

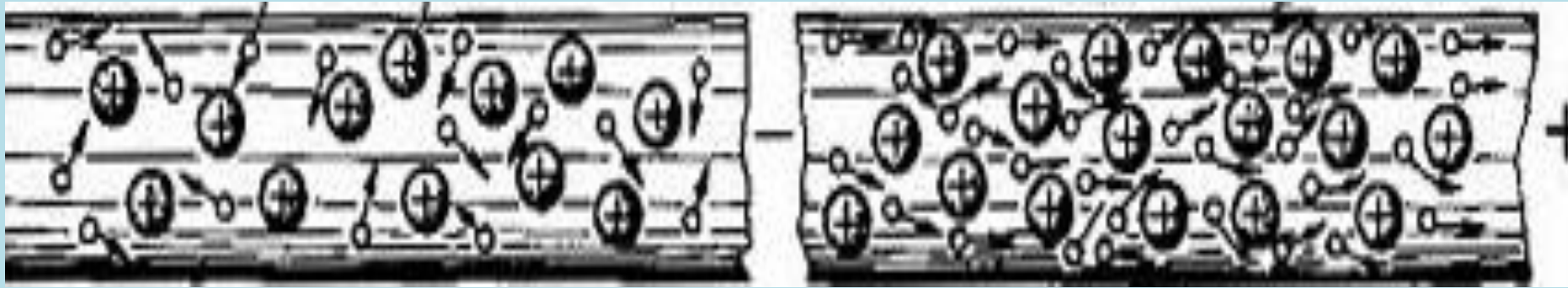
# Лекція № 11

## Постійний електричний струм

1. Постійний електричний струм, умови його існування
2. Сила та густина струму
3. ЕРС джерела струму. Опір провідників
4. Закони Ома
5. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа

# 1. Постійний електричний струм, умови його існування.

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

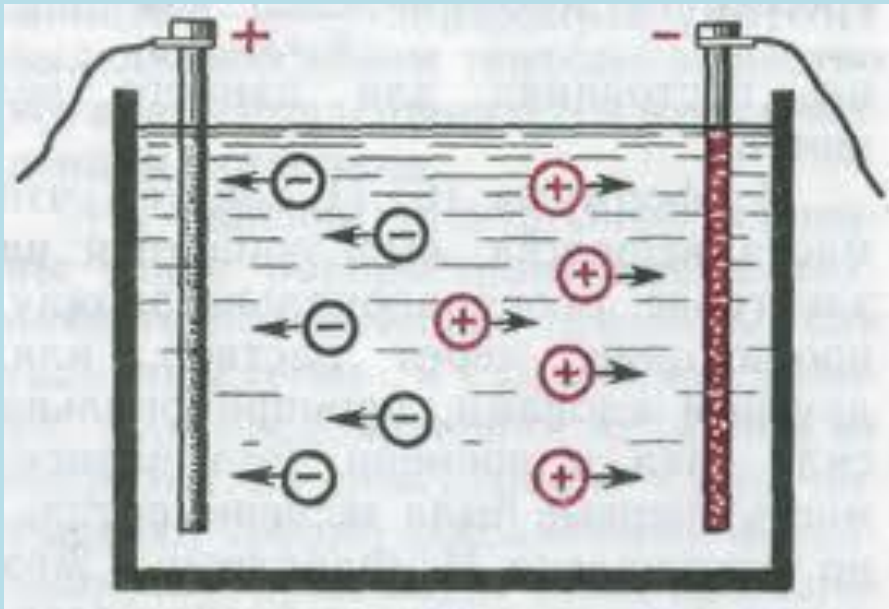


У даному розділі розглядатимемо струми провідності.

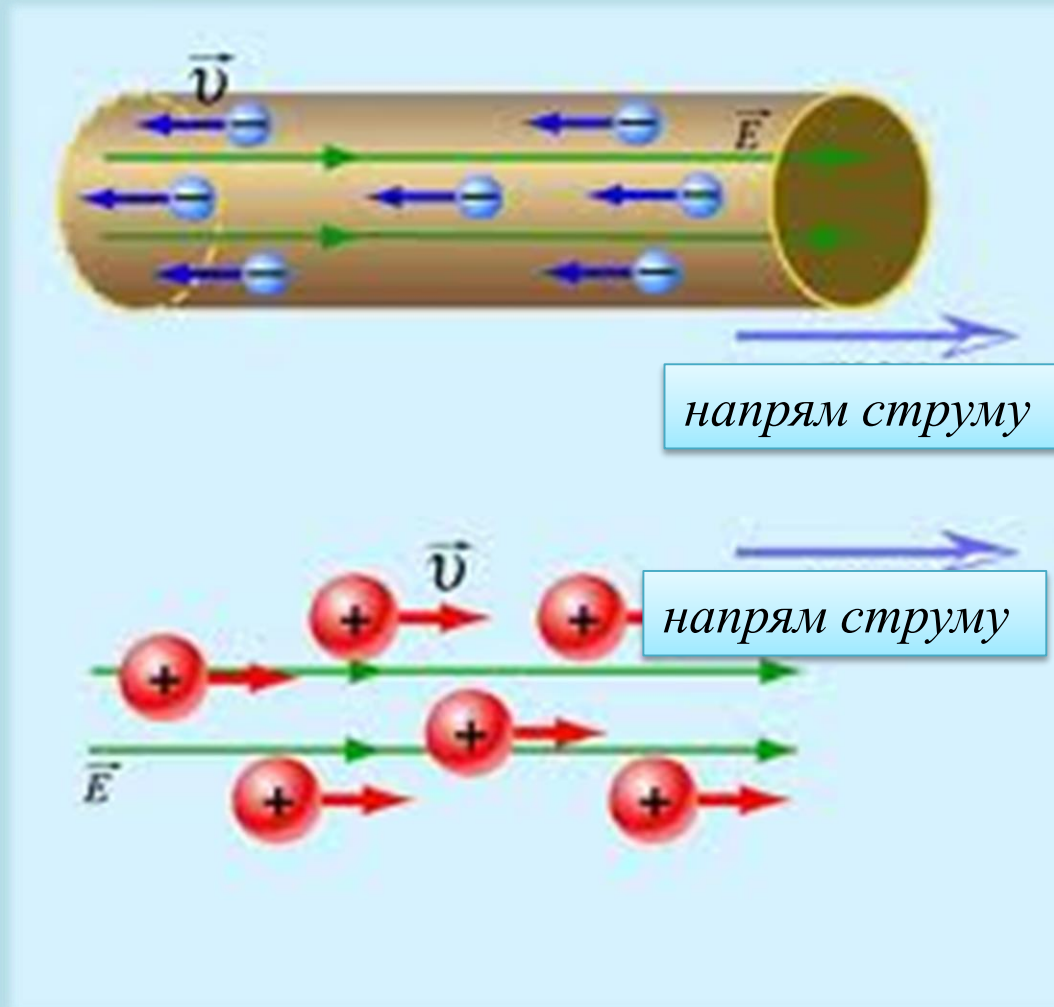
*Струмом провідності* називають направлений рух вільних носіїв заряду у провідному середовищі.



Струми, які створюються при русі заряджених тіл називають *конвекційними*, а короточасні електричні струми, що виникають у діелектричних середовищах внаслідок зміщення зв'язаних зарядів під дією зовнішнього електричного поля — *струмами поляризації*.

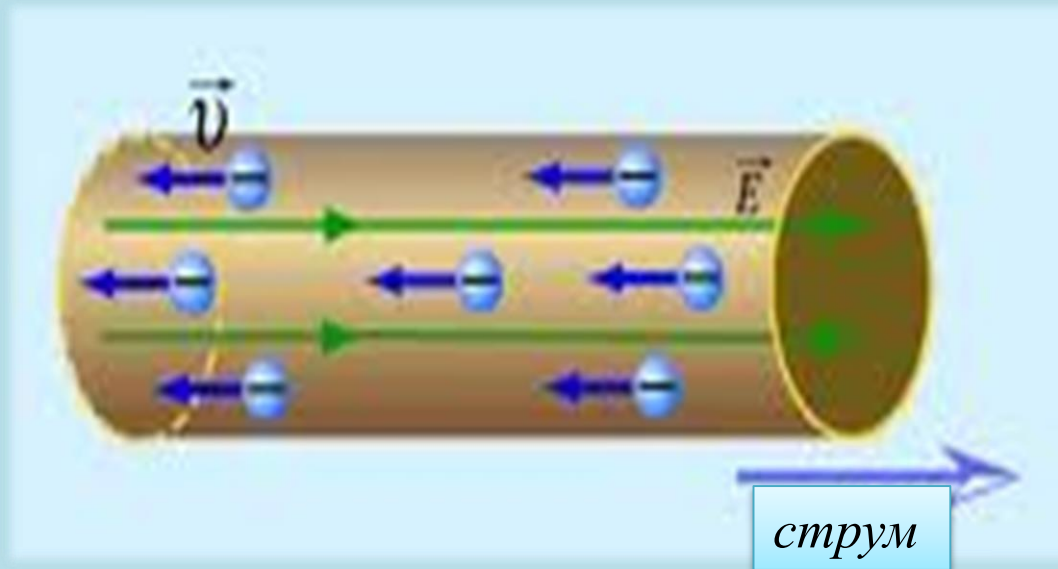


За напрям струму прийнято напрям руху *позитивних зарядів*. У металах напрям струму є *протилежним* до напрямку направленої руху електронів.



Основними умовами виникнення струму у провіднику є:

- наявність вільних носіїв заряду,
- створення і підтримання у провіднику електричного поля.



## 2. Сила та густина струму

Кількісною мірою електричного струму є сила струму і його густина.

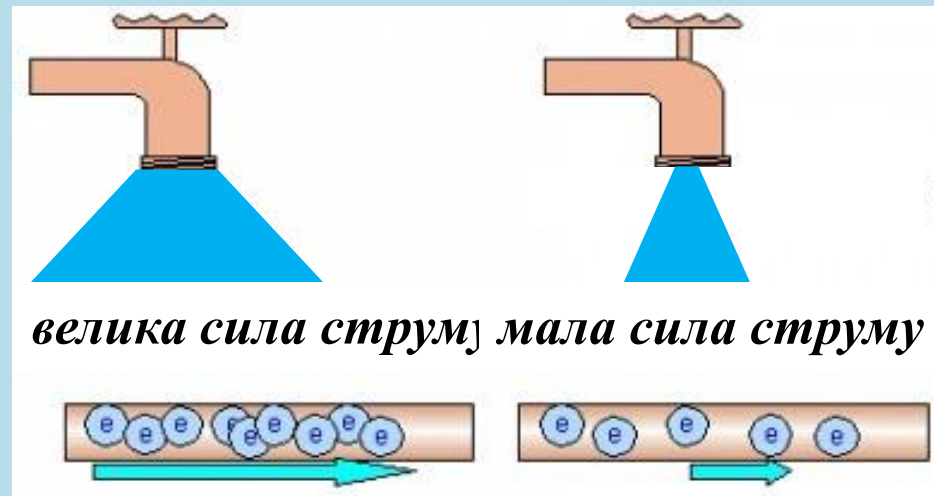
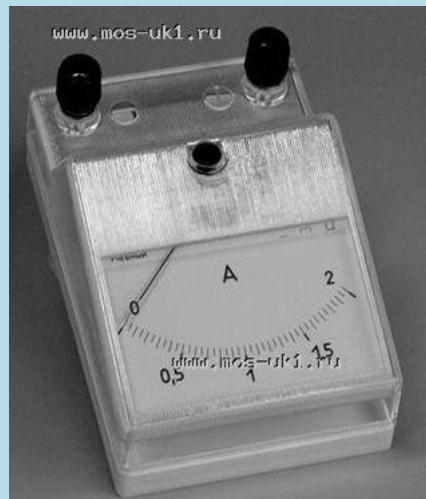
**Сила струму** – скалярна фізична величина, чисельно рівна електричному заряду, що переноситься через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

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

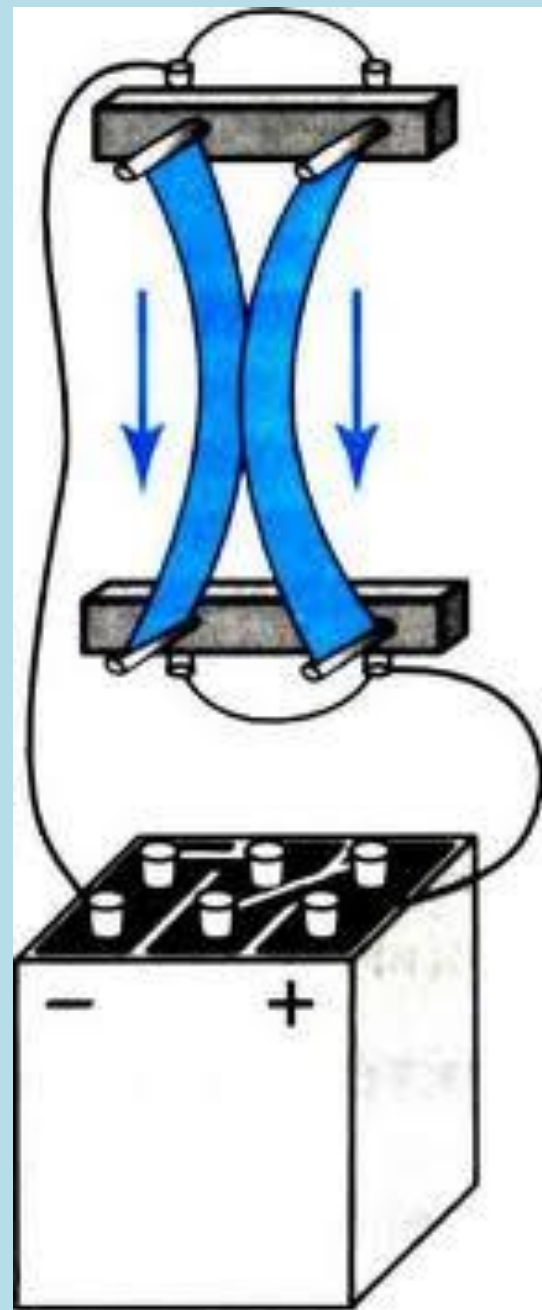
Сила струму вимірюється в  $A$  (амперах).



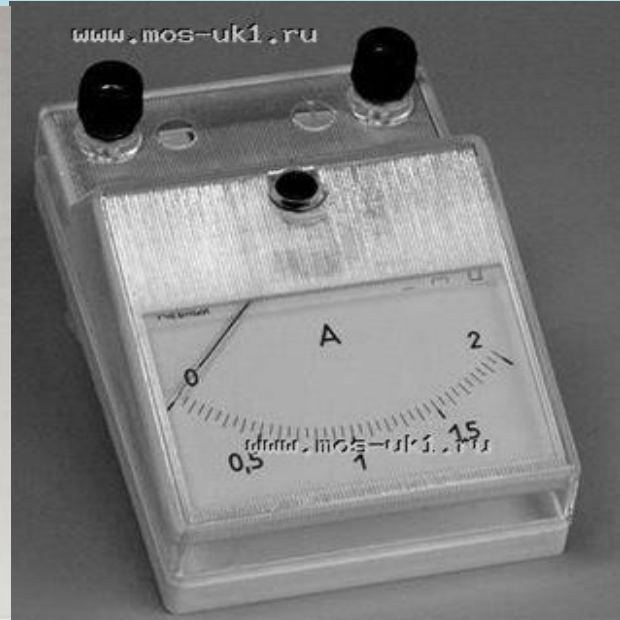
*Андре Марі  
Ампер*



*1 Ампер – це* така сила незмінного електричного струму, який тече по двох нескінченно довгих провідниках малого перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричиняє взаємодію між ними силою  $2 \cdot 10^{-7}$  Н/м.



В СІ ампер (1  $A$ ) разом з кілограмом (1  $кг$ ), метром (1  $м$ ) і секундою (1  $с$ ) становить базу основних одиниць фізичних величин системи.



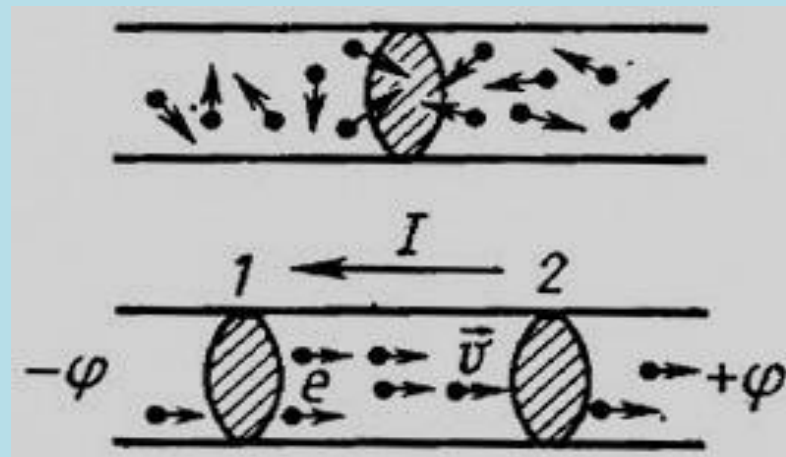
**Густина струму** – векторна фізична величина, чисельно рівна електричному заряду, який переноситься через перпендикулярний до напрямку руху носіїв переріз одиничної площі провідника за одиницю часу:

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n} = \frac{d^2q}{dt \cdot dS} \vec{n}$$

або ж:

$$\begin{aligned} \vec{j} &= \frac{d^2q}{dt \cdot dS} \vec{n} = \frac{e \cdot dN}{dt \cdot dS} \vec{n} = \frac{e \cdot n_0 \cdot dV}{dt \cdot dS} \vec{n} = \\ &= \frac{e \cdot n_0 \cdot v_{др} \cdot dt \cdot dS}{dt \cdot dS} \vec{n} = en_0 v_{др} \vec{n} \end{aligned}$$

$$\vec{j} = en_0 v_{др} \vec{n}$$



де,  $dS$  – площа перерізу провідника;

$n_0$  – концентрація носіїв електричного заряду;

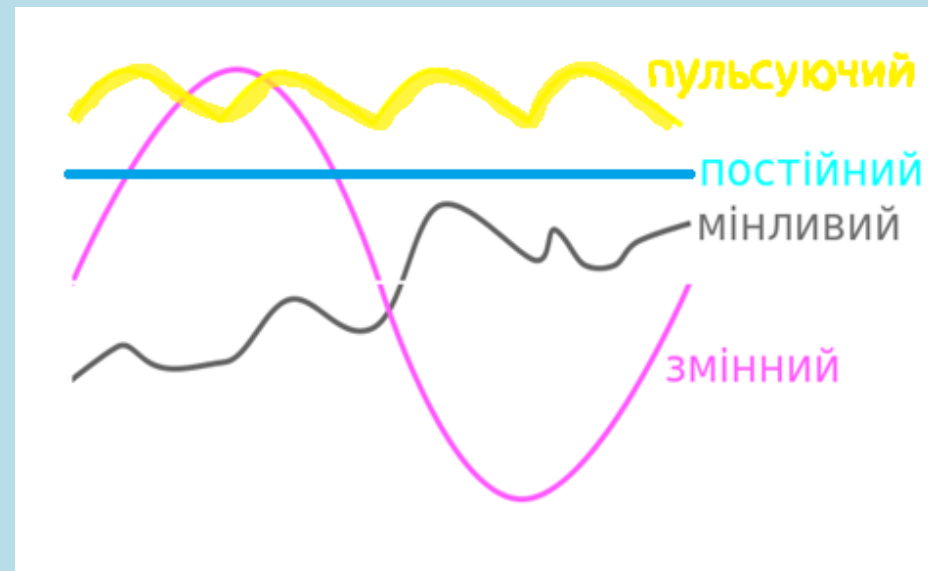
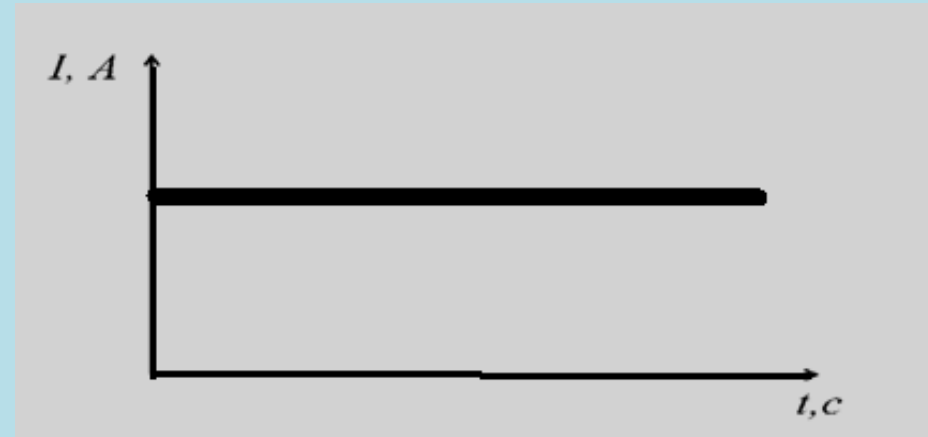
$v_{др}$  – дрейфова (спричинена електричним полем) швидкість носіїв електричного заряду;

$\vec{n}$  – одиничний вектор нормалі до поверхні перерізу провідника.

Густина струму вимірюється в амперах на метр квадратний ( $A/m^2$ ).

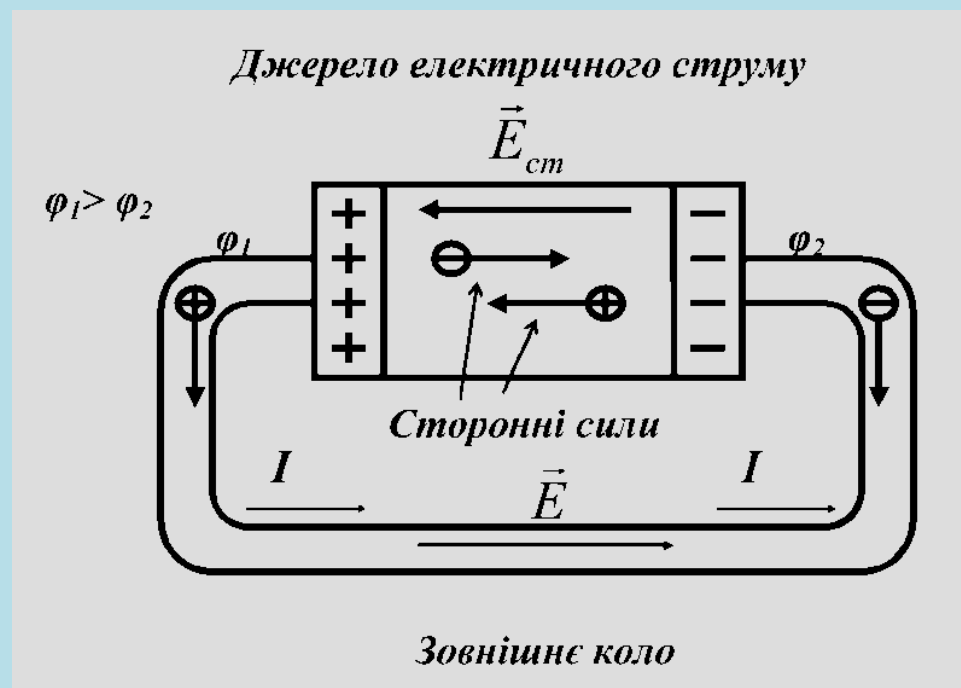
Постійним електричним струмом називають такий струм, значення і напрям якого не змінюються з часом, тобто  $\vec{j} = const$

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

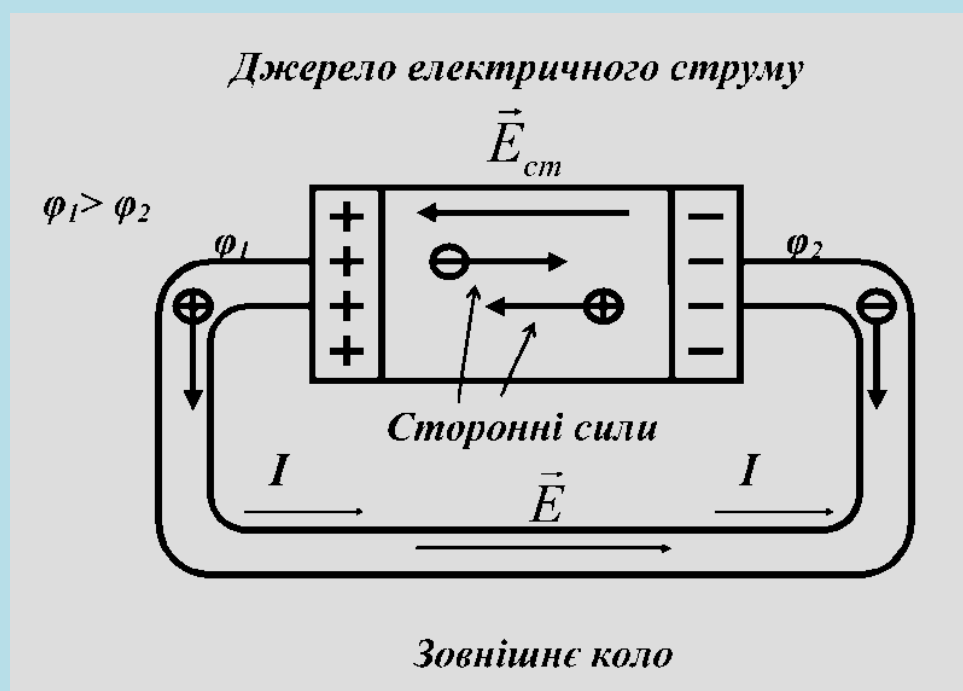


### 3. ЕРС джерела струму. Опір провідників

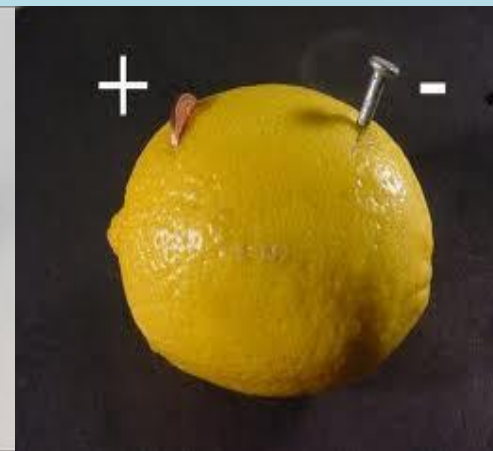
Переміщення позитивних і негативних зарядів у зовнішній частині електричного кола відбувається за рахунок кулонівських сил поля у напрямі їх компенсації, тобто негативно заряджені частинки рухаються до позитивного полюсу джерела струму, а позитивні – до негативного.



Всередині джерела струму (внутрішній частині кола) негативні частинки необхідно перемістити від позитивного полюсу до негативного, а позитивні – від негативного до позитивного що здійснюється за рахунок сторонніх сил.



**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 різна у різних джерелах струму — механічна (генератори постійного струму), хімічна (гальванічні елементи), дифузія носіїв заряду в неоднорідному середовищі (термопара), освітлення поверхні деяких речовин короткохвильовим випромінюванням (сонячна батарея) тощо.

Таким чином, у колі постійного струму окрім електростатичного поля зовнішнього кола напруженістю  $\vec{E}_K$  існує електростатичне поле сторонніх сил напруженістю  $\vec{E}_{cm}$  всередині джерела струму.

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

$$\vec{E}_{cm} = \frac{\vec{F}_{cm}}{q_0}$$

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

$$\vec{F} = \vec{F}_K + \vec{F}_{cm} = q_0 \left( \vec{E}_K + \vec{E}_{cm} \right) = q_0 \vec{E}$$

Якщо напруженість результуючого поля у провіднику буде дорівнювати нулю, настане рівновага, тобто направлений рух зарядів буде відсутнім і струм дорівнюватиме нулю.

Сторонні сили характеризують роботою, яку вони виконують при переміщенні зарядів по колу або на ділянці кола. *Електрорушійною силою (ЕРС) джерела струму  $\mathcal{E}$  називають* скалярну фізичну величину, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиничного позитивного заряду по колу:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q_0}$$

,де

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

Значення ЕРС, що діє у замкненому колі:

$$\mathcal{E} = \frac{q_0 \oint_L (\vec{E}_{cm} \cdot d\vec{l})}{q_0} = \oint_L (\vec{E}_{cm} \cdot d\vec{l})$$

*тобто дорівнює* циркуляції вектора напруженості сторонніх сил по замкненому колу  $L$ . На ділянці кола між довільними точками 1 і 2 ЕРС:

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 (\vec{E}_{cm} \cdot d\vec{l})$$

*Напругою (спадом напруги)  $U$  на ділянці кола 1–2 називають* скалярну фізичну величину, чисельно рівну роботі, яку виконують кулонівські і сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду із точки 1 у точку 2:

$$U = \frac{A_{cm12} + A_{K12}}{q_0} = \varepsilon_{12} + \varphi_1 - \varphi_2 ,$$

де

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{K12}}{q_0} - \text{різниця потенціалів}$$

Отримана формула зв'язує поняття напруги, ЕРС та різниці потенціалів для неоднорідної ділянки кола

*Неоднорідною ділянкою кола називають таку ділянку кола, яка містить джерело струму.*

*Електричний опір провідника – це скалярна фізична величина, яка є властивістю провідника щодо перешкодження 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 решітки або неоднорідностей її структури (домішки, дефекти).

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



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

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ (для провідника циліндричної форми)}$$

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

де,  $\rho$  – питомий опір матеріалу, з якого виготовлений провідник, вимірюється в Ом·м,

$l$  – довжина провідника,

$S$  – площа поперечного перерізу провідника,

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору, величина стала для даного матеріалу.

Матеріали з низьким питомим опором широко використовуються в електротехніці, оскільки є гарними провідниками електричного струму – срібло ( $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), мідь ( $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), алюміній ( $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ).

Через економічні чинники срібло використовується лише при виготовленні дорогокоштовних та високоточних приладів.

У радянські часи при будівництві промислових і житлових будівель в основному використовували алюмінієву проводку.

В останні десятиліття через значне збільшення енергоспоживання побутовою, аудіо-, відео- і комп'ютерною технікою у житлових приміщеннях, вентиляційно-кліматичними, охоронними, автоматизовано управлінськими, ліфто- підйомними системами у промислових будівлях фінансово обґрунтованим стало використання мідної проводки з точки зору зменшення енерговитрат та збільшення енергопропускних спроможностей за сталих перерізів провідників.

Величину, обернено пропорційну питомому опору  $\rho$ :

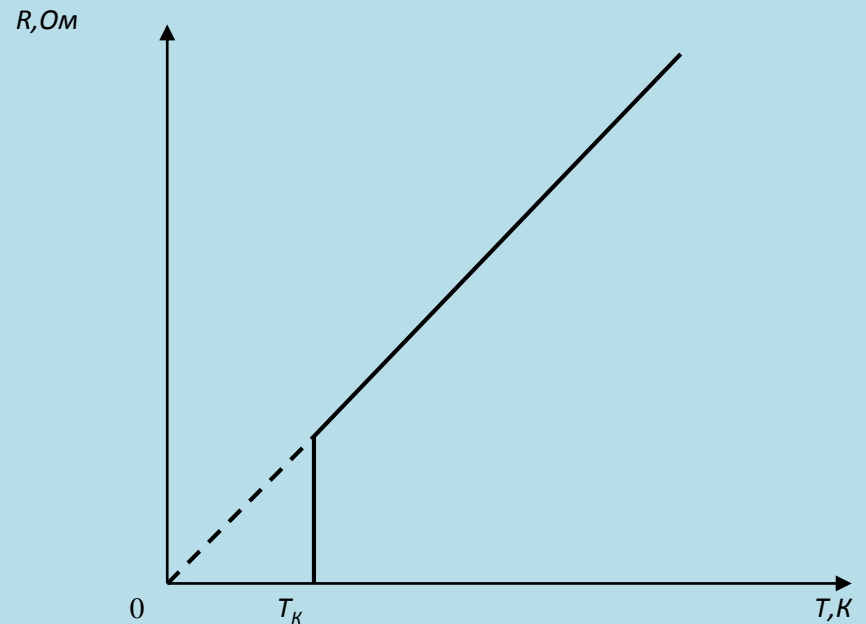
$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

називають питомою електричною провідністю матеріалу, вимірюється вона у сименсах на метр ( $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м} = \text{См/м}$ ).

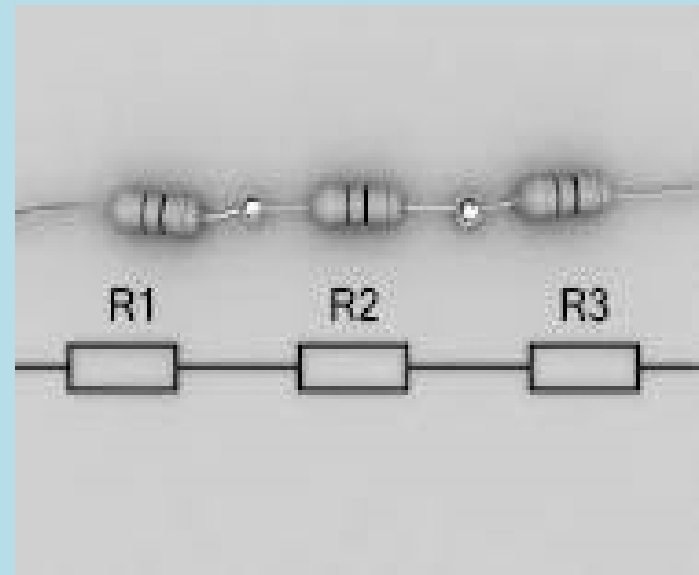
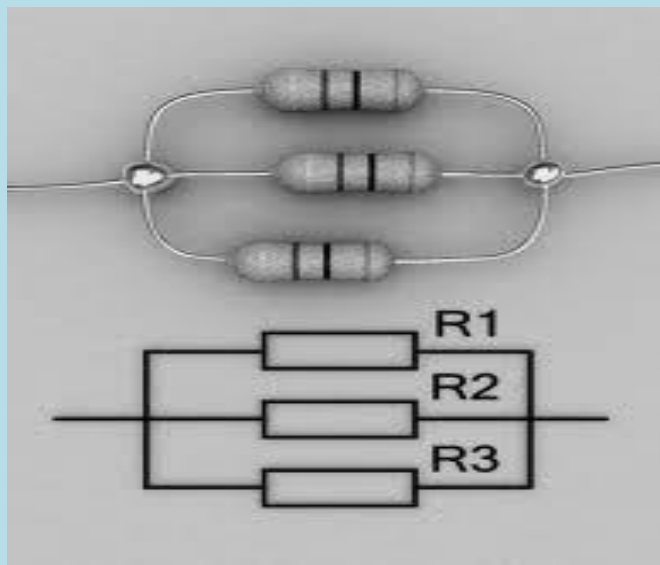
З підвищенням температури збільшуються амплітуда і частота коливань вузлів кристалічної решітки провідника (основної фізичної причини опору), це веде до збільшення ймовірності зіткнень носіїв заряду з вузлами, чим й пояснюється зростання опору провідника:



При дуже низьких температурах (  $T \leq T_K$  – критична температура) спостерігається явище повного зникнення опору – явище надпровідності, виявлене вперше Г. Камерлінг-Оннесом для ртуті у 1911 р. Пояснення механізму виникнення явища надпровідності дає квантова фізика.



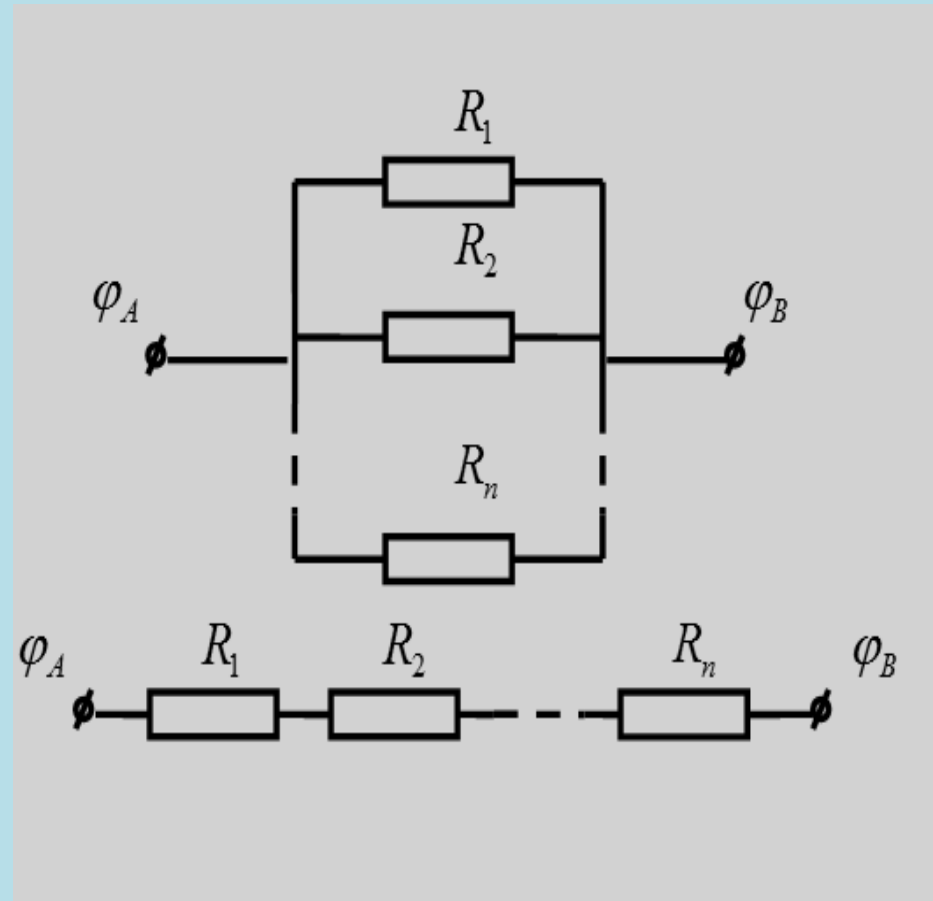
На залежності електричного опору металів від температури базується Дія *термометрів опору*, які дозволяють вимірювати температуру з точністю до тисячних часток кельвіна. Використання у якості робочої речовини термометрів опору напівпровідників, виготовлених за спеціальною технологією, – *термісторів* – дозволяє фіксувати зміни температури у мільйонні частки кельвін.



Опір системи паралельно або послідовно з'єднаних провідників визначається за формулами:

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

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



## 4. Закони Ома.

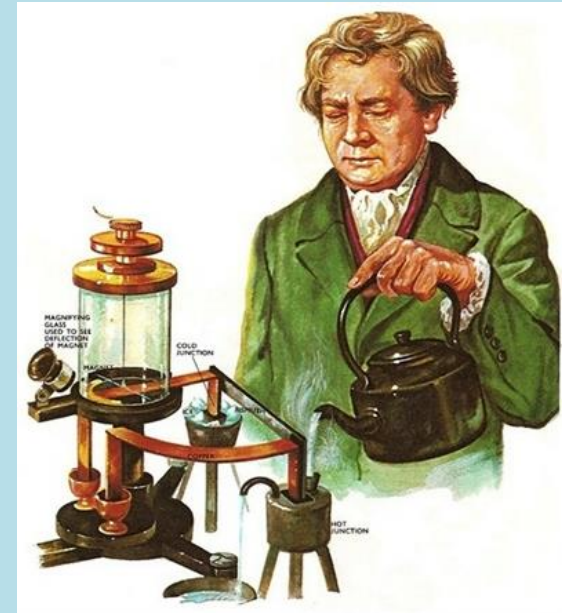
*Закони Ома* – закони, що дозволяють визначати силу струму в нерозгалужених колах або на їх ділянках.

Названі закони на честь німецького фізика Г. Ома, який експериментально встановив залежність сили струму в однорідному провіднику від напруги на кінцях цього провідника.

Розглянемо закони Ома для різних частин електричного кола.



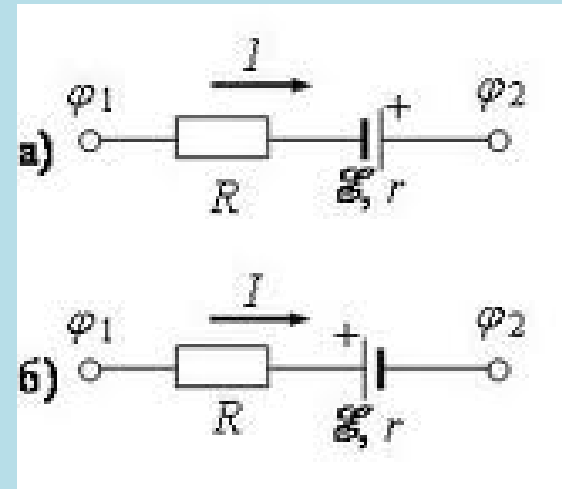
Закон Ома для неоднорідної ділянки кола, тобто ділянки, яка містить джерело струму – сила струму на неоднорідній ділянці кола прямо пропорційна спаду напруги на неоднорідній ділянці кола і обернено пропорційна сумарному опору цієї ділянки:



або

$$I = \frac{U}{R+r} = \frac{q_0}{R+r} = \frac{\pm \varepsilon + \varphi_1 - \varphi_2}{R+r}$$

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



$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \mathcal{E}}{R + r}$$

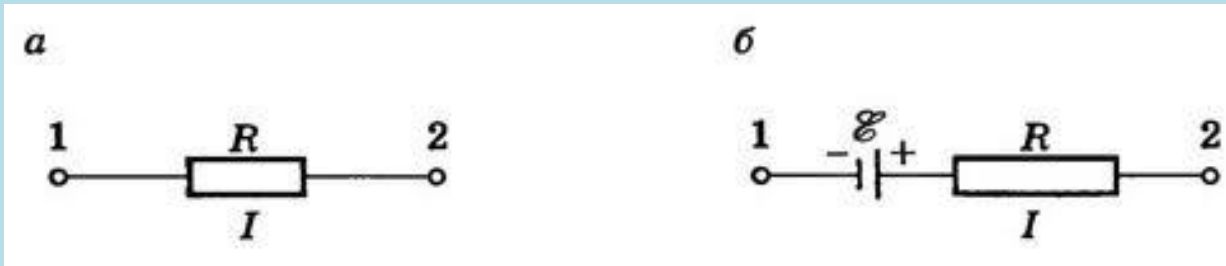
де  $\varphi_1 - \varphi_2$  – різниця потенціалів на кінцях ділянки кола;  
 $\mathcal{E}$  – електрорушійна сила джерела струму (знак ЕРС залежить від знаку роботи, яку виконують сторонні сили).

Якщо ЕРС сприяє руху позитивно заряджених частинок в обраному напрямку 1–2, то  $\mathcal{E} > 0$  ; якщо ЕРС перешкоджає руху позитивно заряджених частинок у даному напрямку, то  $\mathcal{E} < 0$ );

$r$  – внутрішній опір, тобто опір джерела струму;

$R$  – зовнішній опір, тобто опір всіх інших елементів ділянки кола.

Закон Ома для однорідної ділянки кола, тобто ділянки, яка не містить джерела струму, ( $\mathcal{E} = 0$ ,  $r = 0$ ):



$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R} \text{ в інтегральній формі}$$

оскільки

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{US}{\rho l}, \quad \frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l}, \text{ то}$$

$\underbrace{S}_{=j} \quad \underbrace{\rho}_{=\sigma} \quad \underbrace{l}_E$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \text{ у диференціальній формі}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

де  $\varphi_1 - \varphi_2$  – напруга на кінцях ділянки кола,

$j$  – густина струму,

$\sigma$  – питома електропровідність провідника,

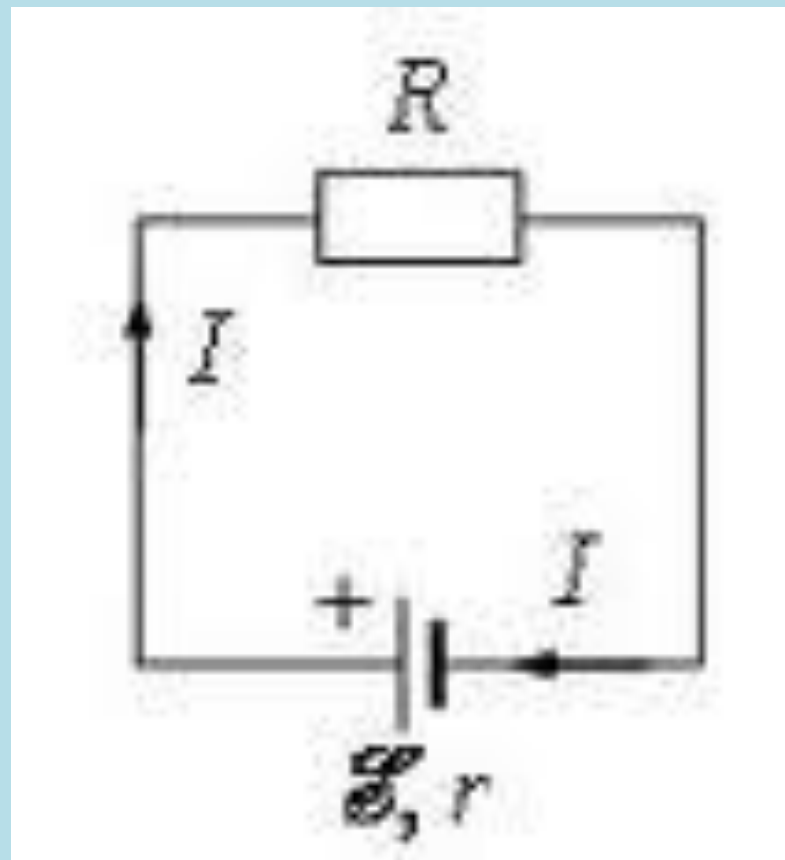
$E$  – напруженість електричного поля;

У такій формі закон Ома застосовний для кожної точки кола.

*Закон Ома замкнутого (повного) кола  $\varphi_1 = \varphi_2$*

*тобто  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$*

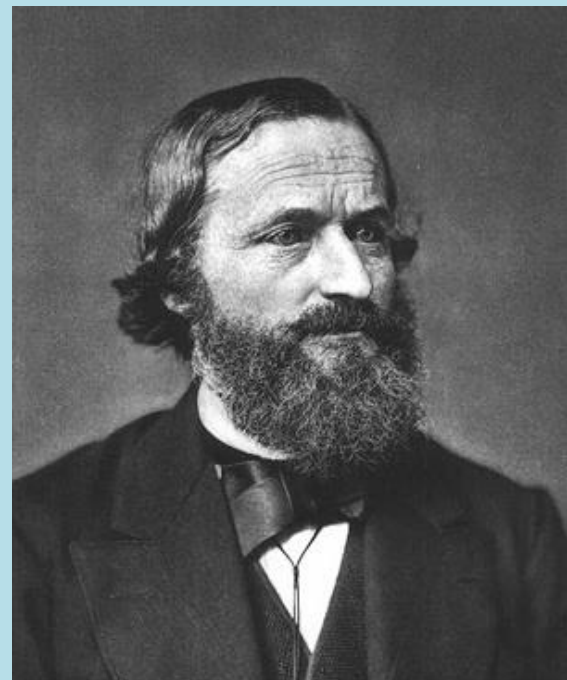
$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$



## 5. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа.

*Правила Кірхгофа* – закони, що дозволяють визначати силу струму, опір або ЕРС джерела струму на окремих ділянках розгалужених електричних кіл.

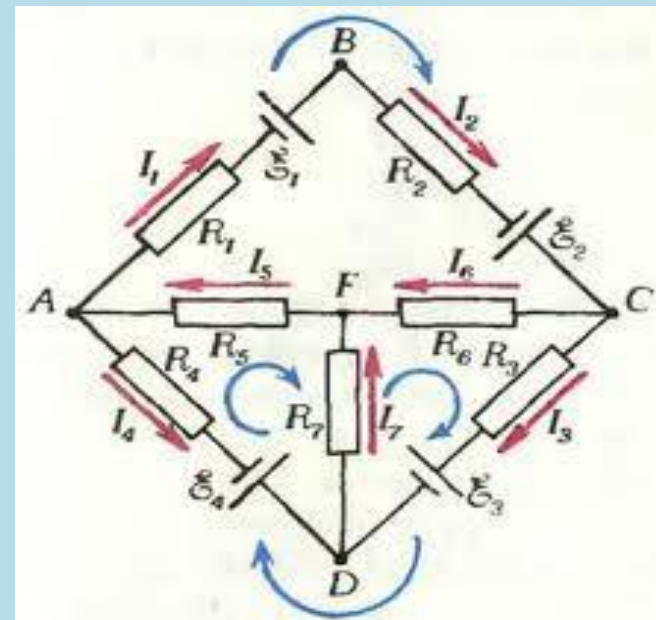
Під електричним колом розуміють систему, яка складається із джерел струму (електрорушійною силою  $\mathcal{E}$ , опором  $r$ ) і споживачів електричної енергії (опором  $R$ ), з'єднаних між собою провідниками.



*Гюстав Кірхгоф*

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

Точки, в яких сходяться три або більше провідників зі струмами, називають *вузлами*.



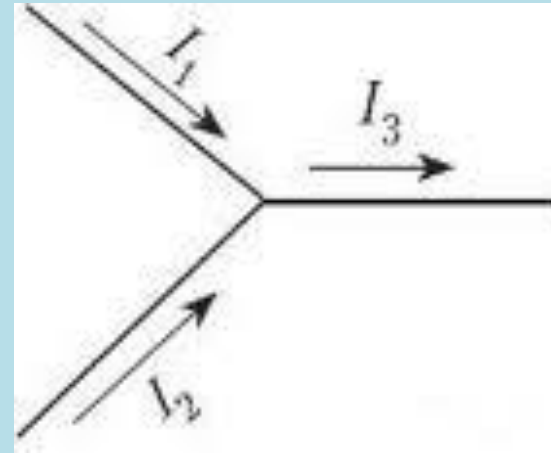
*Ділянкою розгалуженого кола* називають частину контуру між двома вузлами, яка містить джерела струму, резистори або інші елементи кола. По різних ділянках одного контуру проходять різні струми.

*Перше правило Кірхгофа* виражає закон збереження заряду і 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.

*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.



*Друге правило Кірхгофа* є узагальненням закону

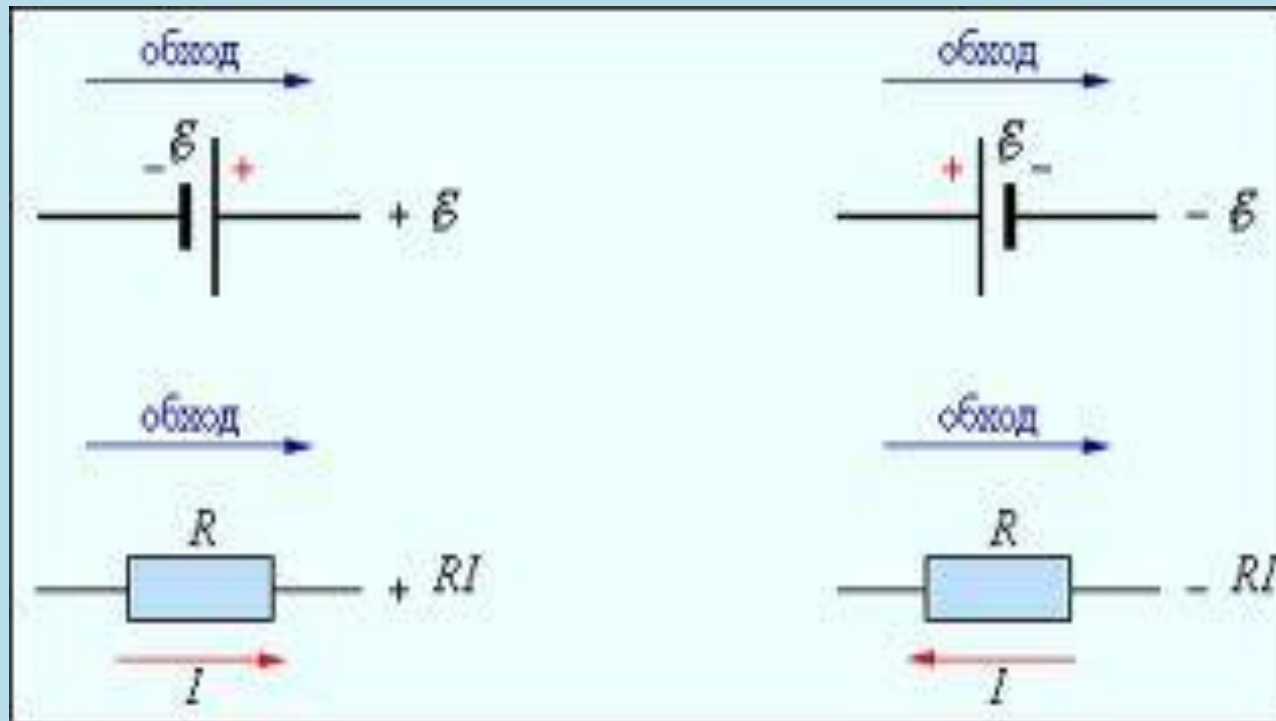
Ома для довільного контуру розгалуженого електричного кола: у контурі алгебраїчна сума спадів напруг (добутків сил струмів на опори провідних ділянок) дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, які діють у цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^m I_k r_k = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k$$

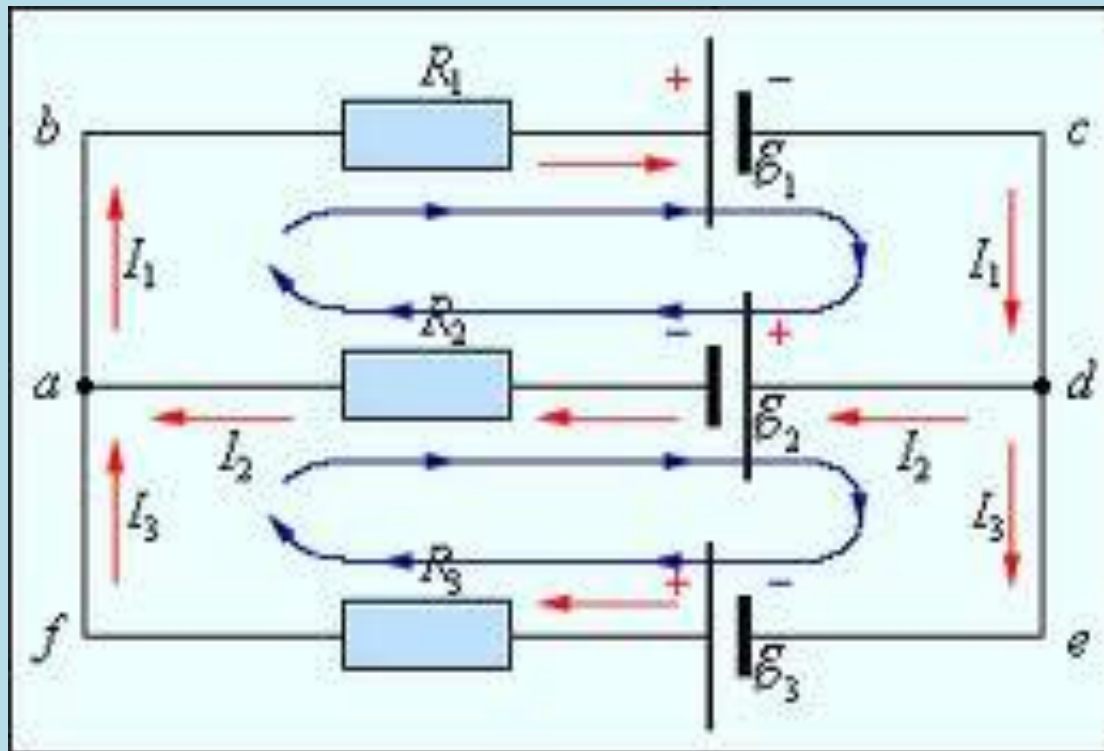
де ,  $n$  – кількість ділянок у контурі,

$m$  – кількість ЕРС, що діють у контурі.

**Правила знаків: 1)** при обході контуру за довільно обраним напрямком доданки спадів напруг  $\sum_{k=1}^n I_k R_k$  і  $\sum_{k=1}^m I_k r_k$  беруться зі знаком “+”, якщо напрямок обходу контуру співпадає з напрямком струму і зі знаком “-”, якщо напрямок обходу контуру протилежний до напрямку струму;



2) Доданки  $\sum_{k=1}^m \varepsilon_k$  беруться зі знаком “+”, якщо при обході контуру за довільно обраним напрямком джерело струму проходимо від негативного полюсу до позитивного і зі знаком “-”, якщо джерело проходимо від позитивного полюсу до негативного.



При розв'язуванні задач, в яких розглядають розгалужені кола, варто дотримуватись певної послідовності дій:

1. На усіх ділянках схеми розгалуженого кола довільно позначити стрілками напрями струмів;
2. Записати за першим правилом Кірхгофа  $n - 1$  рівняння, враховуючи правило знаків;
3. Довільно обрати напрям кожного простого контуру, наприклад, за рухом годинникової стрілки.
4. Записати за другим правилом Кірхгофа  $p - (n - 1)$  рівнянь, враховуючи правило знаків, де  $p$  — кількістю ділянок кола.

Обійти кожен контур необхідно двічі, перший раз – записуючи ліву частину рівняння з урахуванням правил знаків, а другий раз – праву частину рівняння.

5. Перевірити, щоб усі електрорушійні сили і опори входили в отриману систему рівнянь, а кількість рівнянь дорівнювала кількості різних струмів, які течуть у розгалуженому колі. Якщо внаслідок обчислення деякі струми будуть отримані зі знаком “–”, то це означає, що їх справжні напрями протилежні напрямам, позначеним на схемі.

# **Лекція № 11**

## **Постійний електричний струм**

- 1. Постійний електричний струм, умови його існування**
- 2. Сила та густина струму**
- 3. ЕРС джерела струму. Опір провідників**
- 4. Закони Ома**
- 5. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа**