

МОДУЛЬ 3

ЛЕКЦІЯ 7

Електричний струм

Електричним струмом називають явище перенесення електричного заряду в провідниках. В провідниках перенесення заряду електричним струмом здійснюється завдяки впорядкованому руху носіїв струму. В металах носіями струму є електрони, в розчинах електролітів носіями є іони, в плазмі – іони та електрони, в напівпровідниках – електрони та дірки.

Дія електричного струму на середовище та фізичні процеси визначається факторами, які супроводжують це явище. Наприклад, при проходженні струму провідник нагрівається. При проходженні струму в електроліті відбувається виділення речовини. Не відбувається нагрівання при проходженні струму в надпровіднику. Загальною ознакою електричного струму у будь-якому провіднику є утворення струмом магнітного поля.

В природі масштабні струми виникають в магнітосфері та іоносфері, вони є причиною збурення магнітного поля Землі і супроводжуються так званими магнітними бурями чи суббурями, а також полярним сяйвом, яке спостерігається на півночі і виникає у верхній атмосфері, точніше – в іоносфері.

Ще одне, також яскраве природне явище, при якому тече масштабний короткочасний струм, – це блискавка. В середньому на Землі кожну секунду відбувається біля 10^2 блискавок в основному в екваторіальній частині Землі. Блискавки заряджають Землю від'ємним зарядом, тому між поверхнею землі та іоносферою існує різниця потенціалів біля 500 кВ, а біля поверхні землі в умовах «спокійної» незабрудненої атмосфери є електричне поле, напруженість якого має величину приблизно 100 В/м. Під грозовою хмарою величина напруженості атмосферного електричного поля може зростати до декількох кіловольт на метр. Атмосферне електричне поле концентрується на вістрях-провідниках, наприклад, на щоглах кораблів чи шпильях соборів, де воно зростає по величині і призводить до ще одного феноменального природного явища – вогнів Ельма.

Сила струму

Електричний струм характеризують фізичною величиною, яку називають *силою струму*, – вона визначається як швидкість перенесення заряду через переріз провідника:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}, \text{ або } I = \frac{dq}{dt}$$

де Δq – величина заряду, перенесеного через переріз провідника, Δt – час, за який було перенесено цей заряд.

Величина заряду, перенесеного струмом, дорівнює

$$dq = Idt, \text{ або } q = \int_{t_1}^{t_2} I(t)dt$$

де $I(t)$ – миттєве значення струму, q – заряд перенесений через переріз провідника за інтервал часу $[t_1, t_2]$.

Середня величина сили струму I визначається з відношення перенесеного заряду до проміжку часу, протягом якого було перенесено заряд:

$$\bar{I} = \langle I \rangle = \frac{q}{t_2 - t_1}, \text{ або } \bar{I} = \langle I \rangle = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} I(t)dt$$

де середнє позначено або рисою зверху, або дужками.

Для *постійного* (стаціонарного) струму величина сили струму постійна,

$I(t) = const$, тому перенесений заряд прямо пропорційний часу

$$q = I(t_2 - t_1), \text{ або } q = It$$

де $t_1 = 0$, а t_2 – довільний момент часу, $t_2 = t$.

Напрямок струму визначається напрямком перенесення додатного заряду. Коли струм відбувається при впорядкованому русі електронів, які є від'ємно зарядженими частинками, то струм направлений протилежно до їх руху.

Математично це означає, що коли в провіднику заряд переносять додатні і від'ємні носії, і коли вклади в струм від них співпадають за напрямком, то сила струму буде дорівнювати сумі

$$I = \frac{dq_+}{dt} + \frac{|dq_-|}{dt},$$

де в другому доданку цієї суми стоїть модуль від'ємного заряду, який під час струму рухається протилежно руху додатного заряду.

В СІ одиницею сили струму є ампер, $1 \text{ A} = 1 \text{ Кл/с}$.

Густина електричного струму

Розглянемо провідник, в якому тече постійний електричний струм. Площа перерізу провідника S , а сила струму I . Через переріз провідника за час Δt буде перенесено заряд Δq . Величина перенесеного заряду дорівнює:

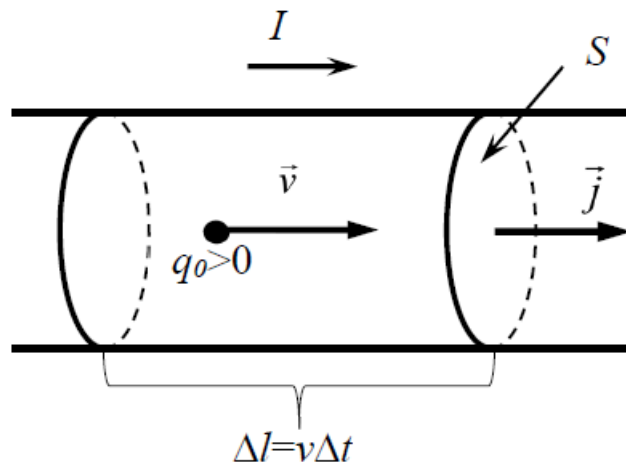
$$\Delta q = I\Delta t.$$

Врахуємо, що заряд переносять носії струму. Нехай носії мають додатний заряд, який позначимо oq . Швидкість впорядкованого руху носіїв

позначимо v . Переріз S перетнуть тільки ті носії, що знаходяться від перерізу на відстані, меншій за $l = v\Delta t$. Кількість таких носіїв дорівнює $N = nSl = nSv\Delta t$

де n – концентрація носіїв. Перенесений за час Δt струмом заряд дорівнює добутку заряду одного носія на кількість носіїв, що пройшли через переріз:

$$\Delta q = q_0 N = q_0 n S v \Delta t$$



З порівняння правих частин виразів для перенесеного струмом заряду отримаємо:

$$I\Delta t = q_0 n S v \Delta t .$$

Після скорочення множника Δt отримаємо вираз для величини сили струму:

$$I = q_0 n S v .$$

Відношення сили струму до площі перпендикулярного до струму перерізу називається *густиною електричного струму*. З попереднього виразу маємо:

$$j = q_0 n v ,$$

де j – густина електричного струму.

Густина електричного струму є векторною фізичною величиною, вектор якої колінеарний вектору швидкості впорядкованого руху носіїв струму.

Вираз для вектора густини електричного струму можна записати у вигляді:

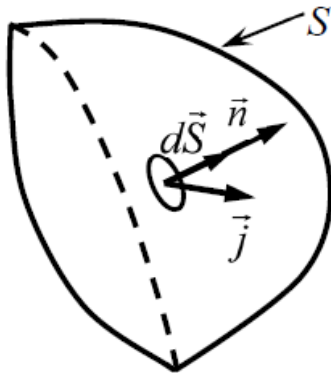
$$\vec{j} = q_0 n \vec{v} .$$

У випадку, наприклад, багатокomпонентної плазми вектор густини струму можна записати як суму де враховано, що під час протікання струму впорядковано рухаються декілька типів носіїв, заряди, концентрації і швидкість яких пронумеровано індексом i .

Величина сили струму через довільну елементарну поверхню дорівнює

скалярному добутку вектора елементарної ділянки поверхні на вектор густини струму, або добутку площі ділянки на нормальну до неї складову вектора густини сили струму:

$$dI = \vec{j} d\vec{S}, \text{ або } dI = j_n dS$$



Для будь-якої довільної поверхні величину сили струму можна знайти інтегруванням

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}, \text{ або } I = \int_S j_n dS.$$

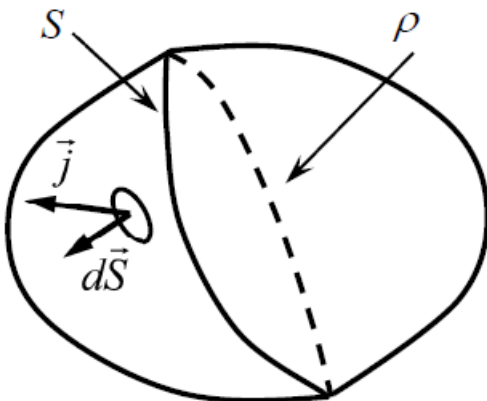
Таким чином, силу струму можна розглядати як потік вектора густини електричного струму через поверхню.

В системі СІ одиницею густини електричного струму є 1 А/м^2 .

Рівняння неперервності заряду

Розглянемо речовину, в якій тече струм. Виберемо в ній довільну замкнуту поверхню, як показано. Сила струму через цю поверхню буде дорівнювати потоку

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



Заряд, перенесений струмом через цю замкнуту поверхню за час Δt , буде рівним

$$\Delta q_s = I \Delta t = \Delta t \oint_S \vec{j} d\vec{S}$$

У відповідності до закону збереження заряду, речовина, обмежена поверхнею, набуде заряду Δq , рівного за абсолютним значенням, але протилежного за знаком до перенесеного, $\Delta q = -\Delta q_s$. Таким чином, отримаємо рівняння:

$$\Delta q + \Delta t \oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0,$$

яке перепишемо у наступному вигляді:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} + \oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0.$$

Коли $\Delta t \rightarrow 0$ прямує до нуля, отримаємо рівняння *неперервності в інтегральній формі*:

$$\frac{dq}{dt} + \oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0.$$

Заряд можна знайти інтегруванням по об'єму:

$$q = \int_V \rho dV,$$

де ρ – густина заряду в об'ємі V , обмеженому замкнутою поверхнею S .

Тепер *інтегральне рівняння неперервності* можна записати у вигляді:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0.$$

Математично інтеграл потоку вектора по замкнутій поверхні дорівнює інтегралу по об'єму від дивергенції цього вектора (теорема Остроградського-Гауса). Якщо з часом не змінюється форма та розміри поверхні, то похідну за часом можна внести під знак інтеграла. Здійснимо ці математичні дії, тоді отримаємо рівняння:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_V \text{div} \vec{j} dV = 0.$$

Внесена під знак інтеграла часова похідна стає частинною за часом, бо густина заряду є функцією багатьох змінних: часу та координат. Це інтегральне рівняння виконується для будь-якої довільної поверхні. Тому рівність нулю суми інтегралів можлива, якщо сума підінтегральних виразів дорівнює нулю, тобто

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0, \text{ або } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0.$$

Це рівняння називають *рівнянням неперервності в диференціальній формі*. Воно означає, що зміна заряду в будь-якій точці середовища відбувається за рахунок струму.

Закон Ома

Закон Ома виконується для металевих лінійних однорідних провідників, коли до них прикладена напруга. Закон Ома було отримано експериментальним шляхом. Згідно з законом Ома, сила струму I в провіднику прямо пропорційна прикладеній напрузі U і обернено пропорційна опору провідника:

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

де R – опір провідника, U – напруга, яка дорівнює різниці потенціалів φ_1 та φ_2 на кінцях провідника.

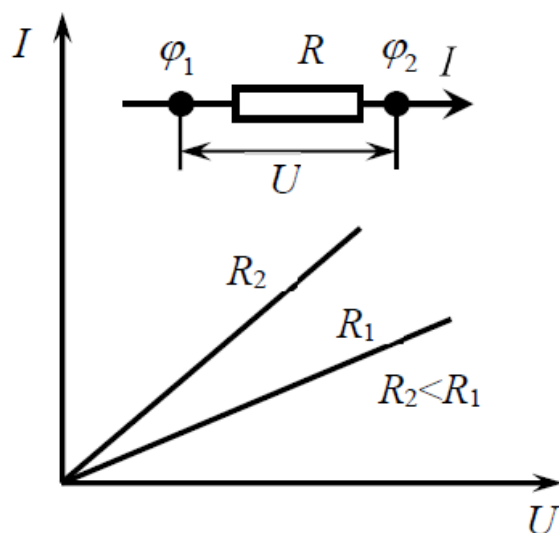
На струм тече від більшого потенціалу до меншого, $\varphi_1 > \varphi_2$

Для лінійного однорідного провідника опір пропорційний його довжині d і обернено пропорційний площі перерізу провідника S :

$$R = \rho \frac{d}{S},$$

де ρ – питомий опір речовини, з якої виготовлено провідник.

В системі СІ опір провідника вимірюється в омах, $[R] = \text{Ом}$, а питомий опір має розмірність $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$.



В лінійному однорідному провіднику завдяки прикладеній напрузі утворюється однорідне електричне поле.

Напряга дорівнює $U = Ed$, де E –напруженість електричного поля всередині провідника зі струмом, до якого прикладено напругу U . Сила струму дорівнює добутку густини струму на площу перерізу провідника $I = jS$.

Підставимо ці формули, а також формулу для опору, в формулу закону Ома

$$jS = \frac{Ed}{\rho \frac{d}{S}}.$$

Після скорочення множників отримаємо, що густина струму прямо пропорційна напруженості електричного поля:

$$j = \frac{E}{\rho}.$$

Цей запис закону Ома здійснено за допомогою локальних характеристик, якими є густина струму та напруженість електричного поля.

В загальному випадку закон Ома має векторний вигляд:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

де σ – характеристика речовини, яку називають *питома електропровідність*, величина якої обернено пропорційна величині питомого опору $\sigma = 1/\rho$

Порівняємо цей вираз для вектора густини струму з виразом для густини електричного струму, записаним з використанням швидкості впорядкованого руху носіїв, тоді отримаємо:

$$q_0 n \vec{v} = \sigma \vec{E}.$$

З цієї рівності маємо, що, коли в провіднику тече струм, швидкість впорядкованого руху носіїв прямо пропорційна напруженості електричного поля:

$$\vec{v} = \gamma \vec{E},$$

де коефіцієнт γ називають *рухливістю* носіїв, величина якої пропорційна провідності речовини

$$\gamma = \sigma / q_0 n.$$