

ТЕМА 8. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

§1. Сила струму. Густина струму

В **електродинаміці** розглядаються явища і процеси, що зв'язані з рухом електричних зарядів або макроскопічних заряджених тіл. Одним з найважливіших понять електродинаміки є поняття про електричний струм.

Електричним струмом називають всякий упорядкований рух електричних зарядів.

Електричний струм, який виникає у провіднику внаслідок того, що в ньому створюється електричне поле, називається **струмом провідності**.

Якщо перенесення електричних зарядів здійснюється при переміщенні у просторі зарядженого макроскопічного тіла, то виникає струм, що називається **конвекційним**.

Для появи й існування електричного струму треба, щоб виконувалися дві умови:

перша – наявність у даному середовищі вільних електричних зарядів – носіїв струму. Такими зарядами в металах є електрони провідності; у рідинах (електролітах) – позитивні та негативні іони; у газах - позитивні іони й електрони; в напівпровідниках – електрони і дірки;

друга – на електричні заряди необхідно, щоб діяла сила:

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Отже, в даному середовищі повинно існувати електричне поле, енергія якого витрачалась би на переміщення електричних зарядів.

Щоб струм був тривалим, енергія електричного поля повинна весь час поповнюватись, тобто потрібен такий пристрій, в якому би певний вид енергії безперервно перетворювався в енергію електричного поля. Такий пристрій називається **джерелом електрорушійної сили**, або джерелом струму.

За **напрямом електричного струму** умовно приймають напрямок руху позитивних електричних зарядів.

Кількісною мірою електричного струму служить **сила (величина) струму** – скалярна фізична величина, яка числово дорівнює електричному заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Якщо сила струму і його напрямок з часом не змінюються, то струм називається постійним. Тоді

$$dq = Idt, \quad q = I \int_0^t dt.$$

Звідси

$$I = \frac{q}{t}.$$

Щоб струм був постійний, треба, щоб в кожній частині провідника заряди не нагромаджувались і не зникали. Тому коло постійного струму повинно бути замкненим.

Для характеристики розподілу електричного струму по перерізу провідника вводять вектор густини струму \vec{j} .

Вектор густини струму \vec{j} напрямлений вздовж напрямку струму і чисельно дорівнює силі струму, який проходить через одиницю площі перерізу провідника, який проведений перпендикулярно до напрямку струму:

$$j = \frac{dI}{dS}.$$

Повна сила струму у провіднику:

$$I = \oint_S (\vec{j} d\vec{S}).$$

Виразимо силу і густину струму через середню швидкість $\langle \vec{u} \rangle$ впорядкованого руху зарядів у провіднику. За час dt через поперечний переріз S переноситься заряд $dq = nedV = ne \langle u \rangle S dt$. Сила струму

$$I = \frac{dq}{dt} = ne \langle u \rangle S,$$

отже, густина струму:

$$\vec{j} = ne \langle \vec{u} \rangle.$$

§2. Електрорушійна сила джерела. Напряга на ділянці кола

У джерелі ЕРС на носії струму повинні діяти сили неелектростатичного походження, які називаються **сторонніми**.

Ці сили можуть бути обумовлені хімічними процесами в гальванічних елементах і акумуляторах; дифузією носіїв струму в неоднорідному середовищі; електричними полями, які створюються магнітними полями, що змінюються з часом. Сторонні сили в генераторах, виникають за рахунок механічної енергії обертання ротора генератора.

Сторонні сили, переміщаючи електричні заряди, виконують роботу.

Фізична величина, що чисельно дорівнює роботі, яка виконується сторонніми силами під час переміщення одиничного позитивного заряду, називається **електрорушійною силою** (ЕРС), що діє в колі:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q}.$$

Стороння сила \vec{F}_{cm} , що діє на заряд q , дорівнює:

$$\vec{F}_{cm} = q\vec{E}_{cm}.$$

Робота сторонніх сил над зарядом q на замкненій ділянці кола дорівнює

$$A = \oint_L (\vec{F}_{cm} d\vec{l}) = \oint_L (q\vec{E}_{cm} d\vec{l}).$$

Тоді

$$\mathcal{E} = \oint_L (\vec{E}_{cm} d\vec{l}).$$

Отже, ЕРС, що діє в замкнутому колі, визначається **циркуляцією вектора напруженості сторонніх сил**.

ЕРС, яка діє на ділянці 1-2 електричного кола, дорівнює:

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{cm} d\vec{l}.$$

Результуюча сила, що діє в колі на заряд q :

$$\vec{F} = \vec{F}_{cm} + \vec{F}_e = q(\vec{E}_{cm} + \vec{E}).$$

Робота, яка виконується результуючою силою над зарядом q на ділянці 1-2, дорівнює

$$\begin{aligned}
 A_{12} &= q \int_1^2 (\vec{E}_{cm} d\vec{l}) + q \int_1^2 (\vec{E} d\vec{l}) = \\
 &= q \mathcal{E}_{12} + q(\varphi_1 - \varphi_2).
 \end{aligned}$$

Напругою U_{12} на ділянці 1-2 називається фізична величина, що визначається роботою, яка виконується сумарним полем електростатичних і сторонніх сил при переміщенні одиничного позитивного заряду на даній ділянці кола:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}.$$

Поняття напруги є узагальненням поняття різниці потенціалів: напруга на кінцях ділянки кола дорівнює різниці потенціалів в тому випадку, якщо на цій ділянці не прикладена ЕРС.

§3. Закон Ома для однорідної ділянки кола. Електричний опір провідника

Ділянка кола, на якій на носії струму діють сторонні сили, називається **неоднорідною**. Ділянка кола, на якій не діють сторонні сили, називається **однорідною**. Для однорідної ділянки кола

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Німецький фізик Ом експериментально встановив: сила струму I , що тече по однорідному металевому провіднику, пропорційна до напруги U на кінцях провідника:

$$I = \frac{U}{R},$$

де R – електричний опір провідника. Це рівняння виражає **закон Ома для однорідної ділянки кола**.

Одиниця опору – 1 Ом: 1 Ом – опір такого провідника, в якому при напрузі 1 В тече струм силою 1 А.

Величина $G = \frac{I}{U}$ – **електрична провідність** провідника.

Опір провідника залежить від його розмірів і форми, а також від матеріалу, з якого виготовлений провідник.

Для однорідного провідника **електричний опір R** прямо пропорційний до його довжини l і обернено пропорційний до площі його поперечного перерізу S :

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ де } \rho \text{ – питомий опір речовини провідника.}$$

§5. Закон Ома у диференціальній формі. Рухливість носіїв заряду.

Питома електропровідність

Подамо закон Ома для однорідної ділянки кола у диференціальній формі:

$$\frac{U}{l} = \rho \frac{I}{S}; \quad \frac{I}{S} = \frac{I U}{\rho l} = \sigma \frac{U}{l},$$

де $\sigma = \frac{I}{\rho}$ - питома електрична провідність.

Оскільки

$$\frac{U}{l} = E; \quad \frac{I}{S} = j,$$

то

$$j = \sigma E.$$

В ізотропному провіднику носії струму в кожній точці рухаються в напрямку вектора \vec{E} . Напрямки \vec{j} та \vec{E} збігаються. Тому

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{I}{\rho} \vec{E}.$$

Отримане співвідношення виражає закон Ома для однорідної ділянки кола в диференціальній формі.

Закон Ома в диференціальній формі зв'язує густину струму в кожній точці всередині провідника з напруженістю електричного поля в тій самій точці.

Оскільки напрямлений рух носіїв заряду створюється електричним полем у провіднику, то можна вважати, що середня швидкість $\langle \vec{u} \rangle$ напрямленого руху зарядів прямо пропорційна до напруженості \vec{E} поля в провіднику:

$$\langle \vec{u} \rangle \approx \vec{E}, \quad \text{або} \quad \langle \vec{u} \rangle = u_q \vec{E},$$

де u_q – рухливість носіїв заряду.

Рухливість носіїв заряду чисельно дорівнює швидкості напрямленого руху, якої вони набувають під дією електричного поля у провіднику з одиничною напруженістю.

Тоді формулу для густини струму можна записати у вигляді

$$\vec{j} = ne u_q \vec{E}.$$

Порівнюючи цю формулу з виразом $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, отримуємо

$$\sigma = en u_e.$$

Отже, **питома електропровідність** металів прямо пропорційна до концентрації вільних електронів та їх рухливості.

На неоднорідній ділянці кола на носії струму діють, крім електростатичних сил $\vec{F}_e = q\vec{E}$, сторонні сили $\vec{F}_{cm} = q\vec{E}_{cm}$. Тому середня швидкість впорядкованого руху носіїв $\langle \vec{u} \rangle$ буде пропорційна до сумарної сили $q(\vec{E} + \vec{E}_{cm})$. Відповідно густина струму буде пропорційна до суми напруженостей $\vec{E} + \vec{E}_{cm}$:

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \vec{E}_{cm}) = \frac{I}{\rho} (\vec{E} + \vec{E}_{cm}).$$

Це співвідношення є математичним виразом в **диференціальній формі закону Ома для неоднорідної ділянки кола**.

Помножимо скалярно обидві частини виразу для закону Ома на вектор $d\vec{l}$, який чисельно дорівнює довжині dl елемента провідника і напрямлений вздовж вектора густини струму:

$$(\vec{j} d\vec{l})\rho = (\vec{E} d\vec{l}) + (\vec{E}_{cm} d\vec{l}).$$

Оскільки вектори \vec{j} та $d\vec{l}$ збігаються за напрямком, то $(\vec{j} d\vec{l}) = j dl$. Величина густини струму $j = \frac{I}{S}$. Отже,

$$I\rho \frac{dl}{S} = (\vec{E} d\vec{l}) + (\vec{E}_{cm} d\vec{l}).$$

Інтегруючи вздовж довжини ділянки кола 1-2 і враховуючи, що сила струму по всіх перерізах кола однакова, отримуємо

$$I \int_1^2 \rho \frac{dl}{S} = \int_1^2 (\vec{E} d\vec{l}) + \int_1^2 (\vec{E}_{cm} d\vec{l}).$$

Як було показано вище,

$$\int_1^2 (\vec{E} d\vec{l}) = \varphi_1 - \varphi_2, \quad \int_1^2 (\vec{E}_{cm} d\vec{l}) = \mathcal{E}_{12},$$

а інтеграл $\int_1^2 \rho \frac{dl}{S} = R_{12}$ - опір ділянки кола 1-2. Для однорідного провідника

$$R_{12} = \rho \frac{l_{12}}{S},$$

де l_{12} - довжина провідника між перерізами 1-2. Отже,

$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}.$$

Поділивши на R_{12} , отримаємо математичний вираз закону Ома для неоднорідної ділянки кола:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R_{12}} = \frac{U_{12}}{R_{12}}.$$

Силу струму треба розглядати як алгебраїчну величину. Якщо струм тече по ділянці кола від перерізу 1 до перерізу 2, то $I > 0$, якщо струм тече в протилежному напрямку, то $I < 0$.

ЕРС \mathcal{E}_{12} є теж величиною алгебраїчною. У випадку, коли ЕРС сприяє руху позитивних носіїв струму у напрямку 1-2, то $\mathcal{E}_{12} > 0$, якщо ЕРС перешкоджає руху позитивних носіїв у цьому напрямку, то $\mathcal{E}_{12} < 0$ (рис. 41).

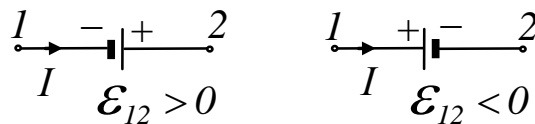


Рис. 41

§6. Закон Ома для замкнутого кола. Теплова дія електричного струму

Якщо електричне коло замкнене, то точки 1 і 2 збігаються, тому $\varphi_1 = \varphi_2$ і $R_{12} = R$, де R - загальний опір кола.

Тому закон Ома для замкнутого кола має такий вигляд:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R},$$

де \mathcal{E} - алгебраїчна сума всіх електрорушійних сил, прикладених у цьому колі.

Нехай замкнене електричне коло складається із джерела струму з ЕРС \mathcal{E} і внутрішнім опором r і зовнішньої частини, яка має опір R_{308} .

Тоді закон Ома для замкнутого кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{308} + r}.$$

Якщо коло розімкнуте, то

$$\mathcal{E}_{12} = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Це означає, що ЕРС, прикладена до розімкнутого кола, дорівнює різниці потенціалів на кінцях цього кола.

Розглянемо однорідний провідник, до якого прикладена напруга U . За час dt через переріз провідника переноситься заряд $dq = Idt$. Оскільки струм представляє

переміщення заряду dq під дією електричного поля, то робота струму

$$dA = dqU = IUdt = I^2 Rdt = \frac{U^2}{R} dt .$$

Потужність струму:

$$P = \frac{dA}{dt} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} .$$

Якщо струм проходить по нерухомому металевому провіднику, то вся робота струму йде на його нагрівання і за законом збереження енергії

$$dQ = dA .$$

Тоді закон **Джоуля-Ленца** має вигляд

$$dQ = I U dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt .$$

Виділимо в провіднику елементарний циліндричний об'єм $dV = dSdl$, опір якого $R = \rho \frac{dl}{dS}$, а за законом Джоуля-Ленца за час dt в цьому об'ємі виділиться теплота

$$dQ = I^2 Rdt = (jdS)^2 \rho \frac{dl}{dS} dt = \rho j^2 dVdt .$$

Кількість теплоти, що виділяється за одиницю часу в одиниці об'єму, називається **густиною теплової потужності струму**:

$$\omega = \frac{dQ}{dVdt} .$$

Отже,

$$\omega = \rho j^2 .$$

Оскільки

$$j = \sigma E , \text{ а } \rho = \frac{1}{\sigma} ,$$

то

$$\omega = jE = \sigma E^2 .$$

Одержали **закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі**.