

# ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

ЛЕКЦІЯ 7

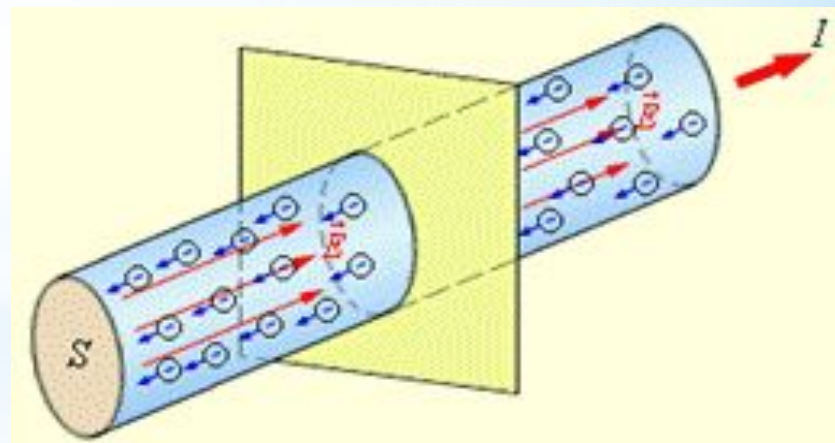
# ПЛАН

1. Постійний електричний струм, його види та умови існування. Сила струму, вектор густини струму.
2. Сторонні сили. Електрорушійна сила. Напруга.
3. Природа електричного опору провідника. Питомі опір та електропровідність. Залежність опору від температури.
4. Закон Ома в інтегральній та диференціальній формах для ділянки та замкнутого електричного кола.
5. Робота та потужність електричного струму. Закон Джоуля-Ленца.
6. Правила Кірхгофа для розгалужених кіл.
7. Опір при з'єднанні провідників - **самостійно**.

# Електричний струм

*Електричним струмом* називається будь-який впорядкований (напрямлений) рух електричних зарядів або тіл.

За напрям струму умовно прийнято напрям руху позитивно заряджених частинок або тіл.



# Види електричного струму

Розрізняють наступні види електричного струму:

1) **струм провідності** - це струм в провіднику, викликаний рухом вільних електричних зарядів під дією прикладеного електричного поля : позитивних - за напрямом поля, негативних - проти поля;

2) **конвекційний струм** - це струм, викликаний переміщенням в просторі заряджених макроскопічних тіл.

Надалі мова йтиме про струм провідності

# Умови існування електричного струму

Для появи та існування електричного струму потрібно, щоб виконувалися наступні умови:

- 1) **наявність вільних носіїв струму** - заряджених частинок, що можуть переміщуватись по всьому об'єму (у металах - електрони, рідинах - позитивні та негативні іони, в газах - позитивні іони та електрони).
- 2) **наявність електричного поля**, енергія якого відновлюється та витрачається на впорядкований рух заряджених частинок.

# Сила струму

*\*Сила струму* - це скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює електричному заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

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

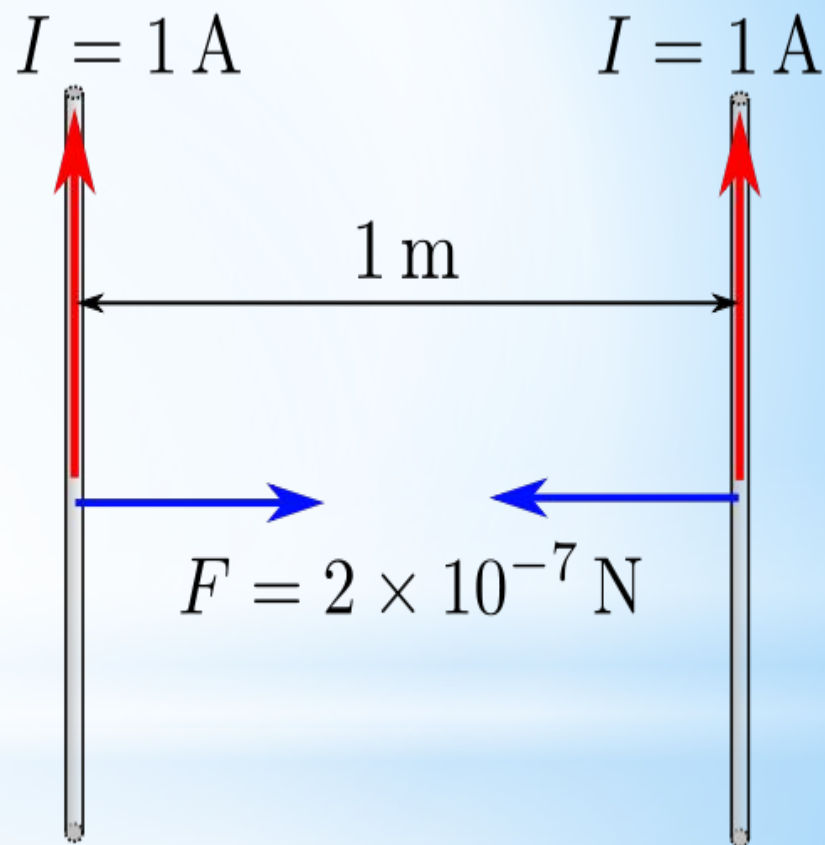
Якщо сила струму і його напрям не змінюються з часом, то такий струм називається **постійним**, а сила постійного струму визначається формулою

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

де  $q$  - електричний заряд, що проходить за час  $t$  через поперечний переріз провідника.

# Одиниця виміру сили струму

1 Ампер - це сила постійного струму, який при проходженні по двом паралельним прямолінійним провідникам нескінченної довжини та нескінченно малої площі поперечного перерізу, розташованим у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликає на кожній ділянці провідника довжиною 1 метр силу взаємодії, рівну  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

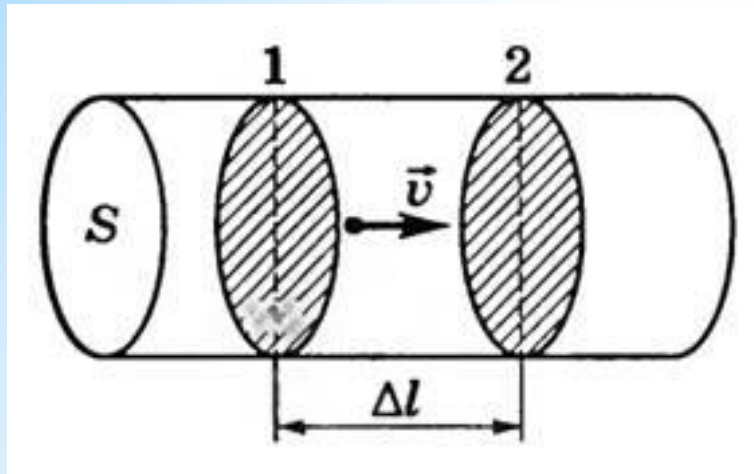


# Густина струму

*Густина струму* - це векторна фізична величина, співнапрямлена зі струмом, яка чисельно дорівнює силі струму, що проходить через одиницю площі поперечного перерізу провідника, перпендикулярного до напрямку струму:

$$\vec{j} = \frac{d\vec{I}}{dS_{\perp}}, [j] = 1 \text{ A/m}^2$$

Силу і густину струму можна виразити через середню швидкість впорядкованого руху зарядів у провіднику.



## Зв'язок сили та густини струму з швидкістю руху зарядів

За час  $dt$  через поперечний переріз  $S$  переноситься заряд

$$dq = Ne = nV e = neS\Delta l = neS\langle v \rangle dt$$

де  $n$  - концентрація зарядів,  $e$  - заряд електрона. Тоді густина струму буде визначатися за формулою:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{dq}{Sdt} = \frac{neS\langle v \rangle dt}{Sdt} = ne\langle v \rangle$$

Отже, остаточно отримаємо вираз

$$j = ne\langle v \rangle$$

або у векторній формі

$$\vec{j} = ne\langle \vec{v} \rangle$$

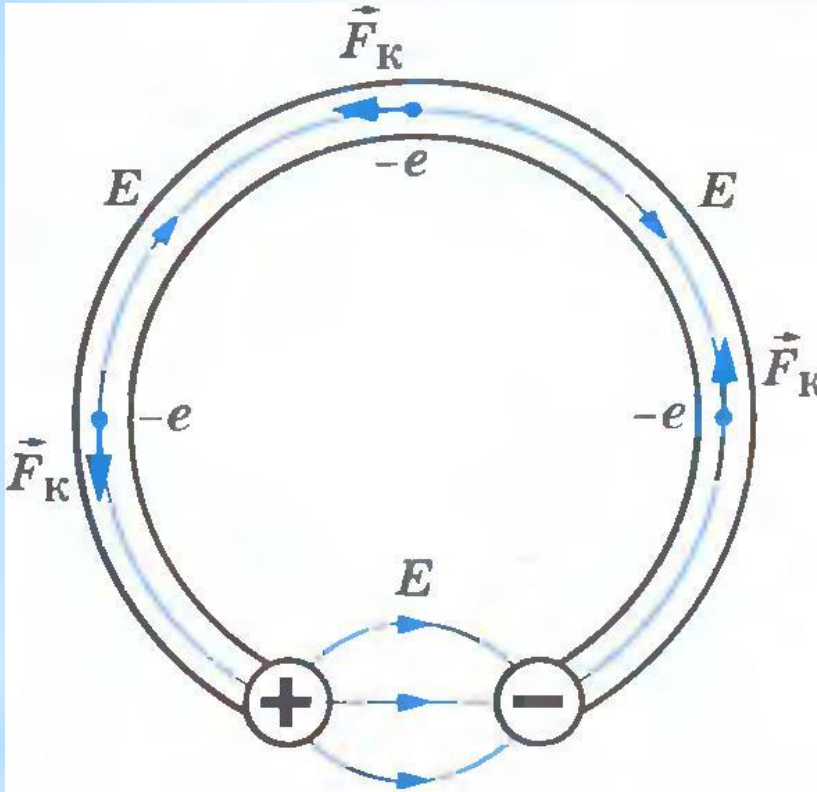
Тобто густина струму - вектор, напрям якого співпадає з напрямом впорядкованого руху позитивних зарядів.

Знаючи вектор густини струму в кожній точці провідника, можна знайти силу струму через будь-яку поверхню  $S$  як інтеграл:

$$I = \int_S j dS$$

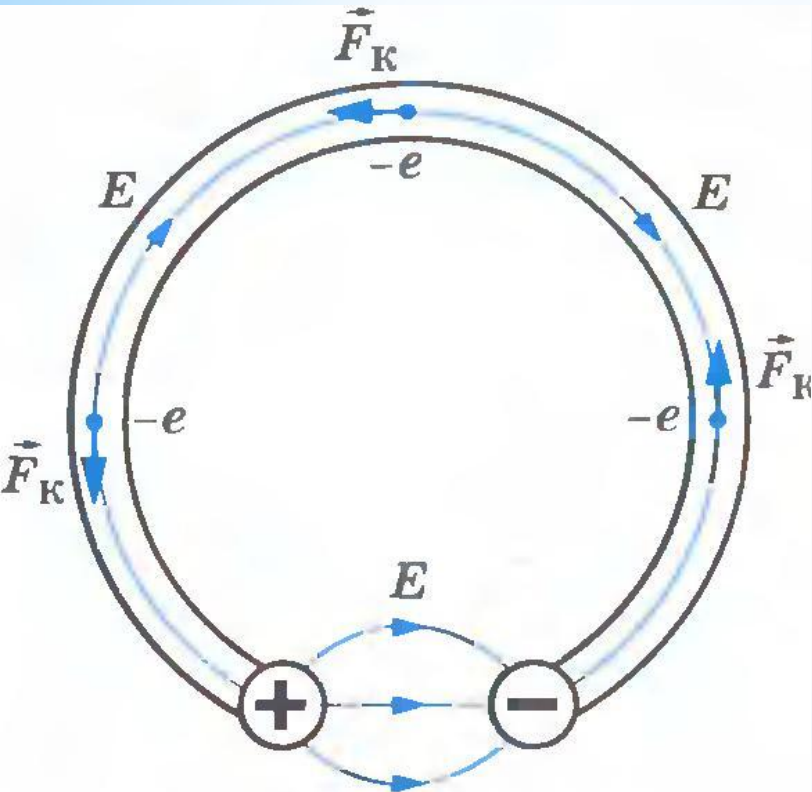
**Отже, сила струму дорівнює потоку вектора густини струму через довільну поверхню**

# Сторонні сили



Якщо в електричному колі на носії струму діють лише сили електростатичного поля, то переміщення цих носіїв призводить до вирівнювання потенціалів у всіх точках кола і до зникнення електростатичного поля.

# Сторонні сили



Тому для існування постійного струму в електричному колі обов'язково потрібно мати пристрої, які здатні створювати і підтримувати різницю потенціалів за рахунок роботи сил неелектростатичного походження. Такі пристрої називаються **джерелами струму**, а сили неелектростатичного походження - **сторонніми силами**.

# Сторонні сили, ЕРС

\* Природа сторонніх сил різна: механічна (генератори), хімічна (акумулятори, гальванічні елементи), теплова (термоелементи), світлова (фотоелементи, сонячні батареї)...

Але спільним є те, що *сторонні сили здійснюють роботу по переміщенню зарядів.*

Фізична величина, що чисельно дорівнює роботі, яка здійснюється сторонніми силами при переміщенні одиничного позитивного заряду, називається *електрорушійною силою* (ЕРС):

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_0}$$

# Електрорушійна сила (ЕРС)

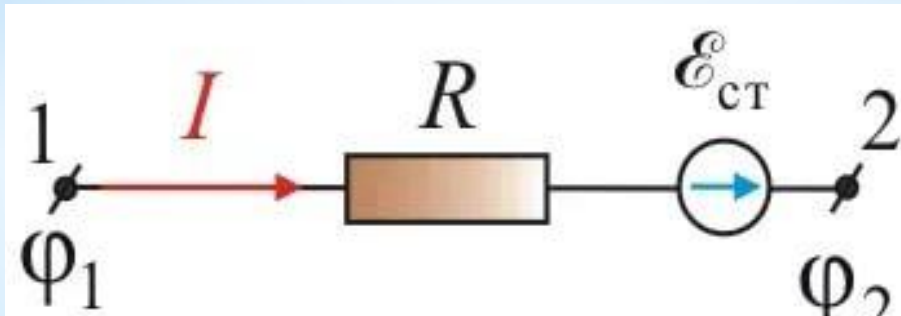
\*Робота сторонніх сил по переміщенню заряду на замкненій частині кола

$$A = \oint \vec{F}_{\text{ст}} d\vec{l} = q_0 \oint \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}$$

де  $\vec{E}_{\text{ст}} = \frac{\vec{F}_{\text{ст}}}{q_0}$  - напруженість поля сторонніх сил.

ЕРС, що діє в колі,  $\mathcal{E} = \frac{A}{q_0} = \oint \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}$

ЕРС на ділянці 1 - 2 кола  $\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}$



# Напруга

✳ Якщо на заряд діють одночасно сторонні сили і сили електростатичного поля, то результуюча сила дорівнюватиме:

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

Робота результуючої сили на ділянці 1- 2 кола над зарядом  $q_0$

$$A_{12} = q_0 \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l} + q_0 \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = q_0 \mathcal{E}_{12} + q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$$

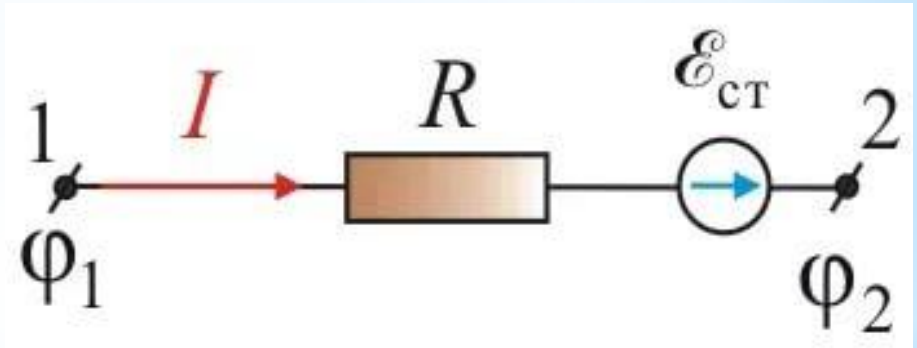
Для замкненого кола  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ , тому у цьому випадку

$$A = q_0 \mathcal{E}$$

# Напруга

\* Напруга на ділянці кола - це фізична величина, яка визначається роботою, що здійснюється результируючим полем електростатичних (кулонівських) і сторонніх сил при переміщенні одиничного позитивного заряду на даній ділянці кола:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$



Поняття напруги - це *узагальнене поняття різниці потенціалів*.

У випадку відсутності джерела струму на ділянці напруга на кінцях ділянки кола дорівнює різниці потенціалів.

# Електричний опір $R$ -

\* це фізична величина, яка характеризує опір провідника проходженню по ньому електричного струму.

Опір провідника довжиною  $l$  та площею поперечного перерізу  $S$  може бути визначений за формулою

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

де  $\rho$  - питомий опір речовини.

Одиниця опору - Ом.

1 Ом - опір такого провідника, в якому при напрузі на кінцях у 1 В протікає постійний струм 1 А.

# Електропровідність (провідність) $G$ -

\*фізична величина, обернена до електричного опору.

$$G = \frac{1}{R}$$

Для визначення електропровідності провідників використовують формулу

$$G = \gamma \frac{S}{l} \quad (R = \rho \frac{l}{S})$$

де  $\gamma = \frac{1}{\rho}$  - питома провідність речовини

Одиниця електричної провідності - Сименс

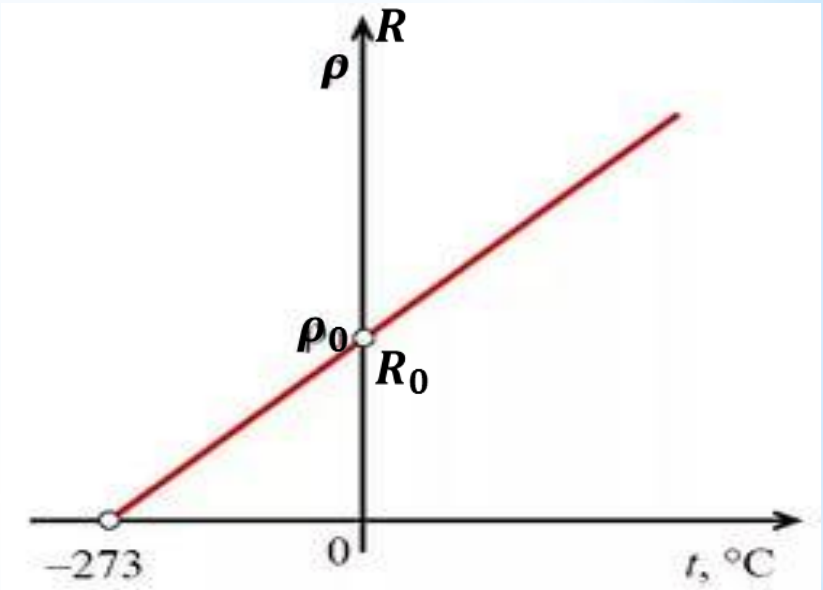
1 См - провідність ділянки електричного кола, опір якої дорівнює 1 Ом.

# Залежність опору від температури

Залежність опору та питомого опору металів від температури задається наступними залежностями:

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$



де  $R_0$  і  $\rho_0$  ( $R$  і  $\rho$ ) - відповідно *опір провідника і питомий опір при температурі 0 °C* (при  $t^\circ\text{C}$ )

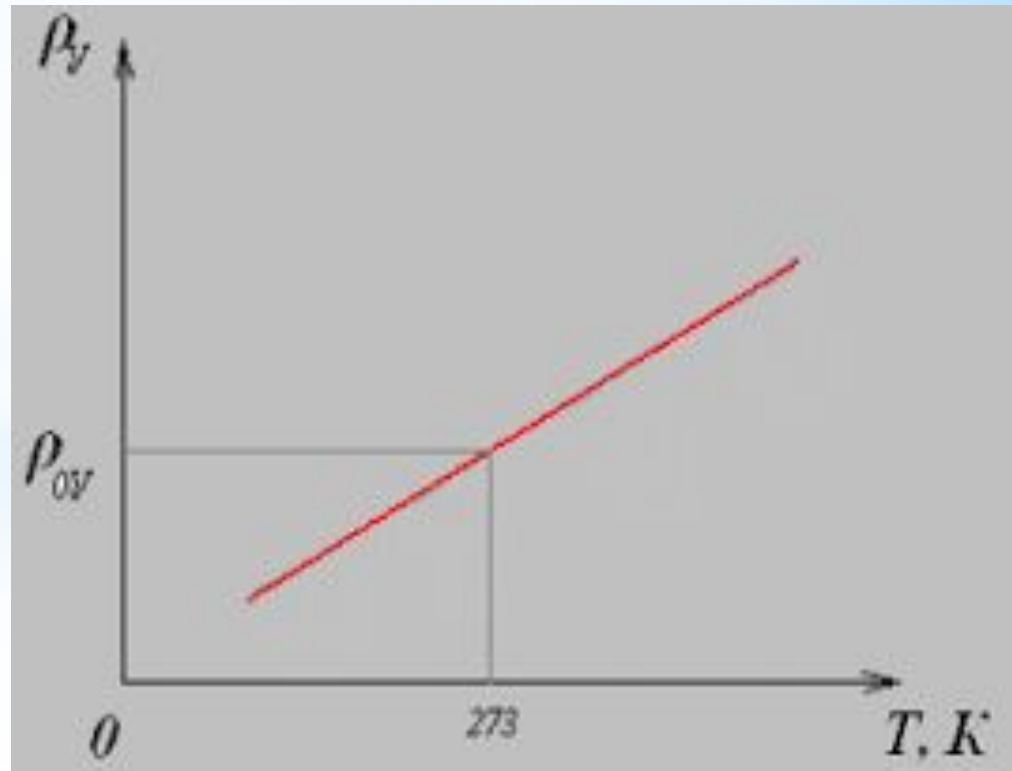
$\alpha$  - *температурний коефіцієнт опору (ТКО)*

# Залежність опору від температури

\* Для чистих металів значення ТКО  $\alpha \approx \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$ . Тому попередні формули для чистих металів набувають вигляду:

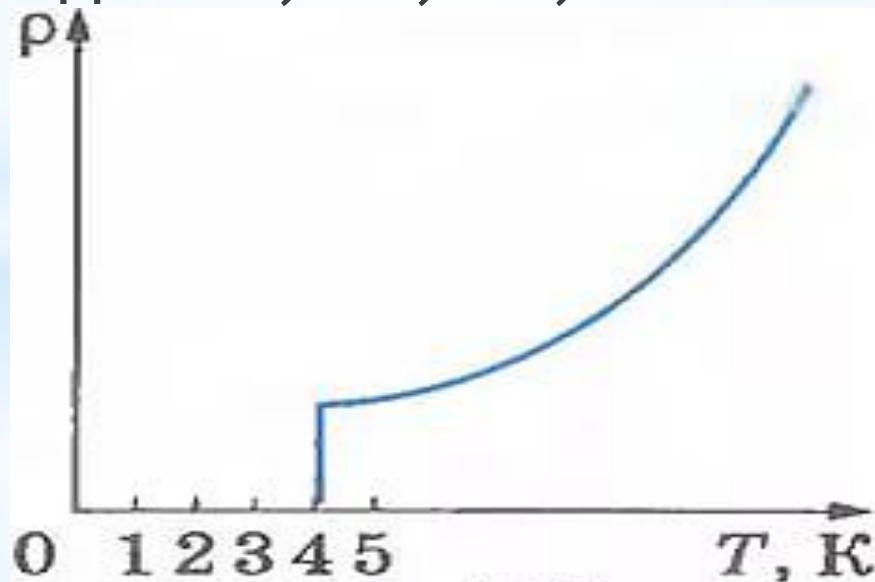
$$R = \alpha R_0 T \quad \rho = \alpha \rho_0 T$$

Графік цих залежностей має наступний вигляд



# Надпровідність

При дуже низьких температурах (так званих *критичних*) опір деяких речовин стрибком зменшується до 0 - речовина стає абсолютним провідником. Це явище було названо *надпровідністю*. Відкрив його у 1911 р. Г. Камерлінг-Оннес для ртуті. Надпровідний стан було відкрито для *Al*, *Zn*, *Pb*, а також їх сплавів.

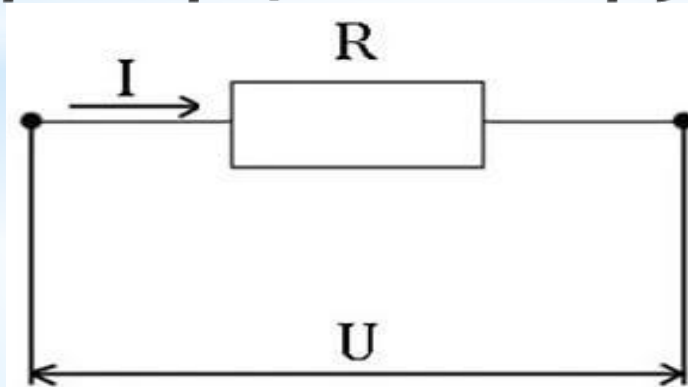


# Закон Ома (інтегральна форма)

\* Німецький фізик Г.Ом експериментально встановив закон, який і носить його ім'я.

Для однорідної ділянки кола (тобто для ділянки, яка не містить джерела струму) **закон Ома** формулюється так:

*Сила струму на ділянці кола прямо пропорційна напрузі на її кінцях та обернено пропорційна опорі ділянки.*



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

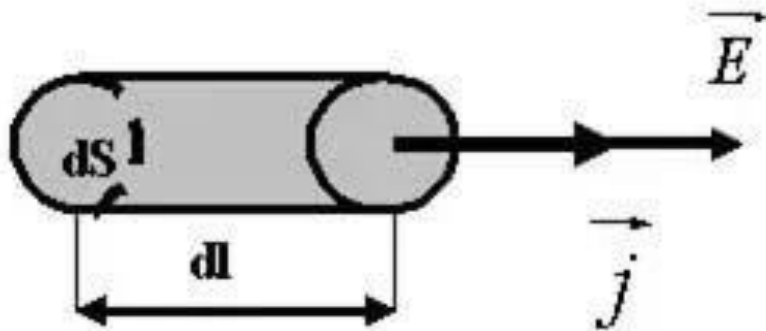
$$I = \int j dS$$

# Закон Ома (диференціальна форма)

\*Врахуємо, що  $R = \rho \frac{dl}{dS}$  та  $U = Edl$ . Отримаємо:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{Edl}{\rho \frac{dl}{dS}} = \frac{EdS}{\rho} = \frac{1}{\rho} EdS = \gamma EdS$$

Поділивши обидві частини отриманого виразу на  $dS$  отримаємо:  $j = \gamma E$  або  $\vec{j} = \gamma \vec{E}$  - закон Ома в диференціальній формі



тут  $j$  - густина струму;  
 $\gamma$  - питома провідність.

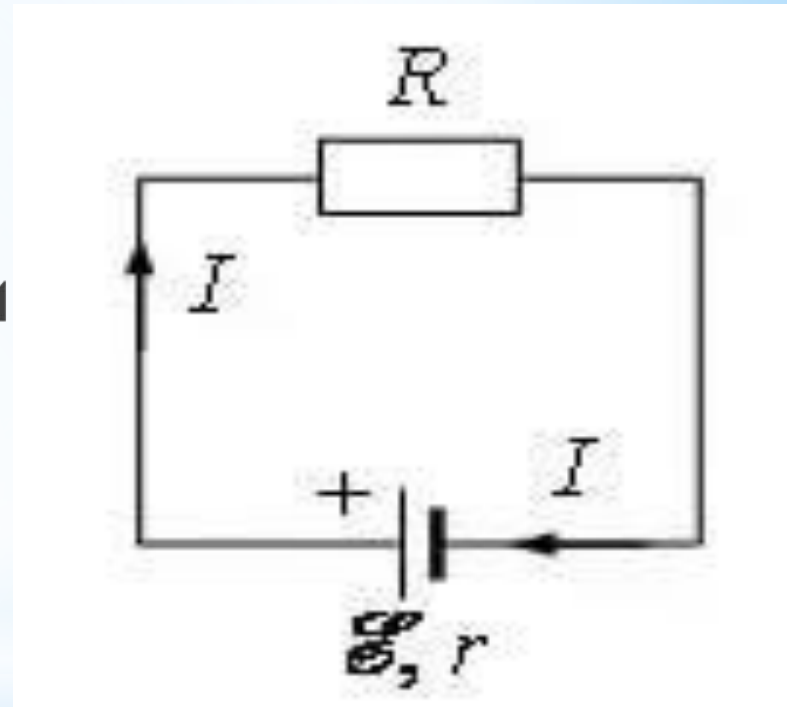
# Закон Ома для повного кола:

*\*Сила струму в колі дорівнює відношенню ЕРС джерела струму до повного опору кола:*

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

де  $R$  - опір зовнішньої частини кола;

$r$  - внутрішній опір джерела



Напруга на зовнішній частині кола:

$$U = IR = \varepsilon - Ir$$

# Робота та потужність електричного струму

Розглянемо однорідний провідник опором  $R$ , до кінців якого прикладено напругу  $U$ . За час  $dt$  через переріз провідника переноситься заряд  $dq = Idt$ , і *робота струму* визначається так:

$$dA = Udq = IUdt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt$$

Виходячи з цих формул, *потужність струму* :

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

# Закон Джоуля-Ленца

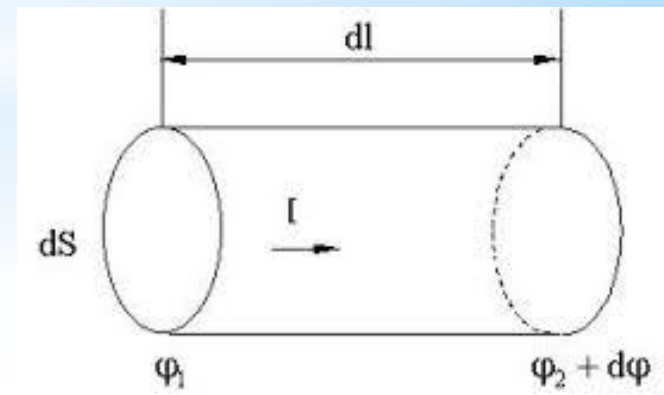
\* Якщо струм проходить по *нерухомому* провіднику, то вся робота струму витрачається на його нагрівання і, за законом збереження енергії,

$$dQ = dA = I^2 R dt$$

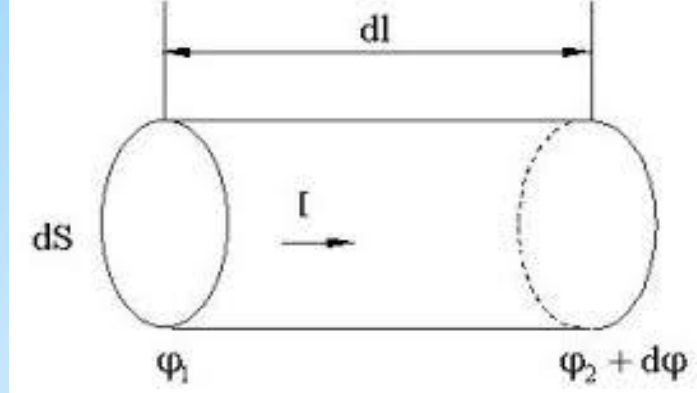
$$\text{або } Q = I^2 R t$$

Кількість теплоти, що виділяється у провіднику при проходженні струму, дорівнює добутку опору провідника, квадрата сили струму та часу його проходження

*Це інтегральна форма запису.*



# Закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі



Виділимо в провіднику елементарний циліндричний об'єм  $dV = dSdl$  (вісь циліндра співпадає з напрямом струму), опір якого  $R = \rho \frac{dl}{dS}$ . За законом Джоуля-Ленца, за час  $dt$  в цьому об'ємі виділиться кількість теплоти

$$\begin{aligned} dQ &= I^2 R dt = (jdS)^2 \rho \frac{dl}{dS} dt \\ &= \rho j^2 dl dS dt = \rho j^2 dV dt \end{aligned}$$

# Закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі

$$dQ = \rho j^2 dV dt$$

\* Кількість теплоти, що виділяється за одиницю часу в одиниці об'єму, називається *питомою тепловою потужністю струму*:

$$w = \frac{dQ}{dV dt} = \rho j^2$$

З  $j = \gamma E$  (диф. форми з-ну Ома) випливає, що

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

тоді

$$w = \rho j^2 = jE = \gamma E^2$$

# Правила Кірхгофа для розгалужених кіл

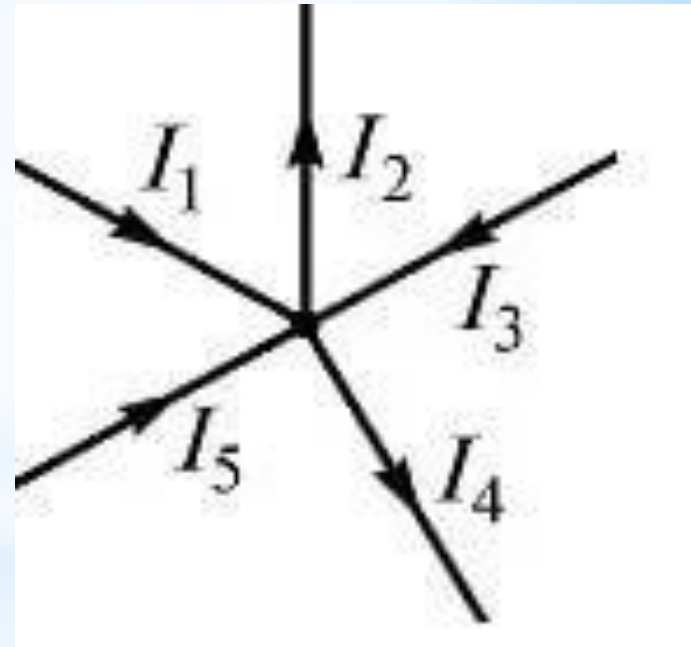
**Вузол електричного кола** - це будь-яка точка кола, в якій сходяться не менше трьох провідників із струмом.

**Перше правило Кірхгофа:**

Алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю.

Струм, що входить у вузол, вважається додатним, а що виходить з вузла - від'ємним.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

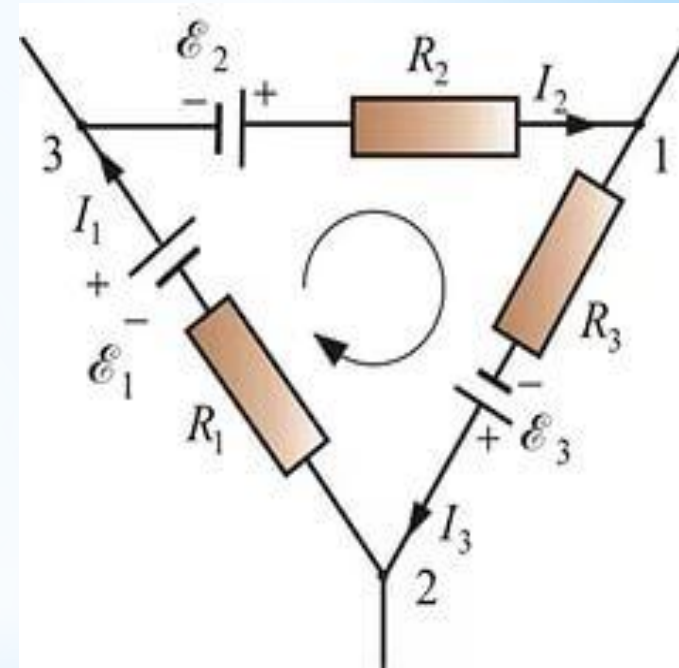


$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0$$

# Правила Кірхгофа для розгалужених кіл

## Друге правило Кірхгофа:

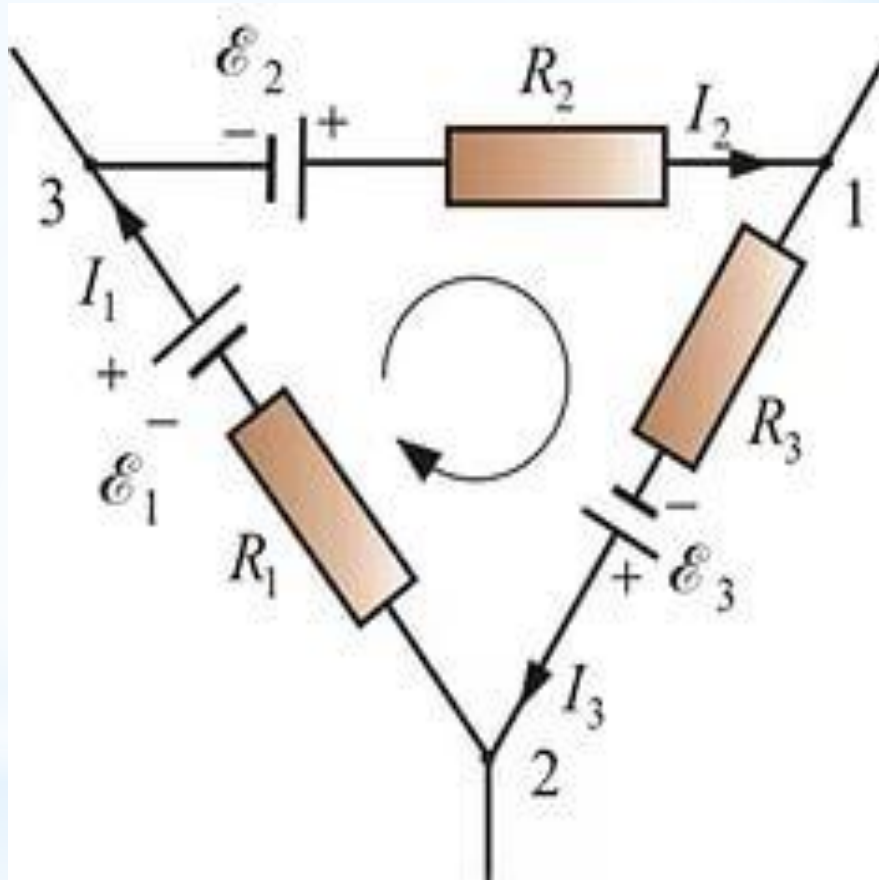
В будь-якому замкненому контурі, довільно вибраному в розгалуженому електричному колі, алгебраїчна сума спадів напруг (добутків сил струмів  $I_i$  на опір  $R_i$  відповідних ділянок цього контуру) дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що містяться в цьому контурі:



$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^k \mathcal{E}_k$$

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^k \mathcal{E}_k$$

Правила Кірхгофа для  
розгалужених кіл



$$*I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$$

# Порядок розрахунку кіл за правилами Кірхгофа

\*. Вибрати *довільний* напрям струмів на всіх ділянках кола. Записати (  $n - 1$  ) рівняння за *першим правилом* ( $n$  - кількість вузлів).

Дійсний напрям струмів визначається під час розв'язання задачі: якщо шуканий струм має додатне значення, то його напрям був вибраний правильно, від'ємне - його істинний напрям протилежний до вибраного.

# Порядок розрахунку кіл за правилами Кірхгофа

2. Вибрати напрям обходу контуру і строго його дотримуватись.

Спад напруги  $IR$  вважається додатним, якщо напрям струму на даній ділянці співпадає з напрямом обходу. ЕРС, які діють вздовж вибраного напрямку обходу (напрямок від «-» до «+»), вважаються додатними, проти - від'ємними.



# Порядок розрахунку кіл за правилами Кірхгофа

3. Скласти таку кількість рівнянь, щоб їх число дорівнювало числу шуканих величин (в систему рівнянь повинні входити всі опори і ЕРС даного кола).

Кожний вибраний контур повинен містити хоча б один елемент, який відсутній в попередніх контурах (інакше вийдуть рівняння, що є рівносильними до вже складених).