

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

3.6

- **Електричний струм та його характеристики. Сторонні сили. Електрорушійна сила і напруга. Опір провідників.**

3.7

- **Закони Ома. Правила Кірхгофа**

3.8

- **Робота і потужність електричного струму. Закон Джоуля-Ленца**

3.6. Електричний струм та його характеристики

Електричним струмом називають направлений рух вільних електричних заряджених частинок (носіїв заряду).

Струм провідності

- направлений рух *вільних* носіїв заряду у *провідному середовищі* (твердому тілі, рідині або газі)

Конвекційний струм

- утворюється у процесі руху *заряджених макро тіл* (земна куля, планети)

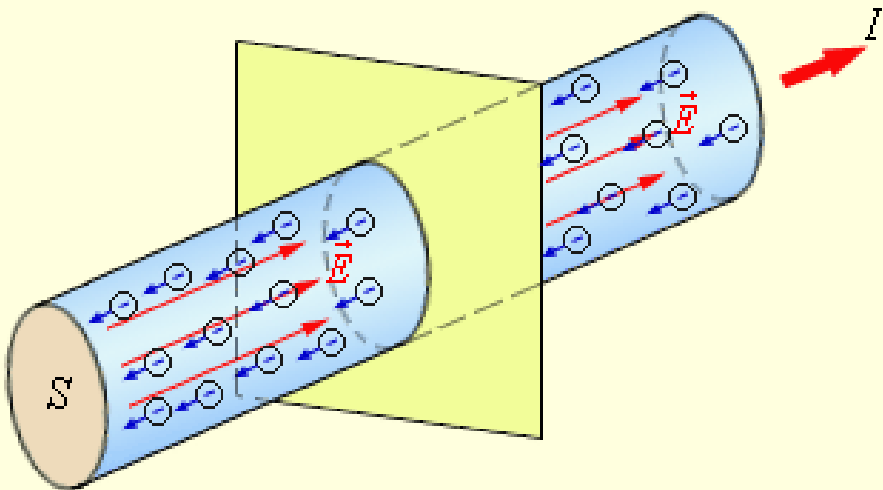
Струм поляризації

- короткочасний електричний струм, що виникає у діелектричному середовищі внаслідок зміщення зв'язаних зарядів під дією зовнішнього електричного поля;

Струм у вакуумі

- утворюється у процесі руху *заряджених частинок (електронів)* у *вакуумі*, які вилетіли з поверхні речовини.

За напрям струму вважають напрям руху *позитивних зарядів*.



У *металах* напрям струму є протилежним до напрямку направлено руху електронів.

Основними умовами існування струму є:

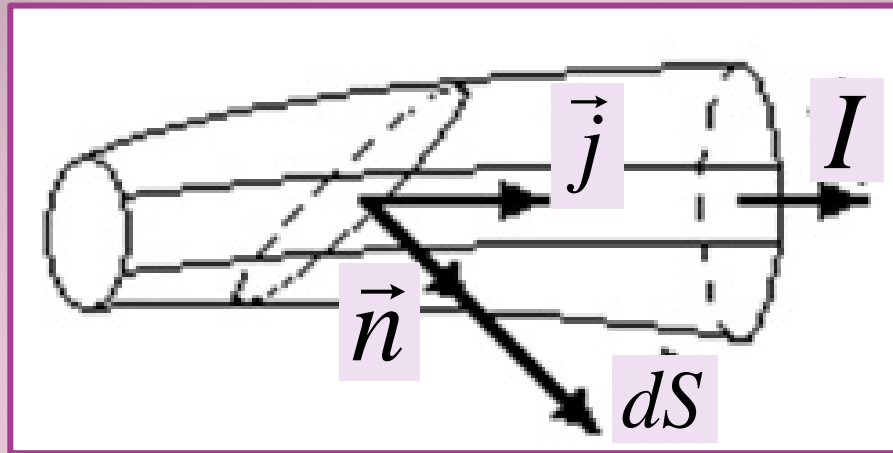
- Необхідна:** наявність вільних носіїв заряду.
- Достатня:** створення та підтримання у провіднику електричного поля.

3.6. Сила струму. Густина струму

Сила струму – скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює електричному заряду, що переноситься через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

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

$$[I] = [1A]$$



Густина струму – векторна фізична величина, що чисельно дорівнює електричному заряду, який переноситься через перпендикулярний до напрямку руху носіїв переріз одиничної площі провідника за одиницю часу:

$$\vec{j} = \frac{dq}{dt \cdot dS} \vec{n}$$

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n} \quad [j] = \left[1 \frac{A}{m^2} \right]$$

Постійним електричним струмом називають такий струм, значення і напрям якого не змінюються, тобто

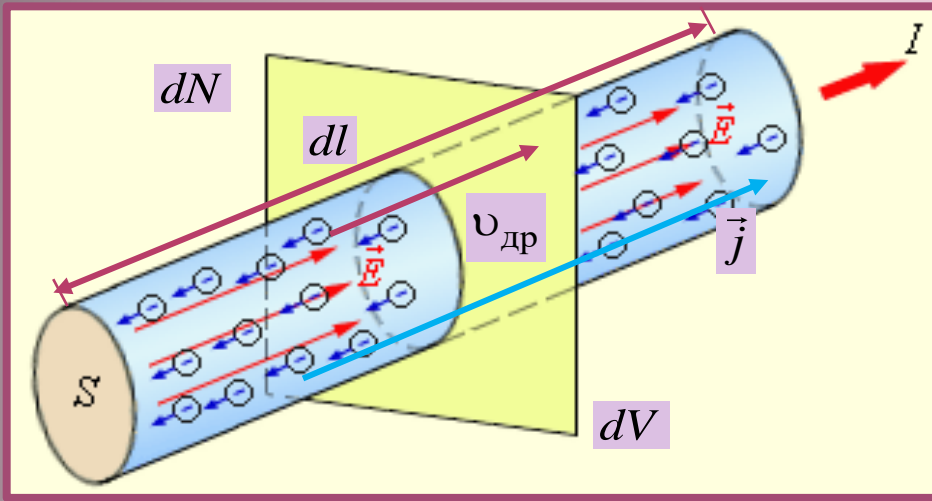
$$\vec{j} = \text{const}$$

Створити постійний електричний струм можна у замкненому провідному колі, що містить джерело постійного електричного струму (наприклад, гальванічний елемент, генератор електричного струму, термопару, сонячну батарею).

3.6. Електричний струм в металах

Знайдемо зв'язок *густини струму* та *швидкості руху* електронів провідності у металах

Виділимо у провіднику елементарний об'єм $dV = Sdl$, де S – площа поперечного перерізу, dl – елемент довжини.



Тоді, густина струму:
$$\vec{j} = \frac{dq}{dt \cdot S} \vec{n} = \frac{e \cdot dN}{dt \cdot S} \vec{n}$$

де згідно до умови дискретності електричного заряду:

$$q = e \cdot dN$$

Нехай концентрація носіїв електричного заряду в одиниці об'єму провідника:

$$n = \frac{dN}{dV}$$

Тоді:
$$\vec{j} = \frac{e \cdot dN}{dt \cdot S} \vec{n} = \frac{e \cdot n \cdot dV}{dt \cdot S} \vec{n} = \frac{e \cdot n \cdot S \cdot dl}{dt \cdot S} \vec{n}$$

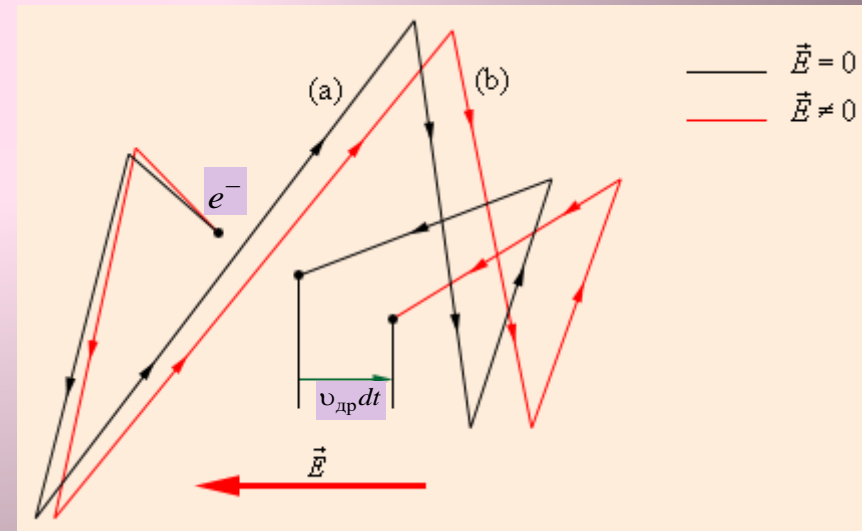
Введемо поняття *швидкості дрейфу електронів*:

$$v_{др} = \frac{dl}{dt} \Rightarrow dl = v_{др} dt$$

Підставимо:

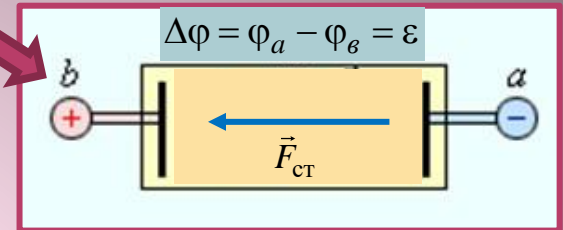
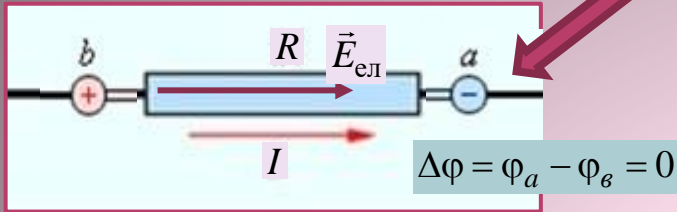
$$\vec{j} = \frac{e \cdot n \cdot S \cdot dl}{dt \cdot S} \vec{n} = \frac{e \cdot n \cdot S \cdot v_{др} \cdot dt}{dt \cdot S} \vec{n}$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{j} = e \cdot n v_{др} \vec{n}}$$



3.6. Електрорушійна сила та напруга. Сторонні сили.

Всі електричні кола мають *зовнішню* (споживачі) та *внутрішню* (джерело струму) ділянки



Переміщення вільних зарядів у зовнішній частині електричного кола відбувається завдяки *кулонівським силам поля* у протилежному напрямі напруженості $\vec{E}_{\text{ел}}$

Всередині джерела струму (внутрішній частині кола) негативні частинки потрібно перемістити від позитивного полюса до негативного, що здійснюється завдяки *стороннім силам*.

Сторонніми силами називають сили *неелектростатичної природи*, що діють на заряди всередині джерела струму, підтримуючи на його кінцях сталу різницю потенціалів.

Природа і механізми виникнення сторонніх сил є різними у різних джерелах струму:

- **механічні** (генератори постійного струму)
- **хімічні** (гальванічні елементи)
- **термоелектричні** (термопара)
- **світлові** (сонячна батарея) тощо.

Таким чином, у колі постійного струму, окрім електростатичного поля зовнішнього кола напруженістю $\vec{E}_{\text{ел}}$ існує *електростатичне поле сторонніх сил напруженістю* $\vec{E}_{\text{ст}}$ всередині джерела струму

Значення *напруженості поля сторонніх сил* визначається силою, що діє з боку сторонніх сил на позитивний одиничний заряд у колі:

$$\vec{E}_{\text{ст}} = \frac{\vec{F}_{\text{ст}}}{q_0}$$

Результуюча сила, що діє на заряд у колі постійного струму:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{кл}} + \vec{F}_{\text{ст}} = q_0 (\vec{E}_{\text{кл}} + \vec{E}_{\text{ст}}) = q_0 \vec{E}$$

3.6. Електрорушійна сила та напруга. Сторонні сили.

Сторонні сили характеризуються роботою, яку вони виконують під час переміщення зарядів по колу:

$$A_{\text{СТ}} = q_0 \oint_L (\vec{E}_{\text{СТ}} \cdot d\vec{l})$$

Електрорушійною силою (ЕРС) джерела струму називають скалярну фізичну величину, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил з переміщення одиничного позитивного заряду по колу:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{СТ}}}{q_0} \quad [\varepsilon] = [1B]$$

Отже, значення ЕРС, яка діє у замкненому колі, дорівнює циркуляції вектора напруженості сторонніх сил по замкненому колу:

$$\varepsilon = \oint_L (\vec{E}_{\text{СТ}} \cdot d\vec{l})$$

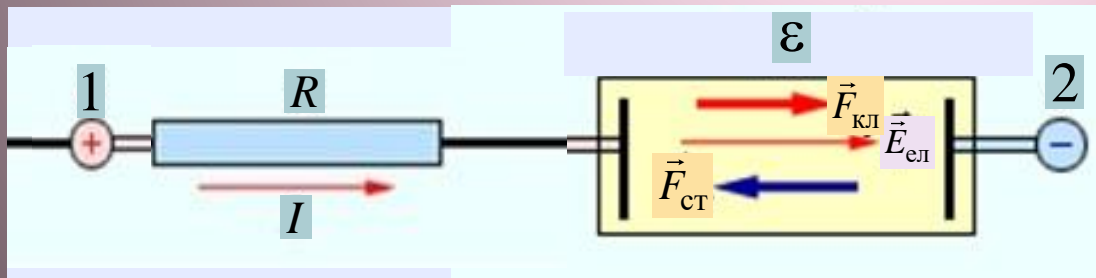
Тоді на ділянці кола між довільними точками 1 і 2 ЕРС:

$$\varepsilon_{12} = \int_1^2 (\vec{E}_{\text{СТ}} \cdot d\vec{l})$$

Напруга на ділянці кола - скалярна фізична величина, що чисельно дорівнює **роботі**, яку виконують кулонівські і сторонні сили в процесі переміщення одиничного позитивного заряду із точки 1 у точку 2:

$$U = \frac{A_{\text{кл}12} + A_{\text{СТ}12}}{q_0} = \int_1^2 (\vec{E}_{\text{ел}} \cdot d\vec{l}) + \int_1^2 (\vec{E}_{\text{СТ}} \cdot d\vec{l})$$

Ділянку кола, яка містить джерело струму та навантаження називають **неоднорідною ділянкою кола**.

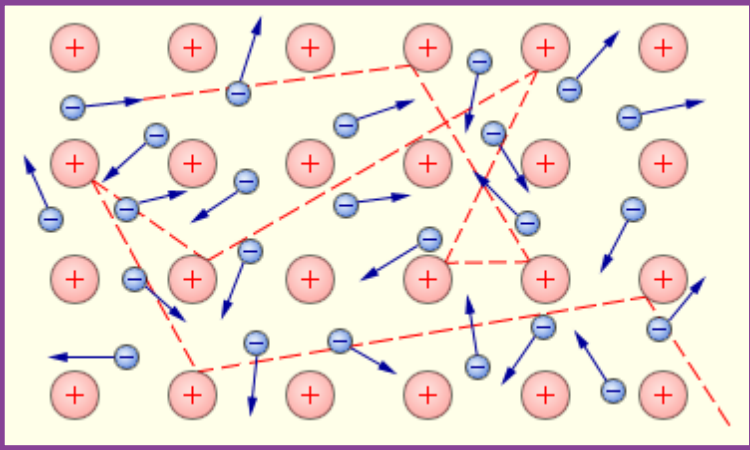


Напруга на неоднорідній ділянці кола є сумою різниці потенціалів та ЕРС на даній ділянці кола:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon$$

3.6. Опір провідників.

Електричний опір провідника – це скалярна фізична величина, яка є властивістю провідника щодо перешкоджання направленому рухові носіїв заряду вздовж нього.



Наявність опору у металевих провідників **першого роду** пов'язана із розсіюванням енергії електронів провідності на **теплову енергію коливань** кристалічної ґратки.

Цей опір інакше називають **активним**, або омичним, оскільки розрізняють ще реактивний (**індуктивний і ємнісний**) опір у колах змінного струму.

Опір провідника залежить від матеріалу, параметрів (довжини, площі поперечного перерізу) та температури.

Для провідника циліндричної форми:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [R] = [1 \text{ Ом}]$$

ρ – питомий опір матеріалу, з якого виготовлений провідник, вимірюється в Ом·м;
 l – довжина провідника; S – площа поперечного перерізу провідника.

Величину, обернено пропорційну питомому опору, називають **питомою електричною провідністю матеріалу**, вимірюється вона у сименсах на метр (Ом⁻¹·м⁻¹ = См/м):

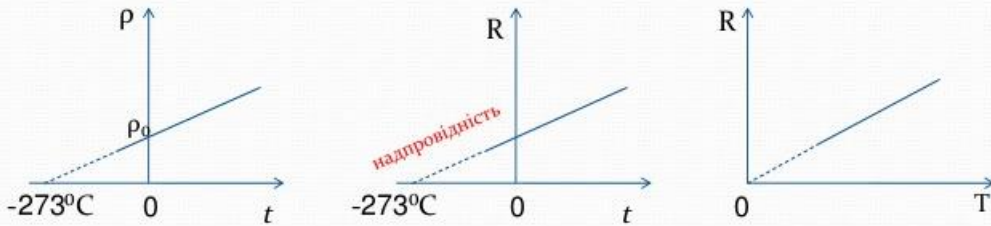
$$\sigma = 1/\rho$$

Матеріали з **малим питомим опором** широко використовують в електротехніці, оскільки є добрими провідниками електричного струму – срібло ($1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), мідь ($1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), алюміній ($2,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м). Через економічні чинники срібло використовують лише для виготовлення високоточних приладів.

Донедавна у будівництві промислових і житлових будівель використовували переважно **алюмінієву проводку**. На тепер через значне збільшення енергоспоживання побутовою, аудіо-відео- і комп'ютерною технікою у житлових приміщеннях, вентиляційно-кліматичних, охоронних, автоматизовано-управлінських, ліфто-підйомних системах у промислових будівлях фінансово обґрунтованим стало використання **мідної проводки** з огляду на зменшення енерговитрат та збільшення енергопропускної спроможності за однакових перерізів провідників.

3.6. Опір провідників. Залежність опору від температури

Графіки залежності питомого опору та опору металів від температури



Опір провідника за температури t °C визначається за формулою:

$$R_{t,^{\circ}C} = R_{0^{\circ}C} (1 + \alpha t)$$

$R_{0^{\circ}C}$ – опір провідника за 0 °C;

α – температурний коефіцієнт опору (величина, стала для даного матеріалу)

Пояснення залежності може бути таке: у міру підвищення температури збільшуються амплітуда і частота коливань вузлів кристалічної ґратки провідника (основної фізичної причини опору), це зумовлює збільшення ймовірності зіткнень носіїв заряду з вузлами, чим і пояснюється зростання опору провідника.

За дуже низьких температур, нижчих за критичну, спостерігається явище надпровідності – повне зникнення опору матеріалів, виявлене вперше Г. Камерлінг - Оннесом для ртуті у 1911 р. Пояснення механізму виникнення явища надпровідності дає квантова фізика.

Явище зміни електричного опору металів залежно від температури є основою для створення **термометрів опору**, які дають змогу вимірювати температуру з точністю до тисячних часток кельвіна.

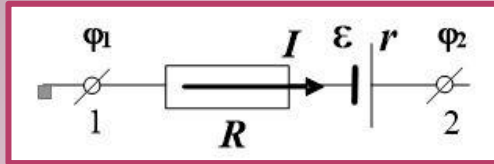
За дуже низьких температур, нижчих за критичну, спостерігається явище надпровідності – повне зникнення опору матеріалів, виявлене вперше Г. Камерлінг - Оннесом для ртуті у 1911 р. Пояснення механізму виникнення явища надпровідності дає квантова фізика.



3.7. Закони Ома в інтегральній формі

Закони Ома дають можливість визначати силу струму *в нерозгалужених колах* або на їхніх ділянках для провідників.

Закон Ома для неоднорідної ділянки кола в інтегральній формі, тобто ділянки, яка містить джерело струму:



$$I = \frac{U}{R+r} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon}{R+r}$$

$\varphi_1 - \varphi_2$ – різниця потенціалів на кінцях ділянки кола;

ε – електрорушійна сила джерела струму;

R – зовнішній опір, тобто опір всіх інших елементів ділянки кола;

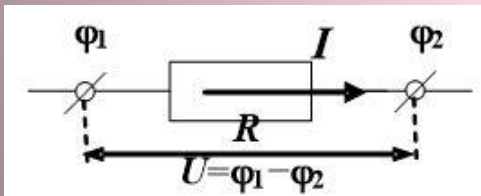
r – внутрішній опір, тобто опір джерела струму.

Знак ЕРС залежить від знаку роботи, яку виконують сторонні сили.

Якщо ЕРС сприяє руху позитивно заряджених частинок в обраному напрямку 1–2, то

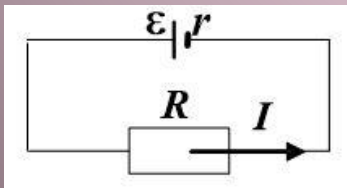
Якщо ЕРС перешкоджає руху позитивно $\varepsilon > 0$ заряджених частинок у цьому напрямку, то $\varepsilon < 0$

Закон Ома для однорідної ділянки кола в інтегральній формі, тобто ділянки, яка не містить джерела струму ($\varepsilon = 0$; $r = 0$):



$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$$

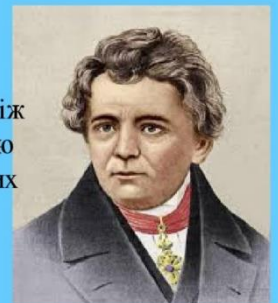
Закон Ома замкнутого (повного) кола в інтегральній формі:



$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}$$

Явища в електричних колах докладно вивчав **Георг Ом**.

У 1826 році він встановив залежність між силою струму, напругою та опором в електричних колах.



3.7. Закони Ома в диференціальній формі.

Закон Ома у диференціальній формі для неоднорідної ділянки кола:

$$dI = \frac{U}{dR} = \frac{E_{\text{кЛІ}} \cdot dl + E_{\text{СТ}} \cdot dl}{dR} = \frac{dl(E_{\text{кЛІ}} + E_{\text{СТ}})}{dR}$$

$$dR = \rho \frac{dl}{dS}$$

$$dI = \rho \frac{dl(E_{\text{кЛІ}} + E_{\text{СТ}})dS}{dl}$$

$$\frac{dI}{dS} = \rho(E_{\text{кЛІ}} + E_{\text{СТ}})$$

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n}$$

$$\sigma = 1/\rho$$

Остаточно:

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E}_{\text{кЛІ}} + \vec{E}_{\text{СТ}})$$

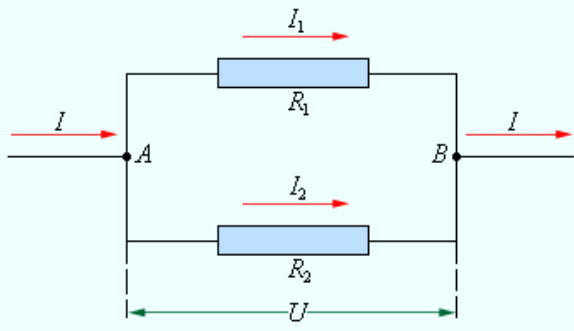
Закон Ома у диференціальній формі для неоднорідної ділянки кола: густина струму в даному перерізі провідника пропорційна векторній сумі напруженості поля кулонівських та сторонніх сил.

Закон Ома у диференціальній формі для однорідної ділянки кола:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}_{\text{кЛІ}}$$

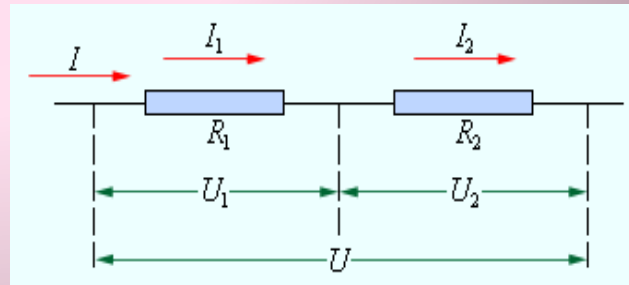
Закони Ома в **інтегральній формі** застосовуються для розрахунку **струму на всьому колі**, тоді як закони Ома в **диференціальній формі** визначають величини в **будь-якій точці** електричного кола.

Опір системи паралельно або послідовно з'єднаних провідників



$$I = \sum_{i=1}^n I_i$$

$$U = U_1 = \dots = U_n$$



$$I = I_1 = \dots = I_n$$

$$U = \sum_{i=1}^n U_i$$

$$\frac{1}{R_{\text{нап}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

$$R_{\text{носл}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i$$

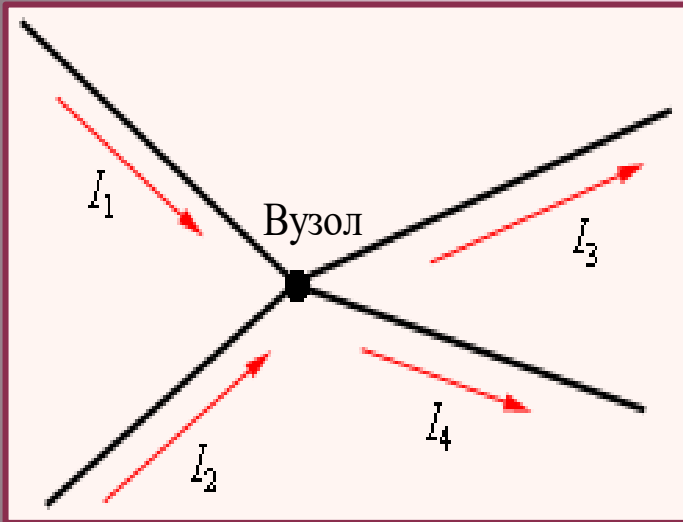
3.7. Правила Кірхгофа

Правила Кірхгофа – закони, за допомогою яких можна визначати силу струму, опір або ЕРС джерела струму на окремих ділянках розгалужених електричних кіл

Розгалуженим колом називають коло, в якому є точки з'єднання трьох і більше провідників.

Вузли - точки, в яких сходяться три або більше провідників зі струмами.

Ділянкою розгалуженого кола називають частину контуру між двома вузлами, яка містить джерела струму та споживачі.



Перше правило Кірхгофа (правило вузлів) стосується вузлів розгалуженого кола:
алгебраїчна сума сил струмів, які сходяться у вузлі, дорівнює нулеві:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

де n – кількість ділянок, що сходяться у вузлі.

Перше правило Кірхгофа базується на **законі збереження електричного заряду**.

Правило знаків: струми, які входять до вузла, записують зі знаком “+”, а струми, які виходять із нього, – зі знаком “-”, тобто сума сил струмів, що входять у вузол, дорівнює сумі сил струмів, що виходять з нього.



Кірхгоф Гюстав Роберт

3.7. Правила Кірхгофа

Друге правило Кірхгофа (правило контурів) є узагальненням закону Ома для довільного контуру розгалуженого електричного кола:

у замкненому контурі алгебраїчна сума спадів напруги (добутків сил струмів на опори провідних ділянок) дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, які діють у цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^m I_k r_k = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k$$

де n – кількість ділянок, що сходяться у вузлі;
 m – кількість ЕРС у контурі

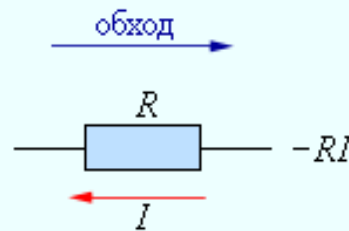
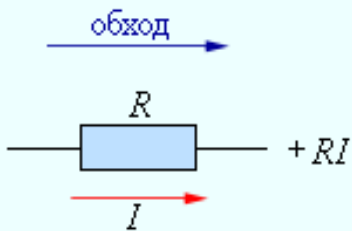
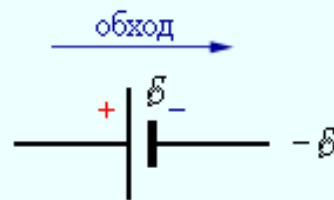
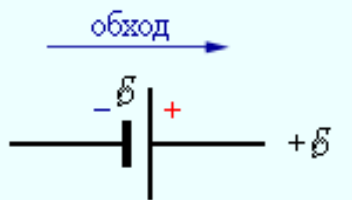
$$\sum_{k=1}^n I_k R_k$$

– спад напруги на зовнішній ділянці (на споживачах);

$$\sum_{k=1}^m I_k r_k$$

– спад напруги на внутрішній ділянці (на джерелі);

Правила знаків:



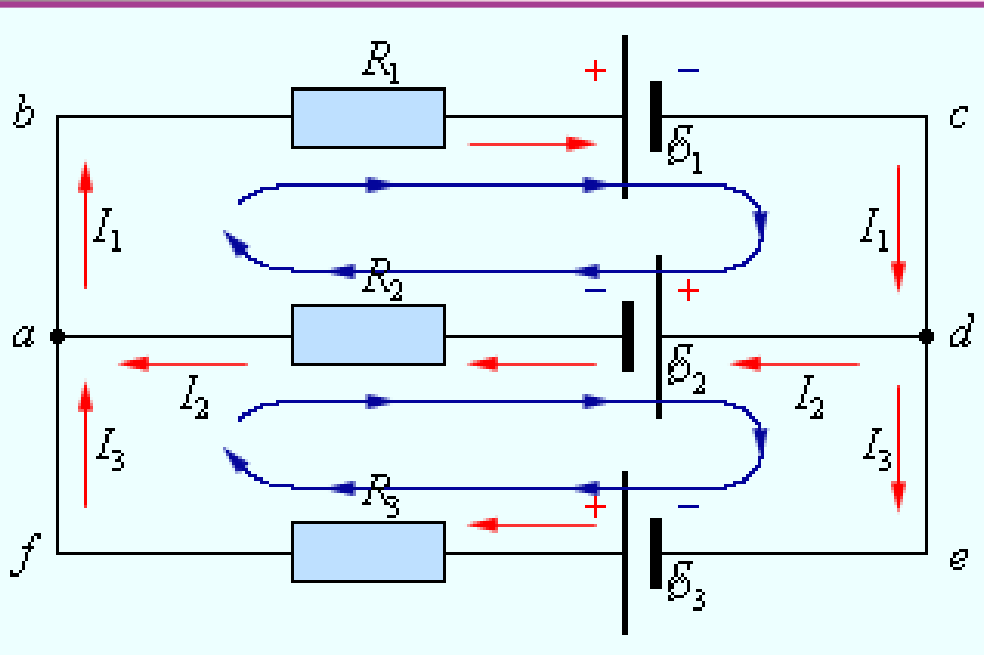
1. За обходу контуру за довільно обраним напрямком доданки спадів напруги беруться зі знаком "+", якщо напрямком обходу контуру збігається з напрямком струму, зі знаком "-", якщо напрямком обходу контуру протилежний напрямку струму;

2. Доданки ЕРС беруться зі знаком "+", якщо в разі обходу контуру за довільно обраним напрямком джерело струму проходимо від негативного полюсу до позитивного, і зі знаком "-", якщо джерело проходимо від позитивного полюсу до негативного.

3.7. Правила Кірхгофа

У розв'язуванні задач, в яких розглядають *розгалужені кола*, варто дотримуватись певної послідовності дій.

1. На всіх ділянках схеми розгалуженого кола довільно позначити стрілками напрям струму
2. Записати за першим правилом Кірхгофа кількість $n - 1$ рівнянь відповідно до правила знаків.
3. Довільно обрати напрям кожного простого контуру, наприклад, за рухом годинникової стрілки.
4. Записати за другим правилом Кірхгофа кількість $p - (n - 1)$ рівнянь відповідно до правила знаків, де p — кількість ділянок кола. Обійти кожен контур треба двічі, перший раз — записуючи ліву частину рівняння відповідно до правила знаків, а другий раз — праву частину рівняння.
5. Перевірити, щоб усі електрорушійні сили й опори входили в отриману систему рівнянь, а кількість рівнянь дорівнювала кількості різних струмів у розгалуженому колі. Якщо внаслідок обчислення деякі струми матимуть знак “-”, то це означає, що їхні справжні напрями протилежні напрямам, позначеним на схемі.



Для вузла a :

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

Для контуру $abcda$:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

Для контуру $adefa$:

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

Якщо в результаті розв'язку струми мають від'ємне значення, це означає, що вони направлені в іншу сторону.

Якщо в результаті розв'язку опори мають від'ємне значення, це означає, що рівняння розв'язані не вірно!

3.8. Робота і потужність електричного струму. Закон Джоуля-Ленца

Під час перенесення заряду dq ділянкою однорідного провідника виконується елементарна робота dA :

$$dA = Udq = U \cdot Idt$$

За постійного струму силою I за скінченний проміжок часу t **робота електричного струму на зовнішній ділянці кола**:

$$A = IU \int_0^t dt = IUt$$

Якщо струм з часом змінюється $I = f(t)$, то робота струму за час t :

$$A = \int_0^t I^2(t) R dt$$

Оскільки ЕРС джерела струму чисельно дорівнює роботі, що виконується в процесі перенесення одиничного заряду по замкненому колу, то за постійного струму силою I за час t **повна робота** дорівнюватиме:

$$A_{\text{пов}} = \varepsilon \cdot q = \varepsilon \cdot It = \frac{\varepsilon^2 t}{R + r}$$

Потужністю електричного струму називають скалярну фізичну величину, що чисельно дорівнює роботі, яку виконує струм за одиницю часу:

$$P = \frac{dA}{dt}$$

Корисна потужність у зовнішній частині кола з опором R за постійного струму:

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

Повна потужність на зовнішній і внутрішній частинах електричного кола:

$$P_{\text{пов}} = \varepsilon \cdot I = \frac{\varepsilon^2}{R + r}$$

Коефіцієнт корисної дії джерела струму визначають відношенням корисної потужності до загальної потужності джерела:

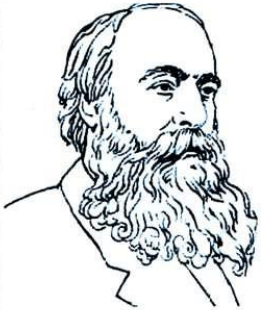
$$\eta = \frac{P}{P_{\text{пов}}} = \frac{R}{R + r}$$

Потужністю в 1 *ват* (1 Вт) характеризують такий струм, під час проходження якого через провідник щосекунди виділяється енергія в 1 Дж – 1 Вт = 1 Дж/1 с.

На практиці використовують також позасистемні одиниці роботи струму: ват-година (Вт·год) і кіловат-година (кВт·год). 1 Вт·год – це робота електричного струму потужністю 1 Вт протягом 1 год.

3.8. Робота і потужність електричного струму. Закон Джоуля-Ленца

Від чого залежить кількість теплоти, що виділяється у провіднику зі струмом?



Джоуль Джеймс Прескотт
(1818-1889)



Ленц Емілій Христіанович
(1804-1865)

У разі проходження струму по нерухомому провіднику, в якому не відбуваються хімічні перетворення, робота струму перетворюється у внутрішню енергію провідника.

Закон Джоуля – Ленца: кількість теплоти, що виділяється у провіднику під час проходження по ньому постійного електричного струму, прямо пропорційна добуткові квадрата сили струму, опору провідника і часу проходження струму:

$$Q = I^2 R t$$

$$Q = c_p m \Delta t$$

Це положення експериментально виявив Дж. Джоуль у 1841 р. і на дослідах підтвердив Е. Ленц у 1842 р.

Якщо струм змінюється з часом, то сумарна (інтегральна) кількість теплоти, що виділяється у провіднику з опором R :

$$Q = \int_0^t I^2(t) R dt$$

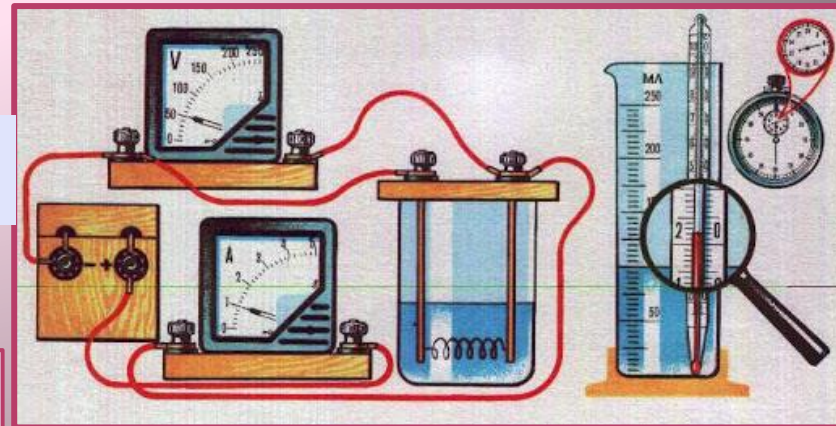
Виразимо кількість теплоти, яка виділяється на окремих ділянках провідника через локальні характеристики провідника та електричного поля в ньому, виділивши всередині провідника елементарний об'єм у вигляді циліндра

$$dQ = I^2 dR dt = (j dS)^2 \rho \frac{dl}{dS} dt = j^2 \rho dV dt$$

Кількість теплоти, що виділяється в одиниці об'єму провідника за одиницю часу, називають **питомою потужністю струму**:

$$\varpi = \frac{dQ}{dV dt}$$

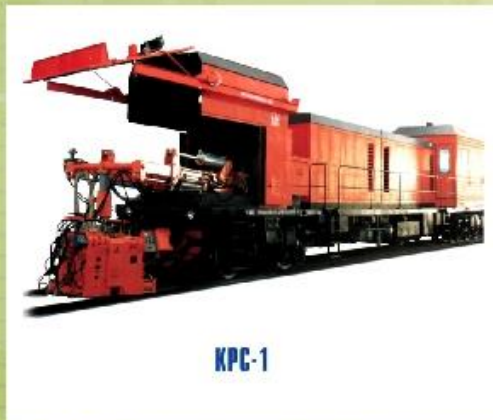
Закон Джоуля – Ленца у диференціальній формі: $\varpi = \sigma \vec{E}_{кл}^2$





Використання теплової дії струму у контактному електрозварюванні

Каховський завод електрозварювального обладнання випускає 13 видів електрозварювального обладнання, ось деякі із них:



Рейкозварювальна машина КРС-1



Підвісні машини для зварювання труб



Машини стаціонарні для контактної точкового зварювання

Лекція закінчена



Дякую за увагу