

Заняття № 3

Тема: ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ. ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА. ЗАКОН ОМА.

Електричним струмом називається впорядкований рух заряджених частинок у речовині чи у вакуумі (електричні струми в металах, електролітах, іонізованих газах, плазмі, напівпровідниках, пучки електронів чи інших заряджених частинок у вакуумі).



Умовою виникнення струму провідності в речовині є існування вільних носіїв струму й внутрішнього електричного поля. Носіями струму в металах є вільні електрони, в газі та плазмі — електрони та іони, в напівпровідниках — електрони провідності та дірки, в електролітах — іони. Струм вільних електронів металу виникає під дією зовнішнього електричного поля усередині металу. Це поле порушує рівноважний розподіл зарядів у провіднику і тому його поверхня перестає бути екіпотенціальною. Струм у провіднику буде протікати доти, доки його поверхня не стане екіпотенціальною, а напруженість поля усередині провідника стане рівною нулю.

Якщо за час dt через поперечний переріз провідника пройде заряд dq , то за визначенням величина

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

є сила струму.

Густина струму за визначенням є

$$j = \frac{dI}{dS_n},$$

де dI — струм через переріз провідника $dS_n = dS \cdot \cos \alpha$, перпендикулярний напрямкові струму.

Для сталого в часі протікання заряду у провіднику сила струму становить

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

де q — заряд, що пройшов через переріз провідника за час t . Такий струм називають постійним.

За напрямок струму прийнято брати напрямок протилежний напрямку руху електронів. Тому струм, утворений рухом, наприклад, від'ємних та додатних іонів в електролітах є сумою струмів іонів і він направлений по напрямку руху додатних іонів.

Електричний струм має певний напрям. За *напрям електричного струму* приймається напрям руху позитивно заряджених частинок (від «+» до «-»)

Силою струму називається скалярна величина, яка чисельно дорівнює кількості електрики, що проходить за одиницю часу через площу поперечного перерізу

провідника:

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

$$[I] = \text{А}$$

$$\text{Кл} = \text{А} \cdot \text{с}$$

Уявімо два тонких довгих паралельних провідники, які розташовані у вакуумі на відстані 1 м один від одного. Сила струму в провідниках однакова. За одиницю сили струму беруть силу такого струму, при якому відрізки таких двох паралельних провідників завдовжки 1 м взаємодіють із силою $2 \cdot 10^{-7}$ Н. Цю одиницю називають на честь французького фізика і математика – Андре-Марі Ампера, одиницю сили струму називають ампером і позначають літерою А.

Під час вимірювання застосовують також частинні або кратні одиниці сили струму:

$$1 \text{ мкА} = 0,000001 \text{ А}; \quad 1 \text{ мА} = 0,001 \text{ А}; \quad 1 \text{ кА} = 1000 \text{ А та ін.}$$

Сила струму — дуже важлива характеристика електричного кола. Ті, хто працює з електричними колами, повинні знати, що для людського організму безпечною вважається сила струму до 1 мА. Сила струму понад 100 мА призводить до уражень організму.

Вимірювання сили струму

Для вимірювання сили струму виготовлено значну кількість різноманітних приладів (амперметри, міліамперметри, мікроамперметри, гальванометри тощо).

Правила користування амперметром.

1. Вмикають послідовно з тим споживачем, у якому вимірюють силу струму.
2. До клеми «+» слід приєднувати провідник від позитивно зарядженого полюса джерела струму, що також позначається знаком «+», «—» амперметра приєднують до провідника, що йде від негативного полюса джерела струму.
3. Встановити, на яке максимальне значення вимірювальної величини розраховано прилад.
4. Визначити ціну поділки приладу.
5. Заборонено приєднувати амперметр безпосередньо до джерела струму без послідовно ввімкнених із ним споживачів.

Постійним струмом, називається електричний струм, сила й напрям якого не змінюються з часом.

Швидкість впорядкованого руху електронів в провіднику порядку: $v \sim 10^{-4} - 10^{-5}$ м/с, а швидкість поширення електричного поля дорівнює 300 000 км/с.

Сила струму в металевому провіднику визначається за формулою:

$$I = q_0 n \bar{v} s, \text{ де } n - \text{концентрація електронів провідності.}$$

Густина струму – векторна величина, модуль якої дорівнює відношенню сили струму до площі перерізу провідника, через який проходить електричний струм:

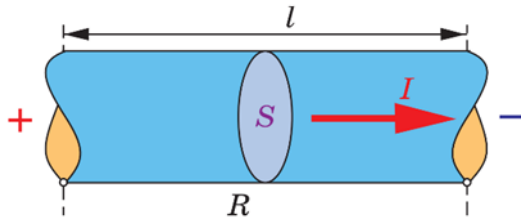
$$j = \frac{I}{s} = q_0 n \bar{v}.$$

Вектор густини струму збігається з напрямом сили струму в провіднику.

Опір провідника. *Опір* – основна електрична характеристика провідника. Чим більшим є електричний опір за заданої напруги, тим меншою є сила струму в провіднику.

Опір характеризує ступінь протидії провідника напрямленому руху по ньому зарядів.

$$[R] = V/A = \text{Ом}.$$



$R = \rho \frac{l}{s}$ – *електричний опір* – залежить від геометричних розмірів (l - довжина, s – площа поперечного перерізу) і матеріалу (ρ – питомий опір матеріалу) провідника.
 $[\rho] = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, або $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$

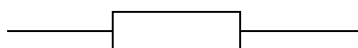
Питомий опір речовини – це фізична величина, яка характеризує електричні властивості даної речовини й чисельно дорівнює опору виготовленого з неї провідника завдовжки 1 м і площею поперечного перерізу 1 м². Питомий опір для певної речовини має сталі табличні значення. Значення питомого опору істотно залежить від температури речовини, тому в таблицях обов'язково зазначають температуру, за якої справджуються подані значення.

Тобто, у довшому провіднику частинки, що рухаються напрямлено, зазнають на своєму шляху більшої протидії. Збільшення товщини провідника рівнозначне «розширенню русла», яким рухаються заряди, тому й опір провідника зменшується. Провідники з різних металів мають різні кристалічні структури, отже, гальмівна дія зіткнень іонів і вільних електронів виявляється різною.

Кожен провідник (дріт, кабель, спіраль і т.д.) має свій опір і може вважатися елементом електричного кола.

Будь-який споживач струму (електрична лампа, нагрівальний прилад, теле- і радіоапарат, комп'ютер іт.д) теж має свій загальний опір і може розглядатися як окремий елемент кола.

Крім того існують спеціальні прилади для збільшення опору в електричному колі резистори. Резистор або інший опір на схемах зображується



Вперше залежність сили струму від напруги була експериментально здобута 1826 року німецьким ученим **Георгом Омом**.

Закон Ома для ділянки кола читається так: *сила струму в однорідному провіднику прямо пропорційна прикладеній напрузі:*

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

До формули закону Ома входить напруга, яка визначається *роботою електричного поля* з переміщення одиниці заряду в даній ділянці кола: $U = \frac{A}{q} \rightarrow$

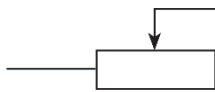
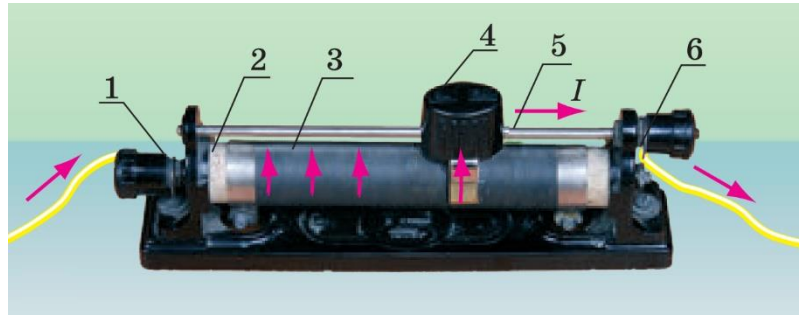
$A = U \cdot q = U I t$ – **робота струму**.

Реостати.

Реостат – це пристрій зі змінним опором, призначений для регулювання сили струму в електричному колі.

Будова двоконтактного повзункового реостату:

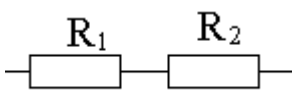
- 1, 6 – клеми;
- 2 – керамічний циліндр;
- 3 – металевий дріт (обмотка);
- 4 – повзунок;
- 5 – металевий стрижень;



– умовне позначення на схемах

Принцип дії повзункового реостата ґрунтується на залежності опору провідника від його довжини. Пересуваючи повзунок уздовж обмотки, плавно збільшують або зменшують довжину ділянки, в якій проходить струм. У результаті опір реостата так само плавно збільшується або зменшується, а це, згідно із законом Ома, приводить до плавної зміни сили струму (настроюють гучність звуку радіоприймача, регулюють яскравість світіння лампи і т.д.).

Послідовне з'єднання провідників

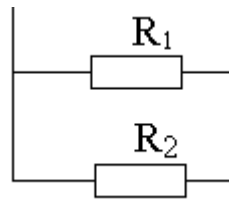


$$I_{\text{заг}} = I_1 = I_2 = \dots$$

$$U_{\text{заг}} = U_1 + U_2 + \dots$$

$$R_{\text{заг}} = R_1 + R_2 + \dots$$

Паралельне з'єднання провідників



$$I_{\text{заг}} = I_1 + I_2 + \dots$$

$$U_{\text{заг}} = U_1 = U_2 = \dots$$

$$\frac{1}{R_{\text{заг}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

Закон Джоуля – Ленца

(був установлений експериментально англійським вченим Д. Джоулем і російським вченим Е. Х. Ленцем)

Кількість теплоти, що виділяється провідником зі струмом, дорівнює добутку квадрата сили струму на опір провідника й час проходження струму по провіднику:

$$Q = I^2 R t$$

Потужність струму: $P = \frac{A}{\Delta t} = \frac{Uq}{\Delta t} = \frac{UI\Delta t}{\Delta t} = UI$

$$[P] = \text{В} \cdot \text{А} = \text{Вт}$$

Температурна залежність опору провідника

Фізичний зміст опору R провідника можна установити з виразу $j = enV_d$, де величина заряду e та концентрація n є сталими величинами. Збільшення чи зменшення струму відбувається при зменшенні чи збільшенні дрейфової швидкості V_d . При сталій напруженості поля у провіднику зміна величини V_d спостерігається при зміні його температури. При збільшенні температури, за рахунок збільшення інтенсивності розсіювання направленої руху зарядів тепловими коливаннями вузлів кристалічної, відбувається зменшення V_d і навпаки. Тобто опір електричному струмові у провіднику збільшується із збільшенням температури провідника і

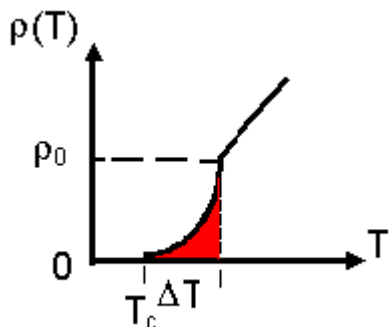
навпаки. Експеримент показує, що для високих температур питомий опір металів залежить від температури лінійно

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T).$$

У цьому виразі ρ_0 — питомий опір при $T_0 = 273,15$ К, $\Delta T = T - T_0$, α — температурний коефіцієнт опору.

Основним недоліком класичної теорії провідності є те, що вона не може дати реальну залежність опору провідника від його температури. Дійсно, якщо класичний вираз для середньої теплової швидкості $V_T \sim \sqrt{T}$, то $\sigma \sim 1/\sqrt{T}$, а $\rho \sim \sqrt{T}$, що суперечить експериментові. Цей недолік класичної теорії електропровідності пов'язаний з тим, що за шлях вільного направленої пробігу λ , що здійснюється під дією електричного поля, приймають середню довжину вільного пробігу теплового руху λ . Експеримент показує, що класичне значення провідності можна отримати, допустивши середню довжину вільного пробігу λ' рівною сотням міжвузольних відстаней кристалічної решітки металу.

В 1911 році голландський інженер Камерлінг-Оннес відкрив явище надпровідності, яке полягає у тому, що при температурах менших 4К ртуть втрачає електричний опір. Таке охолодження ртуті було досягнуте за допомогою рідкого гелію. За відкриття явища надпровідності у 1913 році Камерлінг-Оннес був відзначений Нобілевською премією.



Явище надпровідності було зафіксовано при гелійових температурах у ряду металів та сплавів — Pb, Zn, Al, вісмут із золотом та інші. На рисунку зображена залежність питомого опору металу (сплаву) від температури. На графіку ρ_0 — залишковий опір звичайного стану, T_c — температура надпровідності, нижче якої опір матеріалу дорівнює 0. Існує скінчений інтервал температури **перехідної області** ΔT_c від звичайного стану до стану надпровідності. Для чистих надпровідників $\Delta T_c \approx 10^{-3}$ К.

Про характер опору електричному струму надпровідника говорить той факт, що струм, створений за рахунок електромагнітної індукції у кільцевому надпровіднику, може існувати роками.

Робота електричного струму

Як відомо, робота характеризує зміну енергії або перетворення одного виду енергії на інший.

Робота електричного струму також характеризує процес перетворення енергії одного виду (енергії електричного поля) в енергію іншого виду (внутрішню енергію тіл, у механічну й інші види енергії).

При введенні поняття роботи електричного струму можна скористатися дослідами, що безпосередньо демонструють механічну роботу електричного струму (підйом вантажу електродвигуном). Для демонстрації збирають установку з електродвигуна, послідовно з яким вмикають реостат і демонстраційний амперметр.

Учні на досліді бачать, що електричний струм виконує роботу, отже, електрична енергія перетворюється на механічну.

Щоб установити, від чого залежить робота електричного струму, скористаємося установкою з лампою накаливання. Змінюючи опір реостата, демонструємо різне світіння лампи. Помічаємо значення сили струму й напругу в цих випадках. Очевидно, чим яскравіше світиться лампа, тим більше виділяється в ній енергії і, отже, тим більшу роботу виконує електричний струм. Звертаємо увагу, що саме цьому випадку відповідають і великі значення сили струму й напруги.

Обчислення роботи електричного струму

- Робота електричного струму A пропорційна силі струму I , напрузі U і часу t .

$$A = IU \Delta t.$$

Формула роботи може бути отримана і з відомого визначення напруги: $U = A/q$. З цієї формули одержуємо:

$$A = qU = IU \Delta t.$$

За одиницю роботи електричного струму в СІ прийнятий джоуль.

- Один джоуль дорівнює роботі, що виконується електричним струмом силою 1 А за напруги 1 В протягом 1 с .

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}.$$

Потужність електричного струму

З поняттям потужності учні вже зустрічалися при вивченні механіки. Тому спочатку можна повторити визначення потужності й одиниці її виміру.

Фізичну величину, що характеризує швидкість виконання роботи, називають потужністю.

У споживачах електричної енергії струм виконує роботу, швидкість виконання якої залежить від виду споживача і напруги, що подається до нього.

Потужність електричного струму – це фізична величина, що характеризує швидкість виконання електричним струмом роботи, і дорівнює відношенню роботи A до часу t , за який ця робота була виконана.

$$A / t = IUt / t = IU.$$

За одиницю потужності в СІ прийнятий ват (Вт):

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}.$$

Вимірювання роботи й потужності електричного струму

З формули для обчислення роботи сили струму випливає, що для вимірювання роботи достатньо виміряти силу струму в колі, напругу на ділянці кола, час протікання струму. Таким чином, для вимірювання роботи струму необхідні такі прилади: амперметр, вольтметр і секундомір.

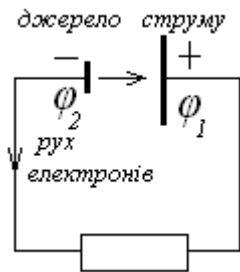
Такі виміри ми називаємо непрямими. Але існують прилади прямого вимірювання роботи струму – лічильники електричної енергії, що встановлюються скрізь, де використовується електрична енергія: у квартирах, офісах, навчальних і виробничих установах.

Для вимірювання потужності електричного струму використовуються ватметри, що враховують напругу та силу струму. Виміряти потужність можна і за допомогою вольтметра й амперметра. Щоб обчислити шукану потужність, множать напругу на силу струму, знайдені за показниками приладів.

З формули $A = P \cdot t$ можна одержати широко застосовувані в побуті одиниці виміру електричної енергії – кіловат-годину:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{с}/\text{с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

ЕРС джерела струму.



Для наявності струму в провіднику необхідно, щоб у ньому існувало електричне поле, яке характеризується різницею потенціалів на кінцях провідника $\varphi_1 - \varphi_2$. У цьому випадку вільні заряди, які є в ньому, беруть участь у напрямленому русі. Проте переміщення цих зарядів досить швидко приводить до вирівнювання потенціалів і, отже, до припинення струму. Для тривалого існування струму треба підтримувати сталюю різницю потенціалів на кінцях провідника. Це й роблять так звані джерела струму.

Для того щоб струм був постійним, необхідно, щоб потенціали φ_1 і φ_2 , не змінювалися з часом. Очевидно, усередині джерела повинні діяти сили, які б за секунду переносили всі електрони, що прийшли на полюс 1, назад, на полюс 2. Причому, природа цих сил повинна бути не електростатичною. Тому назвемо ці сили *сторонніми*.

Тепер стає зрозумілою *роль сторонньої сили в електричному колі*: напрямляти електричні заряди проти електростатичних сил, відділяти негативні заряди від позитивних і приєднувати їх до негативних.

Сторонні сили своєю роботою замикають коло й забезпечують постійність струму. Ці сили в різних джерелах мають неоднакове походження. Наприклад, у гальванічних елементах це сили, що виникають у результаті хімічних процесів; в електрофорній машині – це сили пружності м'язів руки, що обертає диски машини, тощо.

Кожне джерело струму характеризується роботою діючих у ньому сторонніх сил із переміщення одиниці позитивного заряду, тобто певною електрорушійною силою (ЕРС).

ЕРС в замкнутому колі називають фізичну величину, яка чисельно дорівнює роботі сторонніх сил із переміщення одиничного позитивного заряду по всьому

замкнутому колу: $\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q}$, $[\mathcal{E}] = 1\text{Дж}/1\text{Кл} = 1\text{В}$

Закон Ома для повного кола

Сила струму в повному колі дорівнює відношенню ЕРС джерела до повного опору кола: $I = \mathcal{E} / (R+r)$

Із закону Ома витікає, що:

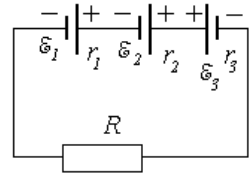
- Напруга на полюсах замкнутого джерела струму $U = \mathcal{E} - Ir$
- Напруга на полюсах розімкнутого джерела струму $U = \mathcal{E}$
- При короткому замиканні джерела струму $I_{max} = \mathcal{E} / r$, тобто джерело дає найбільший струм, коли зовнішній опір прямує до нуля ($R \rightarrow 0$).

Зауваження:

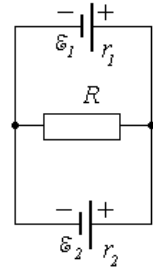
- Якщо коло містить декілька *послідовно* ввімкнених елементів із ЕРС \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 і т. д., то повна ЕРС кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС окремих елементів: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots$. Загальний опір кола дорівнює сумі всіх опорів:

$$\mathbf{R}_{\text{заг}} = \mathbf{R} + r_1 + r_2 + \dots$$

В даному прикладі: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3$, $\mathbf{R}_{\text{заг}} = \mathbf{R} + r_1 + r_2 + r_3$.



- У разі *паралельного* з'єднання елементів із однаковою ЕРС електрорушійна сила батареї дорівнює ЕРС одного елемента, а внутрішній опір вважають рівним $r = r_1 / 2$. Якщо ЕРС елементів різні, то ЕРС джерела вважається ЕРС найбільшого елемента, а внутрішній опір розраховують за формулою для паралельного з'єднання: $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$.



Допоміжна література: Див. Контр. Завдання 1 та 2