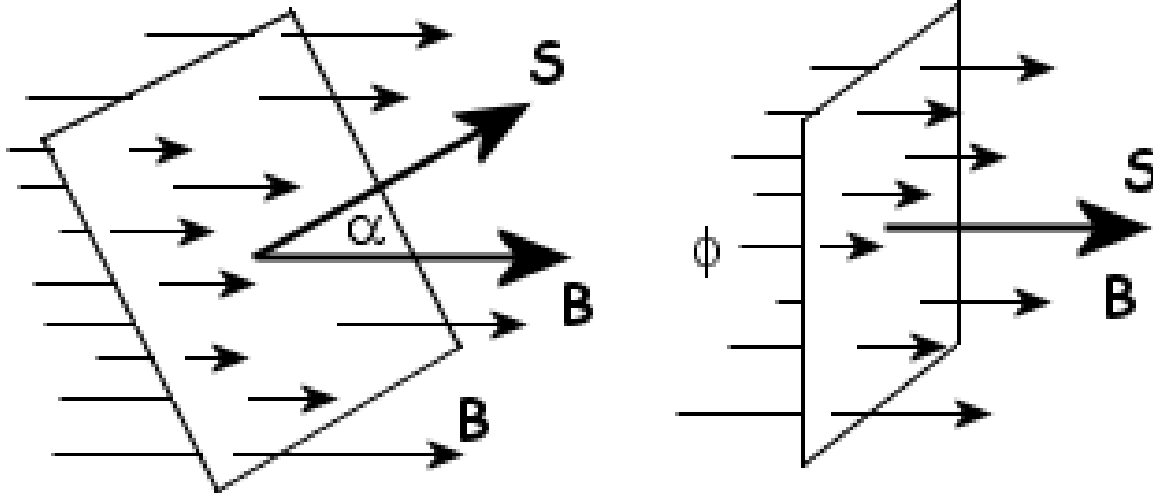
$$F = \mu_0 \mu_r \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot r} l$$

Zjawisko to jest fundamentem działania wielu urządzeń codziennego użytku. Wykorzystuje się je m.in. w:

- silnikach elektrycznych,
- głośnikach (cewka w polu magnetycznym porusza membranę),
- miernikach elektrycznych (np. amperomierzach wskazówkowych).

Strumień indukcji pola magnetycznego Φ zdefiniowany jest jako iloczyn skalarny wektorów indukcji pola magnetycznego \mathbf{B} oraz powierzchni \mathbf{S} . Jednostką strumienia magnetycznego jest Wb (weber).

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$



Prawo *Lenza* lub reguła *Lenza*, zwana również regułą przekory – reguła określająca kierunek zjawisk zachodzących w procesie indukcji elektromagnetycznej.

Kierunek indukowanej siły elektromotorycznej jest taki, że wywołany przez nią prąd zawsze przeciwdziała zmianie strumienia pola magnetycznego, która tę siłę generuje.



Prawo indukcji *Faraday'a*

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na powstawaniu siły elektromotorycznej SEM w obwodzie podczas przemieszczania się względem siebie źródła pola magnetycznego i tego obwodu.

Siła elektromotoryczna SEM, prąd i pole magnetyczne powstają w obwodzie tylko podczas ruchu magnesu. Gdy magnes spoczywa to bez względu na to czy znajduje się w oddaleniu od obwodu czy bezpośrednio przy nim nie obserwujemy zjawiska indukcji.

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