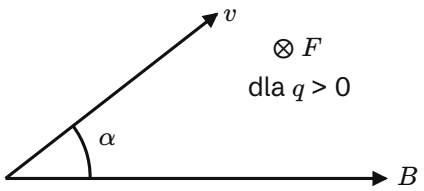
Pole magnetyczne

siła Lorentza ★ $F = qvB\sin\alpha$

Magnetyczna część siły Lorentza (bez pola elektrycznego) jest prostopadła do prędkości cząstki i do wektora indukcji. Dla ładunku ujemnego ma zwrot przeciwny niż dla dodatniego. q to wartość bezwzględna ładunku, a α to kąt między wektorem prędkości a wektorem indukcji (0° ≤ α ≤ 180°). Wzór opisuje wartość magnetycznej części siły.



|F| = |q|vB sinα; ⊗ w głąb kartki

Kąt między prędkością a polem magnetycznym.

siła elektrodynamiczna $F = BIl\sin\alpha$

Prosty odcinek przewodnika w jednorodnym polu; α to kąt między kierunkiem prądu a polem.

promień toru cząstki w polu magnetycznym $r = \dfrac{mv}{|q|B}$

Jednorodne pole magnetyczne, ruch nierelatywistyczny; q ≠ 0 to ładunek cząstki; we wzorze stoi |q|, bo promień nie zależy od znaku ładunku (znak decyduje tylko o kierunku skrętu). Prędkość jest prostopadła do pola, a tor kołowy.

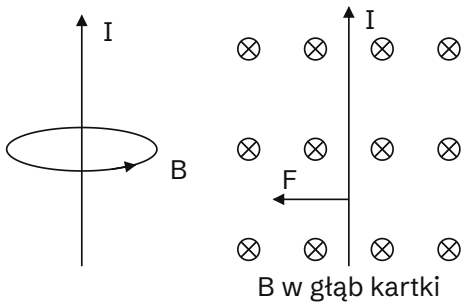
okres obiegu cząstki w polu magnetycznym

$$T = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

Jednorodne pole magnetyczne, ruch nierelatywistyczny; q ≠ 0 to ładunek cząstki; we wzorze stoi |q|, bo okres nie zależy od znaku ładunku (znak decyduje tylko o kierunku skrętu). Okres ruchu kołowego (lub składowej kołowej toru śrubowego) nie zależy od prędkości; przy prędkości równoległej do pola cząstka nie obiega linii pola. W torze śrubowym promień zależy tylko od składowej prędkości prostopadłej do pola.

pole wokół prostoliniowego przewodnika $B = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}$

Bardzo długi prostoliniowy przewodnik w próżni, z prądem stałym. Punkt jest poza przewodnikiem, w odległości r > 0 od osi i daleko od jego końców; pomijamy pole innych źródeł.



B w głąb kartki

Kierunek pola wokół przewodnika i siły na przewodnik. Gdy kciuk prawej dłoni wskazuje kierunek prądu I, zgięte palce pokazują kierunek linii pola B wokół przewodnika. Na przewodnik w polu działa siła prostopadła do I i do B: przy prądzie w górę i polu w głąb kartki (⊗) siła jest skierowana w lewo.

pole wewnątrz zwojnicy $B = \dfrac{\mu_0 N I}{l}$

Długa zwojnica powietrzna lub w próżni; pole wewnątrz daleko od końców, n oznacza całkowitą liczbę zwojów, a n/l liczbę zwojów na jednostkę długości.

pole w środku pętli kołowej $B = \dfrac{\mu_0 I}{2r}$

Środek pojedynczej cienkiej kołowej pętli z ustalonym prądem, w próżni lub w przybliżeniu w powietrzu.

moment siły działający na ramkę z prądem

$$M = ISB\sin\alpha$$

Moment siły jest największy, gdy płaszczyzna ramki jest równoległa do linii pola (α = 90°), i zerowy, gdy jest do nich prostopadła. Na tym działa silnik elektryczny. Wzór dla jednej pętli w jednorodnym polu; dla N zwojów moment jest N razy większy.

prawo Ampère'a $\oint B_\tau \,\mathrm{d}l = \mu_0 I$

Magnetostatyka w próżni: pola i prądy stacjonarne. B_τ jest składową styczną ze znakiem, nie samą wartością B. Zwrot obiegu i dodatni zwrot prądu wiąże reguła prawej dłoni; przy zmiennym polu elektrycznym potrzebny jest człon Maxwella.

Równania Maxwella

równania Maxwella (postać całkowa)

$$\oiint \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \qquad \oiint \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{A} = 0$$

$$\oint \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t} \qquad \oint \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0\varepsilon_0\frac{\mathrm{d}\Phi_E}{\mathrm{d}t}$$

Postać dla próżni. Dwie pierwsze całki obejmują zamkniętą powierzchnię z wektorem dA skierowanym na zewnątrz. Q oznacza sumę ładunków wewnątrz. Dwie ostatnie całki biegną po nieruchomej zamkniętej krzywej. Strumienie i prąd I odnoszą się do powierzchni rozpiętej na tej krzywej; zwrot obiegu i normalną powierzchni wiąże reguła prawej dłoni. I ma znak zgodny z wybraną normalną.

Indukcja elektromagnetyczna

strumień indukcji magnetycznej $\Phi_B = BS\cos\alpha$

Płaska powierzchnia w jednorodnym polu; α to kąt między polem a prostopadłą do powierzchni.

prawo Faradaya ★ $\varepsilon = -\dfrac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$

W zamkniętym obwodzie prąd indukcyjny ma taki kierunek, że jego pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia, która go wywołała. Stąd minus w prawie Faradaya. Iloraz ΔΦ/Δt wyznacza średnią SEM w czasie Δt > 0. Gdy strumień zmienia się liniowo, SEM chwilowa jest stała i w całym przedziale równa średniej; przy zmiennej szybkości zmian wartość chwilową wyznacza się w granicy Δt dążącego do zera. Wzór dotyczy jednego zwoju: Φ to strumień przez jeden zwój. Dla cewki o n zwojach ε = −n · ΔΦ/Δt, gdzie ΔΦ to zmiana strumienia przez jeden zwój. Minus mówi o kierunku SEM (reguła Lenza); wartość SEM to |ΔΦ/Δt| (dla cewki n · |ΔΦ/Δt|).

SEM w przewodniku poruszającym się w polu $\varepsilon = Blv$

Prosty przewodnik o długości l, jego prędkość v i jednorodne pole B są wzajemnie prostopadłe. Wzór podaje wartość SEM; jej istnienie nie wymaga zamknięcia obwodu.

transformator $\dfrac{U_1}{U_2} = \dfrac{N_1}{N_2}$

Transformator idealny (bez strat), zasilany napięciem zmiennym; dla napięcia stałego napięcie wtórne wynosi 0. Stosunek napięć jest taki sam dla wartości skutecznych i dla amplitud.

transformator: natężenia prądów $\dfrac{I_1}{I_2} = \dfrac{N_2}{N_1}$

$I_1U_1 = I_2U_2$

Transformator idealny (bez strat), zasilany prądem zmiennym. Stosunek natężeń jest taki sam dla wartości skutecznych i dla amplitud. Druga postać (z karty CKE) to równość mocy po obu stronach transformatora idealnego.

SEM samoindukcji $\varepsilon = -L\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$

W zamkniętym obwodzie prąd indukcyjny ma taki kierunek, że jego pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia, która go wywołała. Stąd minus w prawie Faradaya. Przy stałej indukcyjności L iloraz ΔI/Δt daje średnią SEM w czasie Δt. Gdy natężenie zmienia się liniowo, SEM chwilowa jest stała i w całym przedziale równa średniej.

SEM prądnicy $\varepsilon = NBS\omega\sin(\omega t) \quad \varepsilon_{\max} = NBS\omega$

Ramka z n zwojami obraca się ze stałą prędkością kątową ω w jednorodnym polu magnetycznym, wokół osi prostopadłej do pola. Strumień zmienia się okresowo, więc SEM jest sinusoidalna, a jej największa wartość to nBSω. Postać z sin(ωt) zakłada, że w chwili t = 0 płaszczyzna ramki jest prostopadła do pola.

Prąd przemienny

napięcie skuteczne $U_{\mathrm{sk}} = \dfrac{U_0}{\sqrt{2}}$

Relacja $U_{sk} = U_0/\sqrt{2}$ dotyczy napięcia o przebiegu sinusoidalnym.

natężenie skuteczne $I_{\mathrm{sk}} = \dfrac{I_0}{\sqrt{2}}$

Relacja $I_{sk} = I_0/\sqrt{2}$ dotyczy prądu o przebiegu sinusoidalnym; I_0 jest amplitudą, a nie wartością międzyszczytową.

Elektrodynamika

równanie ciągłości ładunku $\dfrac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot\mathbf{j} = 0$

Lokalny zapis zachowania ładunku.

równania Maxwella — postać różniczkowa

$$\nabla\cdot\mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0, \qquad \nabla\cdot\mathbf{B} = 0$$

$$\nabla\times\mathbf{E} = -\partial_t\mathbf{B}, \qquad \nabla\times\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{j} + \mu_0\varepsilon_0\partial_t\mathbf{E}$$

Próżnia; źródłami są gęstość ładunku ρ i gęstość prądu j.

wektor Poyntinga $\mathbf{S} = \dfrac{1}{\mu_0}\mathbf{E}\times\mathbf{B}$

W próżni; kierunek przepływu energii elektromagnetycznej.

Symbole i jednostki

symbol	znaczenie	jednostka
A	pole powierzchni; dA to zorientowany element powierzchni	m^2
B, $\mathbf{B}$	indukcja magnetyczna	T
B_τ	składowa indukcji wzdłuż stycznej zgodnej z obiegiem krzywej (ze znakiem)	T
E	wektor natężenia pola elektrycznego	$\mathrm{V/m}$
$\mathbf{E}$	natężenie pola elektrycznego	$\mathrm{V/m}$
F	siła	N
I	natężenie prądu	A
I_0	natężenie maksymalne (amplituda)	A
I_1	natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym	A
I_2	natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym	A
I_{sk}	natężenie skuteczne	A
r	promień toru, odległość od przewodnika	m
S	powierzchnia	m^2
$\mathbf{S}$	gęstość strumienia energii	$\mathrm{W/m^2}$
t	czas	s
Δt	czas zmiany	s
T	okres obiegu cząstki	s
U_0	napięcie maksymalne (amplituda)	V
U_1	napięcie na uzwojeniu pierwotnym	V
U_2	napięcie na uzwojeniu wtórnym	V
U_{sk}	napięcie skuteczne	V
v	prędkość	$\mathrm{m/s}$
ΔI	zmiana natężenia prądu	A
$\mathbf{j}$	gęstość prądu	$\mathrm{A/m^2}$
l	długość przewodnika albo zwojnicy; w prawie Ampère'a i równaniach Maxwella długość zamkniętej krzywej	m
L	indukcyjność zwojnicy	H
m	masa cząstki	kg
M	moment siły działający na ramkę	$\mathrm{N{\cdot}m}$
N	liczba zwojów	$-$
N_1	liczba zwojów uzwojenia pierwotnego	$-$
N_2	liczba zwojów uzwojenia wtórnego	$-$
q	wartość bezwzględna ładunku	C
Q	ładunek wewnątrz powierzchni	C
α	kąt	rad
ε	siła elektromotoryczna indukcji (SEM)	V
ε_0	przenikalność elektryczna próżni ≈ 8,85 · 10⁻¹²	$\mathrm{C^2/(N{\cdot}m^2)}$
$\varepsilon_{\max}$	największa SEM (amplituda)	V
μ_0	przenikalność magnetyczna próżni ≈ 4π · 10⁻⁷	$\mathrm{N/A^2}$
ρ	gęstość ładunku	$\mathrm{C/m^3}$
Φ_B	strumień indukcji magnetycznej	Wb
Φ_E	strumień pola elektrycznego przez powierzchnię	$\mathrm{V{\cdot}m}$
$\Delta\Phi_B$	zmiana strumienia	Wb
ω	prędkość kątowa obrotu ramki	$\mathrm{rad/s}$