

Тема 8. Постійний електричний струм

Питання теми

- 8.1. Електричний струм і його види. Струм провідності.
- 8.2. Закон Ома для однорідної ділянки кола в інтегральній і диференціальній формах.
- 8.3. Електрорушійна сила і різниця потенціалів.
- 8.4. Закон Ома для неоднорідної ділянки кола.
- 8.5. Розгалужені електричні кола. Правила Кірхгофа.

8.1. Електричний струм і його види. Струм провідності

Ми розглянули розподіл зарядів у провіднику в стані рівноваги. Тепер вивчимо умови протікання струму. Електричним струмом називається впорядкований рух зарядів. За напрямком струму вибирається напрям руху додатних зарядів. Заряди можуть переміщуватись внаслідок конвекційних потоків – тоді це **конвекційний струм**. Може відбуватися дифузія внаслідок різниці концентрацій зарядів – тоді **струм дифузійний** (рис. 8.1). Ще є струм **провідності** (**дрейфовий струм**) – це напрямлений рух зарядів під дією електричного поля (рис. 8.2).

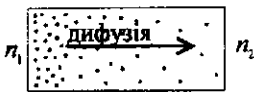


Рис. 8.1

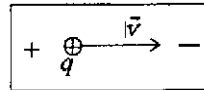


Рис. 8.2

Для кількісної характеристики струму вводиться поняття сили струму:

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

– це кількість заряду, який проходить за одиницю часу через поперечний переріз провідника.

**Електричний струм –
це напрямлений
рух зарядів**

**Напрявлений рух зарядів під
дією електричного поля
називається
струмом провідності або
дрейфовим струмом**

Дифузійний струм
 виникає тоді, коли причиною
 напрямленого руху зарядів є
дифузія
 носіїв зарядів внаслідок
 різниці їх концентрації

Оскільки заряди можуть проходити через переріз провідника нерівномірно, вводиться ще одна важлива характеристика – **густина струму** (рис. 8.3).

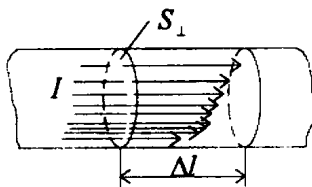


Рис. 8.3

Густина струму рівна величині заряду, який проходить за одиницю часу через одиницю поверхні поперечного перерізу:

$$j = \frac{I}{S_{\perp}} = \frac{\Delta q}{\Delta t S_{\perp}}. \quad (2)$$

**Густина струму – це
кількість заряду,
який проходить
за одиницю часу
через одиницю поверхні
поперечного перерізу
провідника**

Виразимо густина струму j через величини, які характеризують окремого носія заряду.

Оскільки $\Delta q = nq\Delta V = nqS_{\perp}\Delta l$,

де n – концентрація носіїв, q – заряд одного носія,

$$j = \frac{\Delta q}{\Delta t S_{\perp}} = \frac{nqS_{\perp}\Delta l}{\Delta t S_{\perp}} = nq \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

або $\boxed{\vec{j} = nq\vec{u}}$, (3)

де $\vec{u} = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ – швидкість напрямленого руху носія заряду (дрейфова швидкість).

Як бачимо, густина струму \vec{j} – вектор і він збігається з напрямком швидкості дрейфу.

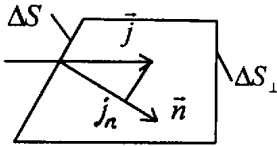


Рис. 8.4

Якщо вектор густини струму не перпендикулярний до елемента площини ΔS , через яку тече струм, тоді замість j використовується нормальна складова j_n , тобто проекція j на нормаль до ΔS (рис. 8.4):

$$\boxed{j_n = nqu} \quad (4)$$

Силу струму (1) можна виразити через густина струму:

$$\boxed{I = j_n \cdot S} \quad (5)$$



Рис. 8.5

Якщо струм тече по провіднику неоднорідно, то його переріз розбиваємо на елементи dS (рис. 8.5). Тоді

$$dI = j_n dS,$$

$$\text{і} \quad \boxed{I = \int_S j_n dS.} \quad (6)$$

8.2. Закон Ома для однорідної ділянки електричного кола в інтегральній і диференціальній формах

Загальновідомий із шкільного курсу фізики закон Ома для ділянки електричного кола

$$I = \frac{U}{R} = \frac{j_1 - j_2}{R} = \frac{\Delta j}{R}, \quad (7)$$

Тут I – сила струму, R – опір даної ділянки, який залежить від форми і розмірів, а також від властивостей матеріалу провідника:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (8)$$

де l – довжина ділянки, S – площа поперечного перетину провідника, ρ – питомий опір.

В однорідному провіднику питомий опір однаковий для всіх його ділянок.

Якщо провідник має неоднаковий переріз в різних місцях ділянки (рис. 8.6), то формулу (8) можемо застосувати лише до елементарної частини кола Δl , де переріз S можна вважати незмінним.

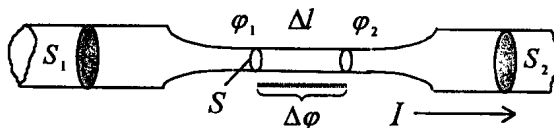


Рис. 8.6

Натисніть
на символ



30_OM.pdf

Тоді (7) запишемо:

$$I = \frac{j_1 - j_2}{\Delta R} = \frac{\Delta j}{\rho \frac{\Delta l}{S}}.$$

Враховуючи, що $I = jS$, матимем:

$$jS = \frac{\Delta j}{\rho \frac{\Delta l}{S}},$$

звідки $j = \frac{\Delta j}{\rho \Delta l}$

або

$$\boxed{j = \frac{1}{\rho} E}, \quad (9)$$

де $|E| = \left| \frac{\Delta j}{\Delta l} \right|$.

Враховуючи, що заряди рухаються вздовж силових ліній, можемо стверджувати, що \vec{j} паралельний до \vec{E} . Тоді формулу (9) запишемо:

$$\boxed{\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E}}, \quad (10)$$

де $\sigma = \frac{1}{\rho}$ – питома електропровідність.

Формули (9) і (10) виражають закон Ома в диференціальній формі, який можна застосувати до елемента провідника Δl , що важливо у випадках, коли провідник неоднорідний по довжині.

Закон Ома в диференціальній формі виражає густину струму в локальній області провідника через локальні значення \vec{E} і σ

8.3. Електрорушійна сила і різниця потенціалів

Необхідною умовою існування струму провідності в провіднику є наявність різниці потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ на його кінцях 1 – 2, тобто існування в провіднику електричного поля (рис. 8.7).

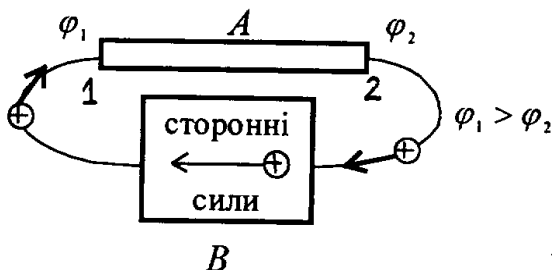


Рис. 8.7

Під дією поля відбувається переміщення зарядів у провіднику, яке повинне призвести до вирівнювання потенціалів. Тому для існування в провіднику постійного електричного поля, необхідно від його кінця з меншим потенціалом (Φ_2) безперервно відводити додатні заряди, що приходять сюди, а до кінця з більшим потенціалом Φ_1 безперервно підводити їх.

Тобто, необхідно здійснювати кругообіг зарядів (для зручності ми розглядаємо рух додатних зарядів, який співпадає з напрямом струму).

В провіднику (ділянка A) рух додатних зарядів в сторону меншого потенціалу природний. За межами провідника (ділянка B) ці заряди повинні рухатись в сторону більшого потенціалу, тобто проти поля. Такий рух може здійснюватися лише силами неелектричного походження – так званими **сторонніми силами** (хімічними – гальванічними елементами, або породженими механічним рухом провідника в магнітному полі (в генераторах) і т. і.). Ці сторонні сили одержали назву електрорушійних сил (е.р.с., \mathcal{E}).

Дамо визначення е.р.с. Для цього запишемо вираз для роботи по переміщенню заряду по всьому замкненому колу:

$$A = \oint_l \mathbf{F} dl = \int_1^2 \mathbf{F} dl + \int_2^1 \mathbf{F}^{cm} dl. \quad (11)$$

Тут $\mathbf{F} = \mathbf{E}q$ – потенціальна сила, яка діє на ділянці 1–2, а $\mathbf{F}^{cm} = \mathbf{E}^{cm}q$ – стороння сила, що діє на ділянці 2–1, \mathbf{E} і \mathbf{E}^{cm} – напруженості полів цих сил. Враховуючи це, вираз (11) можемо записати:

$$A = \int_1^2 \mathbf{E} q d\mathbf{l} + \int_2^1 \mathbf{E}^{cm} q d\mathbf{l}.$$

Розділимо ліву та праву частини на q :

$$\frac{A}{q} = \int_1^2 \mathbf{E} d\mathbf{l} + \int_2^1 \mathbf{E}^{cm} d\mathbf{l} = j_2 - j_1 + e_{12}. \quad (12)$$

Тут

$$j_2 - j_1 = \int_1^2 E_l d\mathbf{l} \quad (13)$$

– різниця потенціалів на ділянці 1-2 (E_l – проекція \mathbf{E} на напрям контура l);

$$e_{12} = \int_2^1 \mathbf{E}^{cm} d\mathbf{l} = \int_2^1 E_l^{cm} d\mathbf{l} \quad (14)$$

– це і є електрорушійна сила, яка, як видно, рівна роботі поля сторонніх сил по переміщенню одиничного заряду на ділянці їх дії 2-1.

**Електрорушійна сила
виражає роботу
поля сторонніх сил
по переміщенню
одиничного заряду
на ділянці їх дії**

8.4. Закон Ома для неоднорідної ділянки кола

Неоднорідною називається ділянка, на якій діє стороння сила (електрорушійна сила).

Оскільки розглядається закон Ома для неоднорідної ділянки кола, то таку ділянку треба утворити. Для цього на ділянці $1-А-2$ кола треба увімкнути джерело е.р.с. \mathcal{E}_{12} , яке і зробить цю ділянку неоднорідною (рис. 8.8).

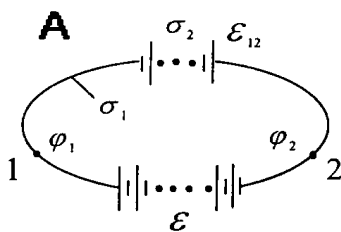


Рис. 8.8

За межами вибраної неоднорідної ділянки може діяти і інша е.р.с. (\mathcal{E}). В даному випадку вона (разом з \mathcal{E}_{12}) створює і підтримує різницю потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$.

**Неоднорідною
називається ділянка,
на якій діє стороння сила
(електрорушійна сила)**

Можемо записати, що робота всіх сил по переміщенню одиничного заряду на ділянці 1-А-2 рівна сумі робіт цих сил на ділянках їх дії:

$$A_{12} = e_{12}q + (j_1 - j_2)q. \quad (15)$$

Ця робота дорівнює теплу, що виділяється при проходженні струму:

$$Q = I^2 R_{12} t = IR_{12} I t = IR_{12} q, \quad (15a)$$

де R_{12} – опір ділянки 1-А-2.

Прирівняємо формули (15) і (15a):

$$e_{12}q + (j_1 - j_2)q = IR_{12}q. \quad (16)$$

Звідси одержимо вираз для закону Ома для неоднорідної ділянки кола:

$$I = \frac{e_{12} + (j_1 - j_2)}{R_{12}}. \quad (17)$$

В розглянутому випадку потенціальні сили електричного поля виконують роботу по переміщенню заряду по всій ділянці $1-A-2$, тобто по однорідній його частині з питомою електропровідністю σ_1 і по неоднорідній частині самого джерела \mathcal{E}_{12} , питома електропровідність якого інша (σ_2). Сторонні сили переміщують заряд тільки в межах джерела е. р. с. \mathcal{E}_{12} .

**Сторонні сили
переміщують заряд
тільки в межах джерела е. р. с.**

Відмітимо, що робота по переміщенню одиничного заряду на ділянці $1-A-2$ називається напругою. Тому можемо записати, що напруга

$$U_{12} = e_{12} + (j_1 - j_2). \quad (18)$$

При застосуванні закону Ома для неоднорідної ділянки необхідно дотримуватись правила обходу ділянки і електрорушійну силу вважати додатною чи від'ємною в залежності від полярності вмикання (рис. 8.9).

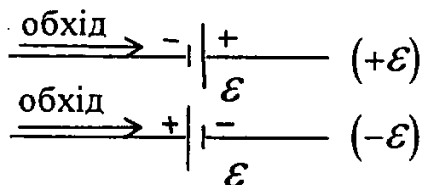


Рис. 8.9

Наприклад, якщо обхід робити від (-) до (+), то це додатне вмикання е.р.с., а коли обхід від (+) до (-) – від'ємне.

8.5. Розгалужені електричні кола. Правила Кірхгофа

Розгалуженими називатимемо кола, які містять вузли. Вузлом називається точка, в якій сходяться більше, ніж два провідники. Розрахунок розгалужених кіл значно спрощується, якщо користуватися правилами Кірхгофа. Цих правил два. При застосуванні правил Кірхгофа необхідно звертати увагу на напрям струму і полярність е.р.с.

Перше правило Кірхгофа: алгебраїчна сума сил струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулеві:

$$\sum_k I_k = 0. \quad (19)$$

У випадку, зображеному на рис. 8.10,

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Слово «алгебраїчна» означає, що необхідно враховувати знаки струмів. Додатними можна вважати струми, які входять у вузол, а від’ємними – які виходять

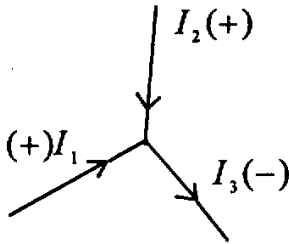


Рис. 8.10

На рис. 8.10 струми I_1 і I_2 , які входять у вузол, є додатними, тоді як струм I_3 , що виходить – від’ємний.

Доведення: Якби алгебраїчна сума струмів була відмінною від нуля, то у вузлі відбувалось би накопичення заряду (або його відхід), що призвело б до зміни потенціалу вузла і зміни струмів у колі. А ми розглядаємо стаціонарні випадки, коли потенціали у колі не змінюються.

Друге правило Кірхгофа: алгебраїчна сума падіння напруг для якого-небудь замкненого контура рівна алгебраїчній сумі електрорушійних сил (е.р.с., \mathcal{E}_i), що діють в цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^1 I_k R_k = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i \quad (20)$$

Для доведення виділимо замкнений контур 1–2–3–4–1 і виберемо напрям обходу (рис. 8.11).

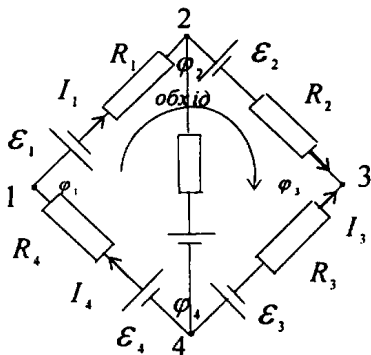


Рис.8.11

Застосуємо для кожної з ділянок 1–2, 2–3, 3–4, 4–1 закон Ома для неоднорідної ділянки:

$$1-2 \quad I_1 R_1 = j_1 - j_2 - \varepsilon_1;$$

$$2-3 \quad I_2 R_2 = j_2 - j_3 - \varepsilon_2;$$

$$3-4 \quad -I_3 R_3 = j_3 - j_4 + \varepsilon_3;$$

$$4-1 \quad I_4 R_4 = j_4 - j_1 + \varepsilon_4.$$

Просумувавши ліві і праві частини цих рівностей:

$$\sum I_k R_k = 0 + \sum \varepsilon_k,$$

отримуємо друге правило Кірхгофа:

$$\boxed{\sum_k I_k R_k = \sum \varepsilon_k.}$$

Застосовуючи правила Кірхгофа до вузлів і різних замкнених контурів, можна записати стільки незалежних рівнянь, скільки невідомих, а розв'язавши систему цих рівнянь, можна знайти невідомі. При цьому необхідно дуже строго слідкувати за тим, щоб струмам і е.р.с. припису-

вались знаки у відповідності з вибраним обходом контура. Наприклад, якщо струм співпадає з обходом, йому приписується знак (+), якщо е.р.с. увімкнена так, що співпадає з обходом (тобто, створює струм в напрямку обходу) – вона додатна (рис. 8.12).

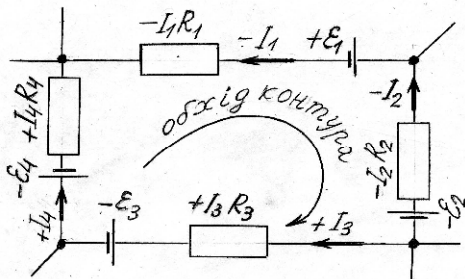


Рис. 8.12

Питання для контролю

1. Що таке електричний струм? Які види струми бувають?
2. Що таке густина струму?
3. Що таке дрейфова швидкість? Як густина струму виражається через дрейфову швидкість?
4. Як записати закон Ома в диференціальній формі?
5. Записати і пояснити закон Ома для неоднорідної ділянки кола.
6. Сформулювати і пояснити правила Кірхгофа.
7. Що означають вирази "алгебраїчна сума струмів", "алгебраїчна сума спадів напруг", "алгебраїчна сума е.р.с."?

Допоміжна література

1. Савельєв И. В. Курс общей физики. Т.2: – Москва: Наука, 1978, § 31–36.