

Розділ 3. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

Електричне поле

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}$$

– закон Кулона; F – сила взаємодії точкових зарядів q_1 і q_2 ; ϵ_0 – електрична стала; ϵ – діелектрична проникність; r – відстань між зарядами.

$$\sum_{i=1}^n q_i = const$$

– закон збереження електричного заряду; $\sum_{i=1}^n q_i$ – алгебраїчна

сума зарядів, які входять до ізолюваної системи; n – число зарядів.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

– напруженість у деякій точці електростатичного поля; \vec{F} – сила, що діє на точковий позитивний заряд q_0 , що знаходиться в цій точці поля.

$$E = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}$$

– напруженість електричного поля, яке створюється металеву сферою радіусом R , що несе заряд Q , на відстані R від сфери (при $R \geq R$); всередині сфери (при $R < R$) напруженість $E=0$.

$$E = \frac{2\tau}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r}$$

– напруженість поля, що створюється нескінченною довгою рівномірно зарядженою ниткою (або циліндром) на відстані r від її осі; τ - лінійна густина заряду.

$$\tau = \frac{\Delta q}{\Delta l}$$

– лінійна густина заряду є величина, яка дорівнює відношенню заряду, розподіленого по нитці, до довжини нитки (циліндра).

$$E = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$$

– напруженість поля, що створюється нескінченною рівномірно зарядженою площиною; σ – поверхнева густина заряду на площині.

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}$$

– поверхнева густина заряду є величиною, яка дорівнює відношенню заряду Δq , розподіленого по поверхні, до площі ΔS цієї поверхні.

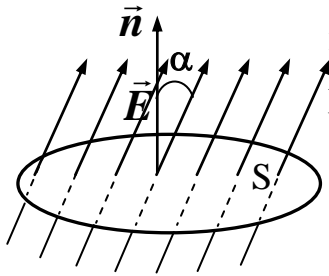
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$$

– напруженість поля, яке створюється двома паралельними нескінченними рівномірно і різнойменно зарядженими площинами, з однаковою за абсолютним значенням поверхневою густиною σ заряду.

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

– принцип суперпозиції (накладання) електричних полів, згідно з яким напруженість результуючого поля, створеного двома (і більше) точковими зарядами, дорівнює векторній сумі напруженостей \vec{E}_i полів, які додаються.

$\Phi_E = \int_S E \cos \alpha dS$ – потік вектора напруженості \vec{E} електричного поля через довільну поверхню S , розміщену в неоднорідному електричному полі; α – кут між вектором \vec{E} і нормаллю \vec{n} до елемента поверхні.



$\Phi_E = \oint_S E_n dS$ – потік вектора напруженості \vec{E} електричного поля через замкнену поверхню, площею S .

$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \sum_{i=1}^n q_i$ – теорема Остроградського – Гаусса; Φ_E – потік вектора напруженості \vec{E} через будь-яку замкнену поверхню, яка охоплює заряди q_1, q_2, \dots, q_n ; $\sum_{i=1}^n q_i$ – алгебраїчна

сума зарядів, розташованих в середині замкненої поверхні.

$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$ – електричне зміщення; співвідношення справедливе лише для ізотропних діелектриків.

$\oint_L E_l dl$ – циркуляція вектора напруженості \vec{E} виражається інтегралом по замкненому контуру довжиною L ; E_l – проекція вектора напруженості \vec{E} на напрям дотичної до контуру в деякій точці.

$\oint_L E_l dl = 0$ – циркуляція вектора напруженості електростатичного поля дорівнює нулю.

Потенціал. Енергія системи електричних зарядів. Робота по переміщенню заряду в полі.

$\phi = \frac{W}{q}$ – потенціал електричного поля; W – потенціальна енергія точкового позитивного заряду q , розміщеного в даній точці поля; A – робота сил поля по переміщенню точкового позитивного заряду з даної точки в нескінченність. Потенціал поля в нескінченності умовно прийнятий таким, що дорівнює нулю.

$\phi = \frac{A}{q}$ – робота сил поля по переміщенню точкового позитивного заряду з даної точки в нескінченність. Потенціал поля в нескінченності умовно прийнятий таким, що дорівнює нулю.

$\phi = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r}$ – потенціал електричного поля, яке створене точковим зарядом q на відстані r від заряду.

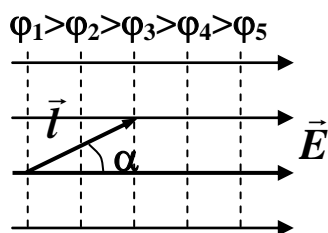
$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i$ – потенціал електричного поля, що створюється системою n точкових зарядів в точці, згідно з принципом суперпозиції електричних полів, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, які утворюються окремими точковими зарядами q_1, q_2, \dots, q_n .

$\vec{E} = -\text{grad}\varphi$ – зв'язок потенціалу φ з напруженістю \vec{E} електричного поля в загальному випадку; $\text{grad}\varphi$ – градієнт потенціалу.

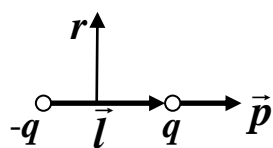
$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$ – зв'язок потенціалу з напруженістю у випадку однорідного електричного поля, тобто поля, напруженість якого в кожній його точці однакова як за абсолютним значенням, так і за напрямком; φ_1 і φ_2 – потенціали двох екіпотенціальних поверхонь; d – відстань між цими поверхнями.

$A = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ – робота, яка здійснюється електричним полем точкового заряду q_1 при переміщенні заряду q_2 ; r_1 та r_2 – початкове і кінцеве положення заряду q_2 відносно заряду q_1 .

$A = qEl \cos \alpha = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ – робота, яка здійснюється однорідним електричним полем при переміщенні заряду q із точки поля з потенціалом φ_1 у точку з потенціалом φ_2 ; \vec{l} – переміщення; α – кут між векторами \vec{E} і \vec{l} (див. рис).



Електричний диполь



Диполь – це система двох точкових, рівних за абсолютним значенням і протилежних за знаком зарядів, які знаходяться на деякій відстані один від одного. Вектор \vec{l} , проведений від негативного до позитивного заряду називається плечем диполя.

$\vec{p} = |q|\vec{l}$ – дипольний момент \vec{p} є вектором, який дорівнює добутку заряду $|q|$ на плече \vec{l} .

$E = \frac{p}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^3}$ – напруженість поля диполя в точці, яка лежить на перпендикулярі до плеча диполя, побудованого на його середині ($\alpha = \pi/2$), r – відстань.

$\varphi = \frac{p}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2} \cos \alpha$ – потенціал поля точкового диполя.

$\vec{M} = [\vec{p} \times \vec{E}]$ – механічний момент, який діє на диполь, розміщений в однорідному електричному полі з напруженістю \vec{E} ; \vec{p} – електричний момент диполя; α – кут між векторами \vec{p} і \vec{E} .

Електроємність. Конденсатори.

$C = \frac{q}{\Phi}$ – електроємність провідника; q - заряд, наданий провіднику; Φ - потенціал провідника (при умові, що в нескінченості потенціал провідника приймається таким, що дорівнює нулю).

$C = \frac{q}{U}$ – електроємність конденсатора; q – заряд пластин; U – різниця потенціалів між пластинами.

$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ – електроємність плоского конденсатора; S – площа пластини (однієї) конденсатора; d – відстань між пластинами.

$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}$ – електроємність батареї N конденсаторів при послідовному з'єднанні.

$C = \sum_{i=1}^N C_i$ – електроємність батареї, складеної з паралельно з'єднаних конденсаторів.

$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$ – енергія зарядженого конденсатора.

Основні закони постійного струму

$I = \frac{dq}{dt}$ – сила електричного струму

$j = \frac{I}{S}$ – абсолютне значення густини струму чисельно дорівнює силі струму, яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу провідника.

$\vec{j} = qn\langle\vec{v}\rangle$ – вектор густини струму; $\langle\vec{v}\rangle$ - середня швидкість напрямленого руху заряджених частинок; q – заряд частинки; n – концентрація частинок.

$R = \rho \frac{l}{S}$ – опір однорідного провідника; ρ – питомий опір речовини провідника; l – його довжина.

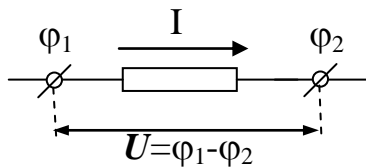
$\sigma = \frac{1}{R}$ – провідність провідника.

$\gamma = \frac{1}{\rho}$ – питома провідність речовини.

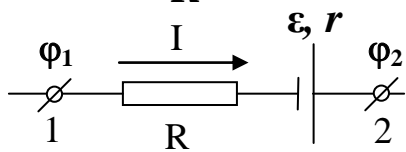
$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ – залежність питомого опору провідника від температури; ρ і ρ_0 – питомі опори відповідно при даній температурі t і 0°C ; α – температурний коефіцієнт опору; t – температура (за шкалою Цельсія).

$\gamma = qn(u_+ + u_-)$ – зв'язок питомої провідності γ з рухомістю b заряджених частинок (іонів); q – заряд іона; n – концентрація іонів; u_+ та u_- – рухомості позитивних та від'ємних іонів.

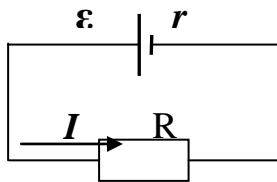
$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$ – закон Ома для однорідної ділянки кола; $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – різниця потенціалів на кінцях ділянки; U – напруга на ділянці кола; R – опір ділянки.



$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon}{R}$ – закон Ома для неоднорідної ділянки кола; $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – різниця потенціалів на кінцях ділянки; ε – ЕРС джерела струму, які входять до ділянки; R – опір кола (ділянки кола).



$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$ – закон Ома для замкненого (повного) кола ($\varphi_1 = \varphi_2$); ε – ЕРС джерела струму; R – зовнішній опір кола; r – внутрішній опір джерела струму.



$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ – закон Ома в диференціальній формі; \mathbf{j} – вектор густини струму; σ – питома провідність; \mathbf{E} – напруженість електричного поля.

$\sum_{i=1}^n I_i = 0$ – перший закон Кірхгофа: алгебраїчна сума сил струмів, які сходяться у вузлі дорівнює нулю.

$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k$ – другий закон Кірхгофа для контурів.

$R = \sum_{i=1}^n R_i$ – опір системи n провідників при послідовному з'єднанні.

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad \text{– опір системи } n \text{ провідників при паралельному з'єднанні.}$$

$A = IUt$ – робота електричного струму.

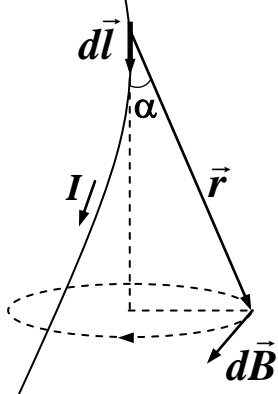
$P = IU$ – потужність у колі електричного струму.

$Q = I^2 Rt$ – закон Джоуля-Ленца, який визначає кількість теплоти, виділеної під час проходження струму силою I на ділянці з опором R за час t .

Магнітне поле електричного струму

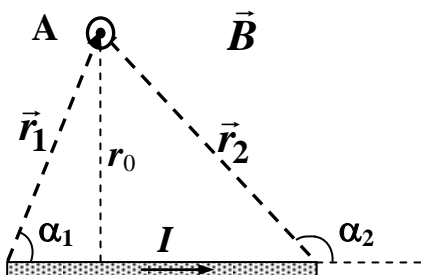
$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$ – зв'язок магнітної індукції \vec{B} з напруженістю \vec{H} магнітного поля; μ – магнітна проникність ізотропного середовища (для вакууму або повітря $\mu=1$); μ_0 – магнітна стала.

$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{[d\vec{l}\vec{r}]}{r^3}$ – закон Біо-Савара-Лапласа; $d\vec{B}$ – магнітна індукція поля, утвореного елементом провідника $d\vec{l}$ – із струмом I завдовжки dl (напрямок вектора $d\vec{l}$ співпадає з напрямком струму в елементі провідника); \vec{r} – радіус-вектор, спрямований від елемента провідника $d\vec{l}$ до точки, в якій визначається магнітна індукція. Напрямок вектора \vec{B} визначається за правилом буравчика.



$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}$ – абсолютне значення вектора магнітної індукції в центрі колового струму; R – радіус колового витка.

$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$ – магнітна індукція в довільній точці А поля, яке створює відрізок провідника зі струмом I ; α_1 і α_2 – кути, утворені радіус-векторами \vec{r}_1 та \vec{r}_2 та провідником.



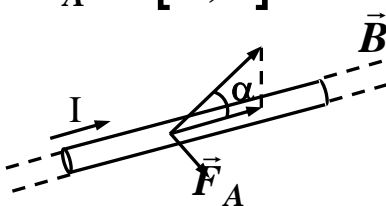
$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R}$ – магнітна індукція поля прямого струму; R – відстань від осі дроту до точки, в якій визначається магнітна індукція.

$B = \mu\mu_0 nI$ – магнітна індукція поля, що в центрі соленоїда зі струмом I (або тороїда на його осі); n – число витків на одиницю довжини (відношення числа витків соленоїда до його довжини).

$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$ – принцип суперпозиції магнітних полів.

Сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі

$d\vec{F}_A = I[d\vec{l}, \vec{B}]$ – сила, що діє на провідник зі струмом в однорідному магнітному полі (закон Ампера); $d\vec{l}$ – довжина прямого відрізка дроту; α – кут між напрямком струму і вектором індукції \vec{B} .



$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}$ – сила взаємодії двох провідників зі струмами I_1 і I_2 ; l – довжина провідників; d – відстань між провідниками.

$\vec{p}_m = \vec{n}IS$ – магнітний момент плоского контуру зі струмом I ; \vec{n} – одиничний вектор нормалі до площини контуру; S – площа контуру.

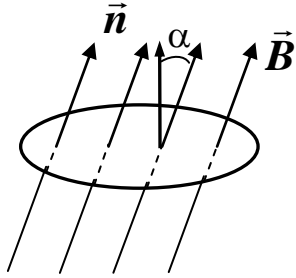
$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$ – механічний (обертальний) момент, який діє на контур зі струмом I в однорідному магнітному полі з індукцією \vec{B} ; α – кут між векторами \vec{p}_m і \vec{B} .

$\vec{F}_L = q[\vec{v}\vec{B}]$ – сила Лоренца, яка діє на заряджену рухомию частинку в магнітному полі; q – заряд частинки; \vec{v} – швидкість частинки; \vec{B} – вектор магнітної індукції; α – кут між векторами \vec{v} і \vec{B} .

Закон повного струму. Магнітний потік

$\oint H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i$ – закон повного струму – циркуляція вектора напруженості у випадку, якщо контур охоплює n струмів; H_l – проекція вектора \vec{H} на напрям дотичної до контуру, яка містить елемент dl ; $\sum_{i=1}^n I_i$ – алгебраїчна сума струмів, які охоплює контур.

$\Phi = BS \cos\alpha$ – магнітний потік Φ (потік вектора магнітної індукції \vec{B})



через плоский контур площею S у випадку однорідного поля; α - кут між вектором нормалі \vec{n} до площини контуру і вектором \vec{B} .

$A = I\Delta\Phi$ – робота по переміщенню замкненого контуру зі струмом I в магнітному полі; $\Delta\Phi$ – зміна магнітного потоку, який пронизує поверхню, обмежену контуром.

Електромагнітна індукція. Індуктивність

$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}$ – основний закон електромагнітної індукції (закон Фарадея-Максвелла); ε_i – ЕРС індукції; Ψ - потокозчеплення.

$\Psi = N\Phi$ – потокозчеплення, тобто повний магнітний потік, зчеплений з усіма витками соленоїда або тороїда; Φ – магнітний потік через один виток; N – число витків соленоїда або тороїда.

$\Phi = LI$ – магнітний потік, який пронизує контур зі струмом I ; L – індуктивність контуру.

$L = \mu\mu_0 n^2 V$ – індуктивність довгого соленоїда; n – відношення числа витків соленоїда до його довжини; V – об'єм соленоїда.

$\varepsilon_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ – ЕРС самоіндукції ε_{si} , що виникає в замкненому контурі під час зміни сили струму в ньому; L – індуктивність контуру.

$W = \frac{LI^2}{2}$ – енергія магнітного поля.

$\omega = \frac{W}{V}$ – об'ємна густина енергії магнітного поля соленоїда; W – енергія поля соленоїда; V – його об'єм.

$\omega = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$ – об'ємна густина енергії магнітного поля; B і H – індукція і напруженість поля.