

3. Постійний електричний струм

3.1. Електричний струм і його характеристики

Електричний струм – напрямлений та упорядкований (напрявлений) рух електричних зарядів. В металах електричний струм являє собою дрейф вільних електронів проти електричного поля, в електролітах – іонів різних знаків у протилежних напрямках, у напівпровідниках – електронів і дірок, у газах – електронів та іонів.

Заряди, що створюють електричний струм, називають носіями струму.

Струм, що виникає під дією електричного поля в середовищах, які є провідниками, називається **струмом провідності**.

Упорядкований рух заряджених макроскопічних тіл (провідників чи діелектриків) називається **конвекційним струмом**.

При виникненні упорядкованого руху електричних зарядів у провіднику рівноважний розподіл зарядів порушується, і поверхня провідника перестає бути екіпотенціальною. Упорядкований рух зарядів (струм) буде здійснюватися доти доки всі точки провідника не стануть екіпотенціальними.

Для виникнення та існування електричного струму в середовищі, яке є провідником, необхідні такі умови:

- наявність у середовищі вільних зарядів (носіїв струму) – заряджених частинок, які могли б упорядковано рухатися;
- існування зовнішнього електричного поля, енергія якого витрачалася б на упорядковане переміщення цих зарядів. Для підтримання струму енергія зовнішнього поля повинна неперервно поповнюватися, тобто необхідне джерело електричної енергії – пристрій, в якому відбувається перетворення якогось виду енергії в енергію електричного поля.

<p>Основні характеристики струму</p>

Для полегшення аналізу проходження струму у провідниках користуються *лініями струму*.

Лінією струму називають лінію, в кожній точці якої в даний момент часу дотична збігається з напрямом упорядкованого руху електричних зарядів. Лінії струму утворюють замкнені циліндричні поверхні, які називають *трубками струму*. При цьому носії заряду під час руху не перетинають бокових поверхонь трубок струму.

Кількісними характеристиками електричного струму є скалярна величина – сила струму I та векторна величина – густина струму \vec{j} .

Силою струму називається скалярна фізична величина I , що дорівнює відношенню заряду dq , який переноситься в результаті упорядкованого руху через поперечний переріз провідника за малий проміжок часу dt , до величини цього проміжку:

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

Властивості сили струму:

1. За напрям електричного струму береться напрям упорядкованого руху позитивних зарядів (так умовилися).

2. $[I] = 1\text{A}$ (Ампер – основна одиниця СІ).

Струм, величина й напрямок якого з часом не змінюються, називається *постійним струмом*. Для постійного струму :

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

де q – електричний заряд, який переноситься через поверхню, що розглядається, за скінчений проміжок часу від 0 до t .

У загальному випадку електричний струм може бути розподілений по перерізу провідника, через який він проходить, нерівномірно. *Розподіл електричного струму по розрізу провідника характеризується вектором густини струму \vec{j}* .

Густина струму визначається формулою

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \cdot \vec{n};$$

де \vec{n} - одинична нормаль до площі перерізу.

Якщо електричний струм розподілений рівномірно по перерізу провідника, через який він проходить, то густина струму:

$$j = \frac{I}{S},$$

де S – площа поперечного перерізу.

За напрям вектора густини сили струму взято напрям вектора швидкості \vec{u}^+ упорядкованого руху позитивних носіїв струму (зарядів).

Властивості густини струму:

1. Густина струму в металах дорівнює:

$$\vec{j} = n^- e^- \vec{u}^- \quad (3.1)$$

де n^- – концентрація вільних електронів,

\vec{u}^- – швидкість упорядкованого руху електронів.

2. Зв'язок \vec{j} з силою струму:

$$I = \int_s \vec{j} d\vec{S} \quad (3.2)$$

3. $[j] = 1 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$

3.2. Сторонні сили. Електрорушійна сила (ЕРС).

Сторонні сили

 Якщо заряди рухаються тільки під дією електростатичного поля, то переміщення зарядів від більшого потенціалу до меншого призведе до зникнення поля. Струм також зникне.

Для досить довгого існування струму необхідно від кінця провідника з меншим потенціалом (носії зарядів уявляються позитивними) безперервно відводити заряди, що їх приносить струм, а до кінця з більшим потенціалом безперервно їх підводити (рис. 3.1).

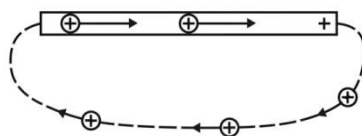


Рисунок 3.1

Іншими словами, треба здійснити круговорот зарядів, при якому вони рухалися би по замкненому шляху.

Відомо, що циркуляція вектора напруженості електростатичного поля

$$\oint E_{\text{ст}} dl = 0.$$

Тому для підтримання постійного струму необхідно, щоб у замкненому колі були б не тільки ділянки, на яких позитивні заряди рухаються в бік зменшення потенціалу φ , а й ділянки, на яких перенос позитивних зарядів відбувався би в напрямі збільшення потенціалу φ , тобто проти сил електростатичного поля (на рис. 3.1 – це пунктирна частина кола).

Переміщення носіїв струму на таких ділянках вимагає присутності сил неелектричного походження, так званих *сторонніх сил*.

Природа сторонніх сил різноманітна (хімічні процеси; дифузія носіїв зарядів у неоднорідному середовищі, електричні (але не електростатичні) поля, що виникають за рахунок змінних за часом магнітних полів, тощо). Електричне поле сторонніх сил у колі створюється включенням до нього джерела *електричного струму*.

Сили не електростатичного походження, що діють на заряди з боку джерел струму, називають сторонніми.

Електрорушійна сила

Сторонні сили виконують роботу по переміщенню електричних зарядів.

Фізична величина, що визначається роботою, яку здійснюють сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду називається *електрорушійною силою (ЕРС) ε* , яка діє в колі:

$$\varepsilon = \frac{A}{q_0}. \quad (3.3)$$

Ця робота виконується за рахунок енергії, що витрачається в джерелі струму, тому величину ε називають ще електрорушійною силою джерела струму, яке увімкнено в коло.

Стороння сила $\vec{F}_{\text{стор}}$ дорівнює:

$$\vec{F}_{\text{стор}} = \vec{E}_{\text{стор}} q_0,$$

де $E_{\text{стор}}$ - напруженість поля сторонніх сил.

Робота сторонніх сил на ділянці кола 1-2 дорівнює:

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F}_{\text{стор}} d\vec{l} = q_0 \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l}, \quad (3.4)$$

де $d\vec{l}$ - вектор, модуль якого дорівнює довжині dl малої ділянки кола
Електрорушійна сила, яка діє на ділянці кола 1-2, є лінійний інтеграл:

$$\varepsilon_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l}. \quad (3.5)$$

Властивості електрорушійної сили:

1. Електрорушійна сила, що діє в замкненому колі, дорівнює:

$$\varepsilon = \oint_L \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l} \quad (3.6)$$

Отже, ЕРС у замкненому колі дорівнює циркуляції вектора напруженості поля сторонніх сил і є характеристикою джерела сторонніх сил

2. $[\varepsilon] - B(\text{Вольт})$.

3.3. Електричний опір та проводимість.

Опір провідника Експериментально встановлено, що провідник протидіє протіканню струму через нього. Мірою здатності провідника протидіяти протіканню струму є опір R .

Властивості опору:

1. Опір провідника залежить від його форми, розмірів та властивостей матеріалу, із якого він виготовлений, і дорівнює:

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

де ρ – питомий опір, l – довжина провідника, S – площа його поперечного перерізу.

2. $[R] = 1 \text{ Ом}$.

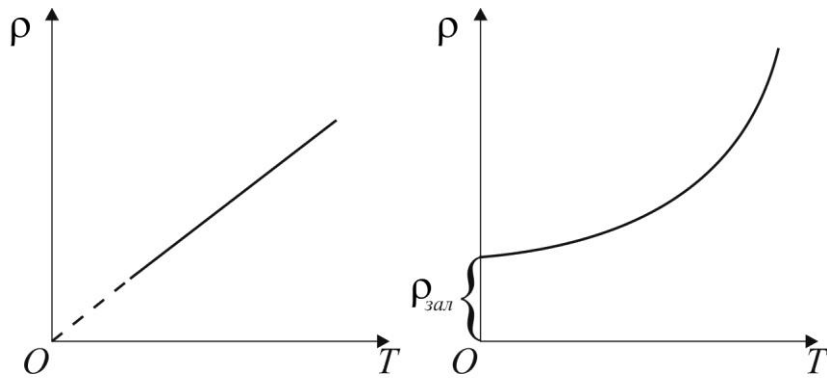
Одиниця 1 Ом є дуже малою величиною, тому на практиці використовують кратні одиниці: килоОм, мегаОм, гигаОм – 1 кОм = 10^3 Ом; 1 МОм = 10^6 Ом; 1 Гом = 10^9 Ом.

Питомий опір є характеристикою матеріалу провідника і вимірюється $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$.

Його особливою властивістю є залежність від температури T , яка при не дуже низьких температурах лінійна:

$$\rho \sim T.$$

При низьких температурах (у криогенній області) спостерігається відхилення від лінійної залежності.



а
Рисунок 3.2а

б
Рисунок 3.2б

Рисунок 3.2а ілюструє залежність ρ від T для ідеально чистих металів, а рисунок 3.2б – для реальних металів.

У реальних металів при $T=0$ спостерігається залишковий опір, величина якого залежить від чистоти матеріалу та наявності механічних напружень у зразку.

Крім питомого опору для характеристики здібності матеріалу проводити струм використовують **питому електричну провідність** (електропровідність) провідника – величину, обернену до його питомого опору:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$[\sigma] = \text{См}/\text{м}$ (Сименс на метр).

Надпровідність – явище, яке полягає в тому, що поблизу температури абсолютного нуля опір провідника при деякій, характерній для конкретної речовини температурі (критичній), стрибком зменшується до нуля (рис.3.3), тобто метал стає абсолютним провідником.

При $T = T_k, \rho = 0, \sigma = \frac{1}{\rho} = \infty$

Це явище вперше було виявлене в 1911 році голландським вченим Камерлінг-Оннесом у ртуті.

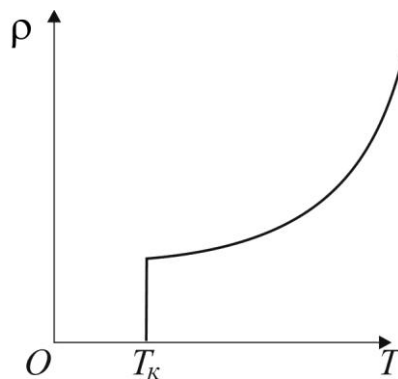


Рисунок 3.3

Явище надпровідності пояснюється на основі квантової теорії.

Послідовне паралельне з'єднання резисторів	i
---	----------

В електро- і радіотехніці опір матеріалів враховується як резистори – елементи з певним опором. Для отримання необхідного значення опору використовують паралельне з'єднання резисторів (по аналогії зі з'єднанням конденсаторів – п.2.3.2).

При послідовному з'єднанні опір зростає: $R = \sum_{i=1}^n R_i$.

При паралельному – зменшується: $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$.