

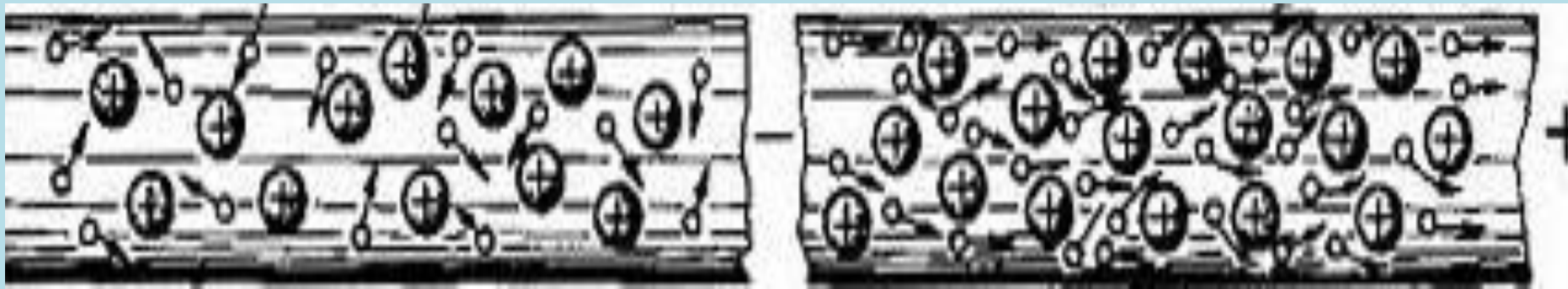
Лекція № 10.

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).

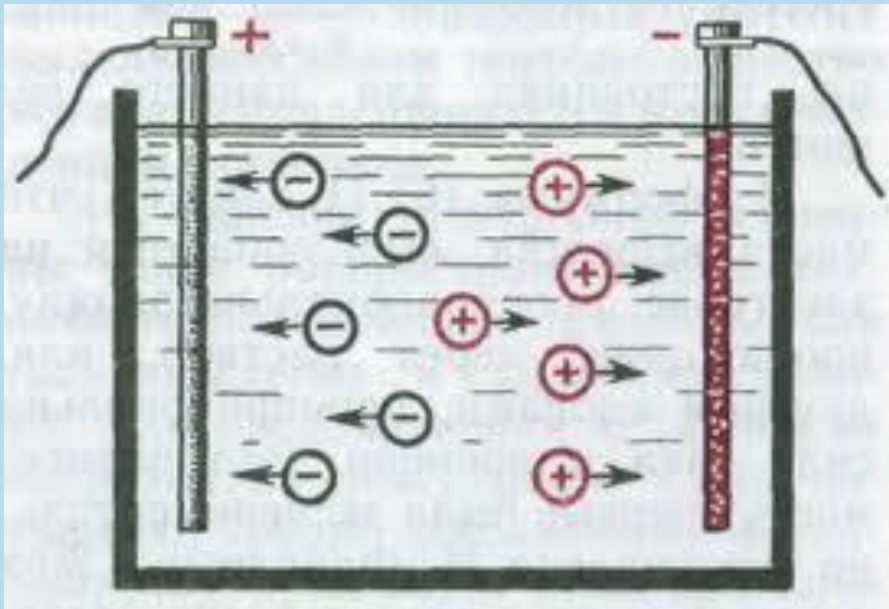


У даному розділі розглядатимемо струми провідності.

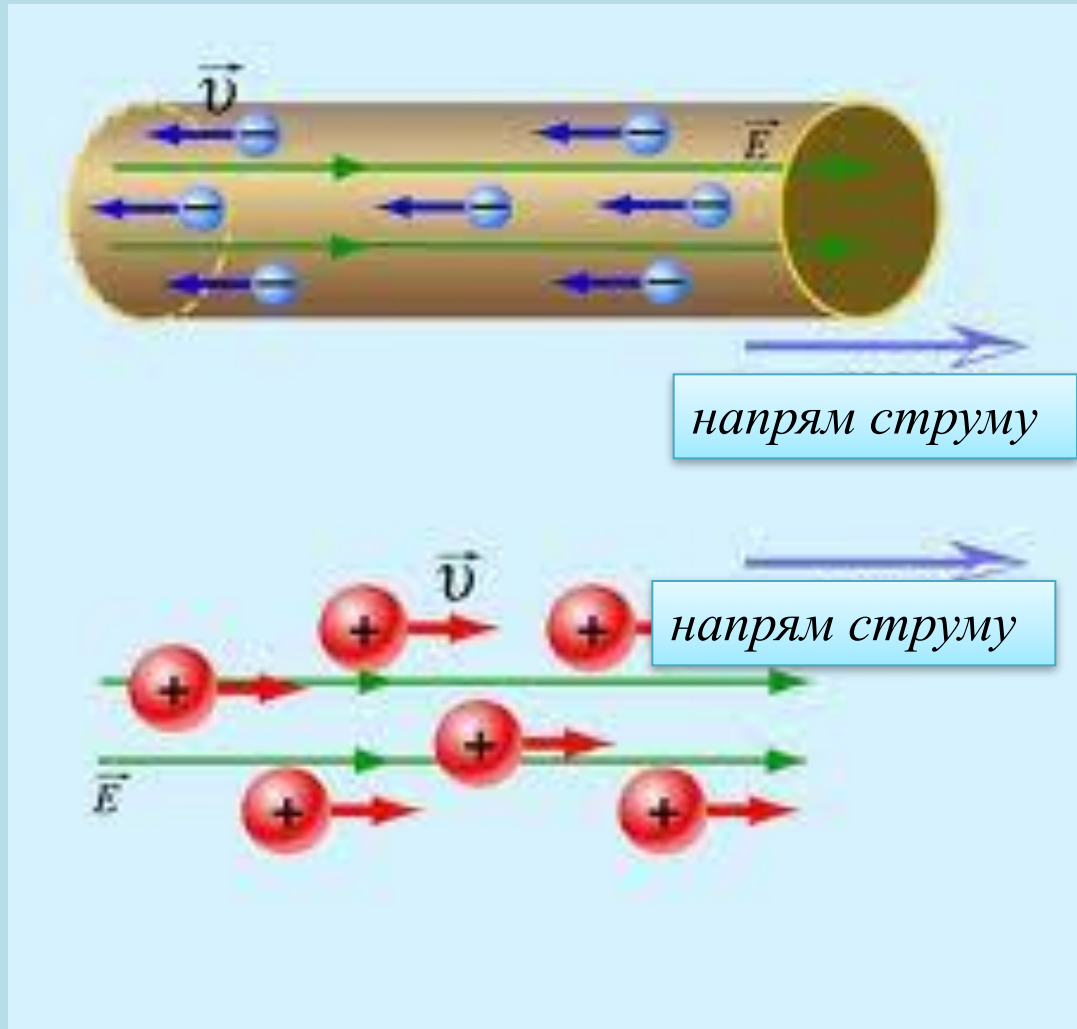
Струмом провідності називають направлений рух вільних носіїв заряду у провідному середовищі.



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*.

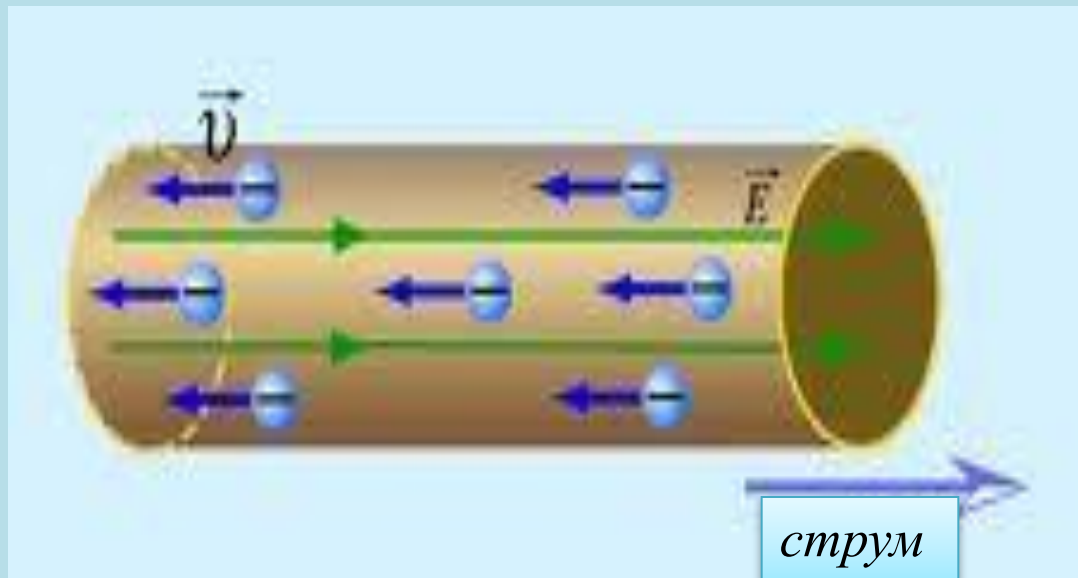


За напрям струму прийнято напрям руху *позитивних зарядів*. У металах напрям струму є *протилежним* до напрямку направленого руху електронів.



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.

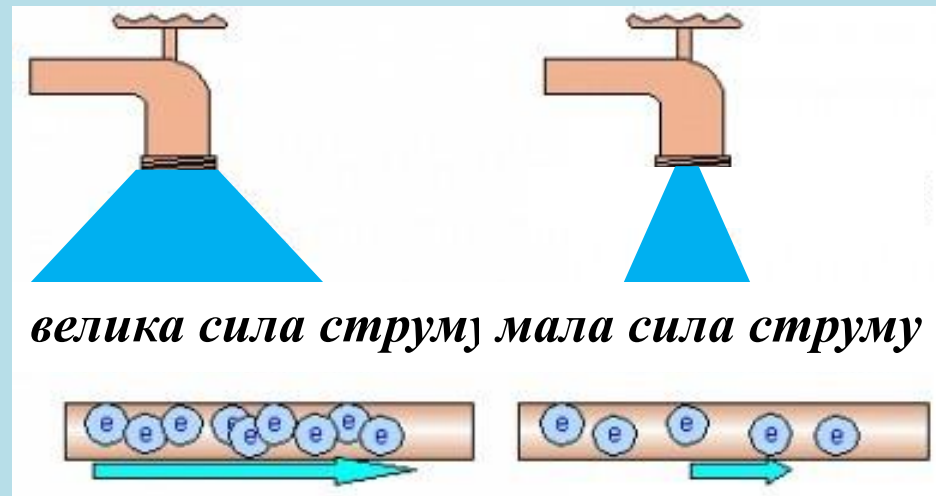
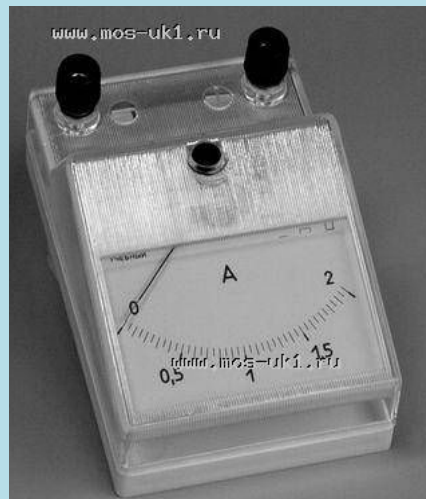
Сила струму – скалярна фізична величина, чисельно рівна електричному заряду, що переноситься через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

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

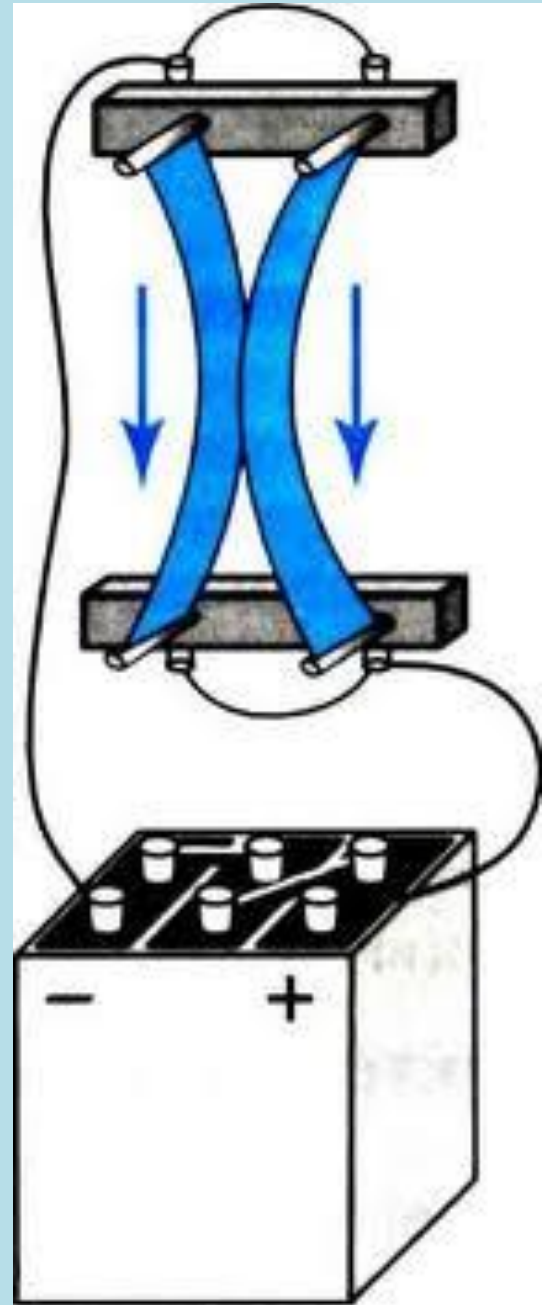
Сила струму вимірюється в A (амперах).



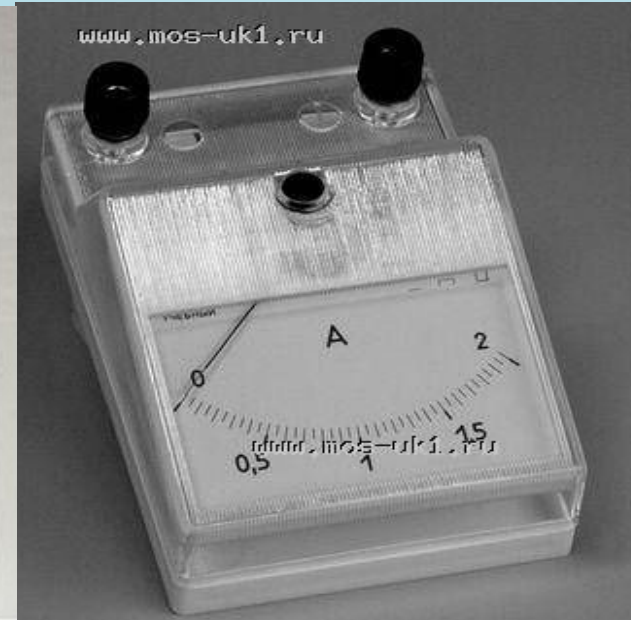
*Андре Марі
Ампер*



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.



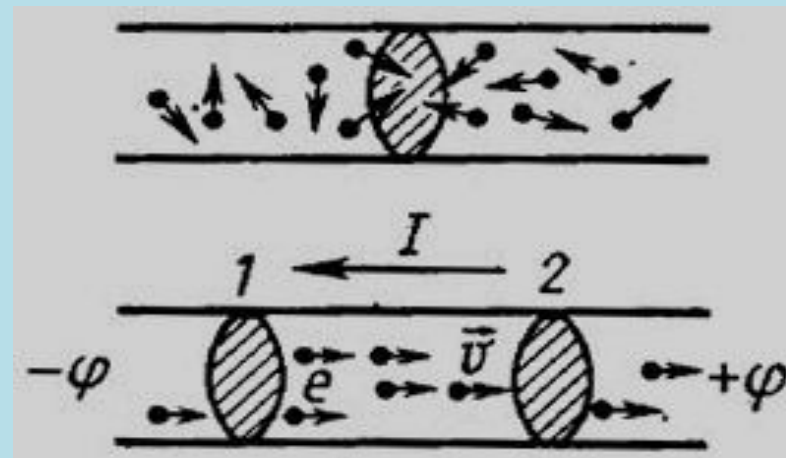
Густина струму – векторна фізична величина, чисельно рівна електричному заряду, який переноситься через перпендикулярний до напрямку руху носіїв переріз одиничної площі провідника за одиницю часу:

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

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;

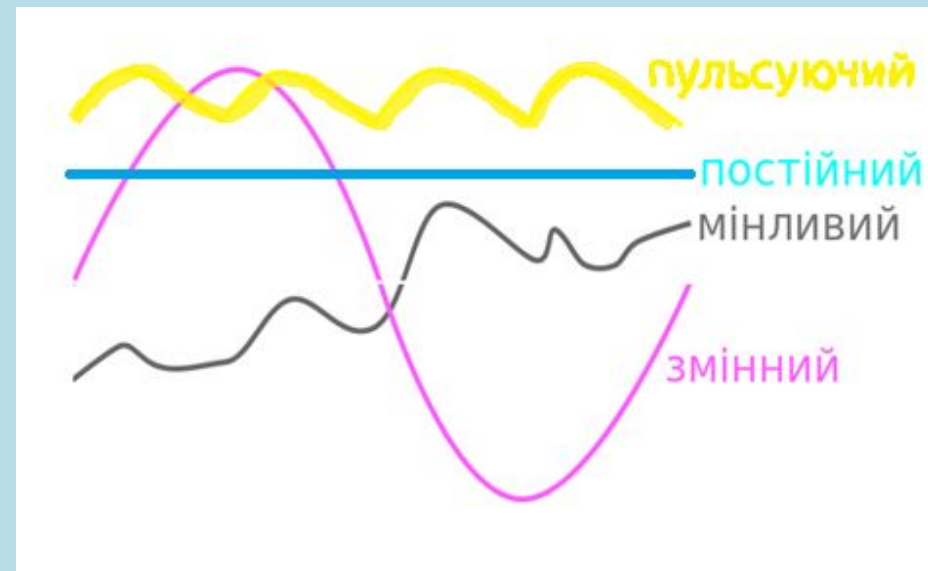
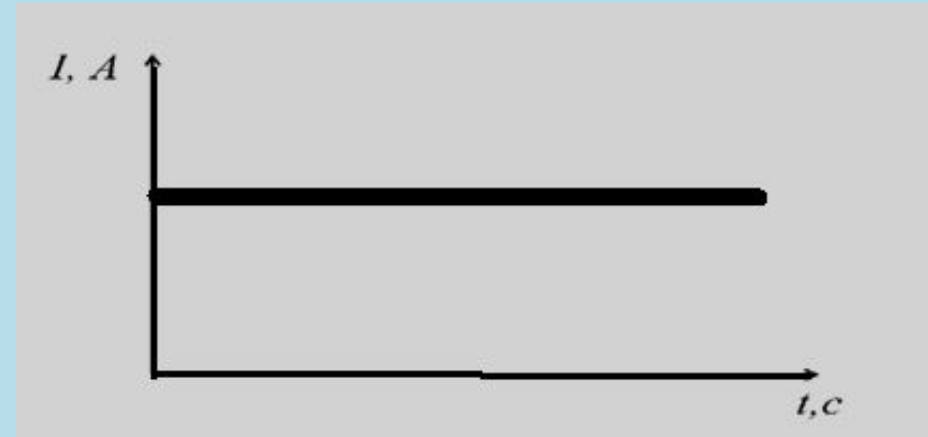
$v_{др}$ – дрейфова (спричинена електричним полем) швидкість носіїв електричного заряду;

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

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

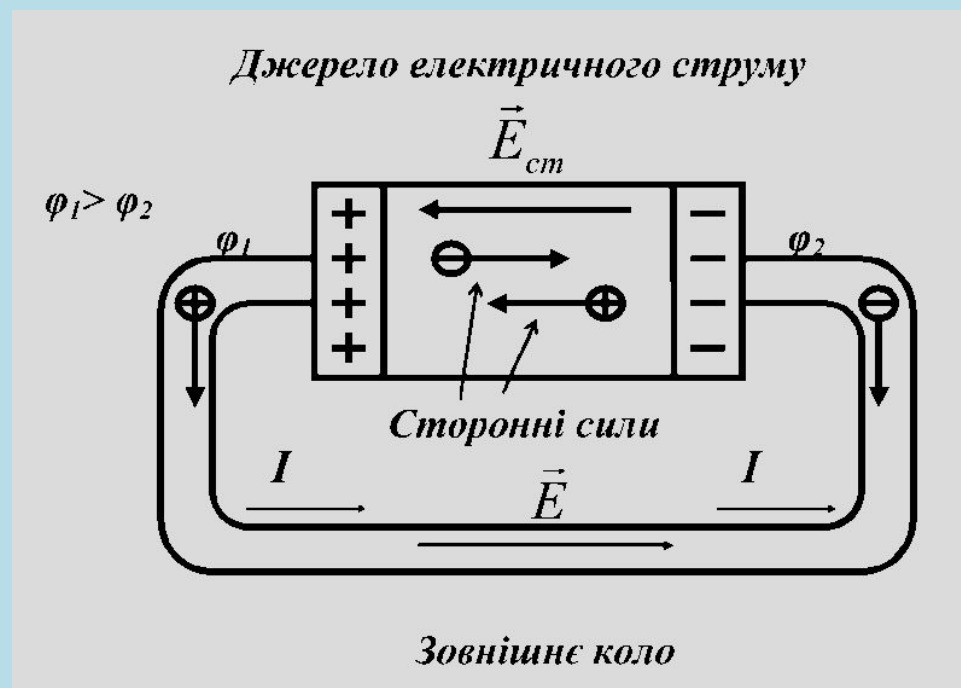
Постійним електричним струмом називають такий струм, значення і напрям якого не змінюються з часом, тобто $j = \text{const}$

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

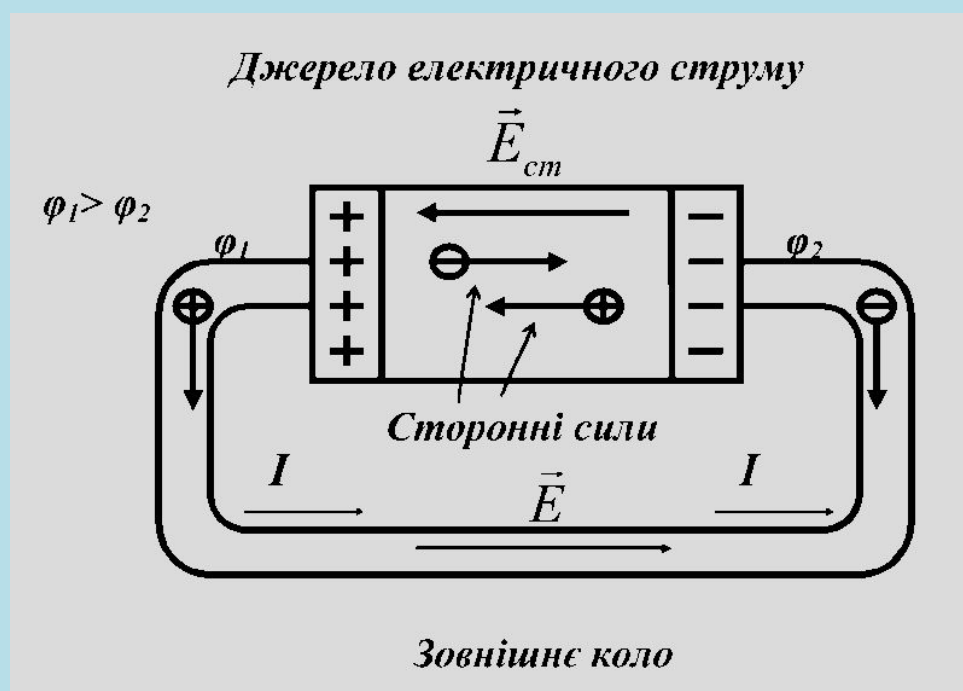


3. ЕРС джерела струму. Опір провідників

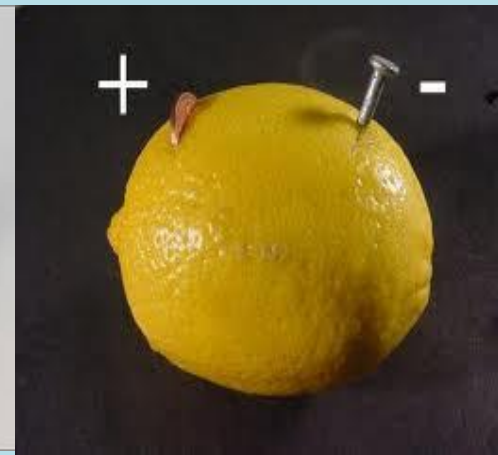
Переміщення позитивних і негативних зарядів у зовнішній частині електричного кола відбувається за рахунок кулонівських сил поля у напрямі їх компенсації, тобто негативно заряджені частинки рухаються до позитивного полюсу джерела струму, а позитивні – до негативного.



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:

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

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

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

Значення ЕРС, що діє у замкненому колі:

$$\varepsilon = \frac{q_0 \oint_L (\overset{\square}{E}_{cm} \cdot d\overset{\square}{l})}{q_0} = \oint_L (\overset{\square}{E}_{cm} \cdot d\overset{\square}{l})$$

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

$$\varepsilon_{12} = \int_1^2 (\overset{\square}{E}_{cm} \cdot d\overset{\square}{l})$$

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:

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

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, ρ – питомий опір матеріалу, з якого виготовлений провідник, вимірюється в $\text{Ом}\cdot\text{м}$,

l – довжина провідника,

S – площа поперечного перерізу провідника,

α – 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 ρ :

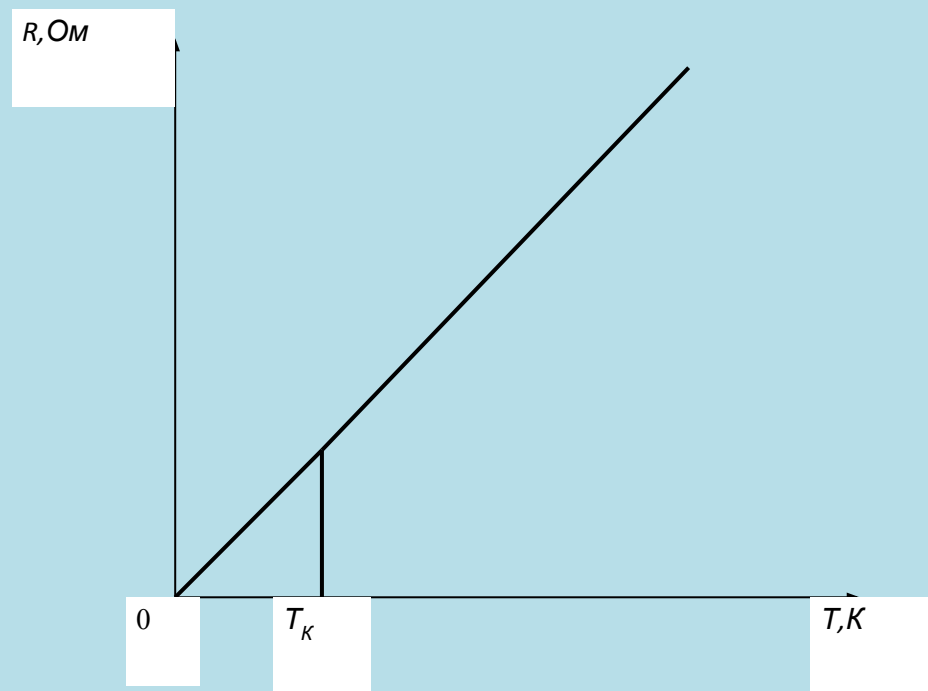
$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

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

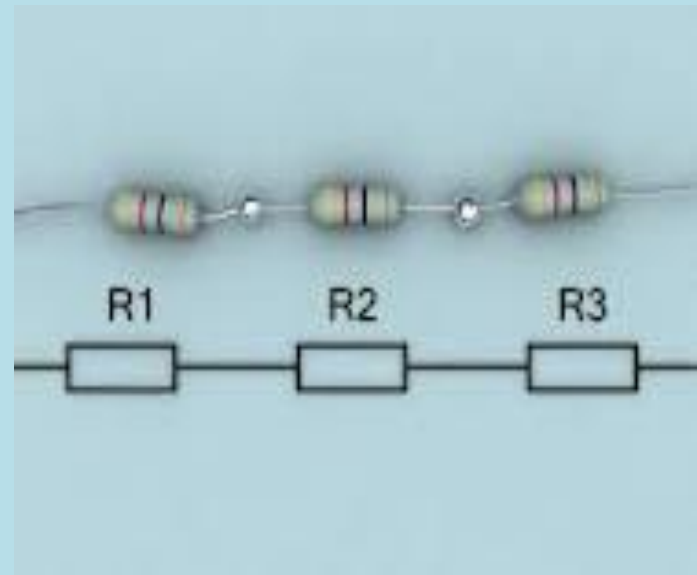
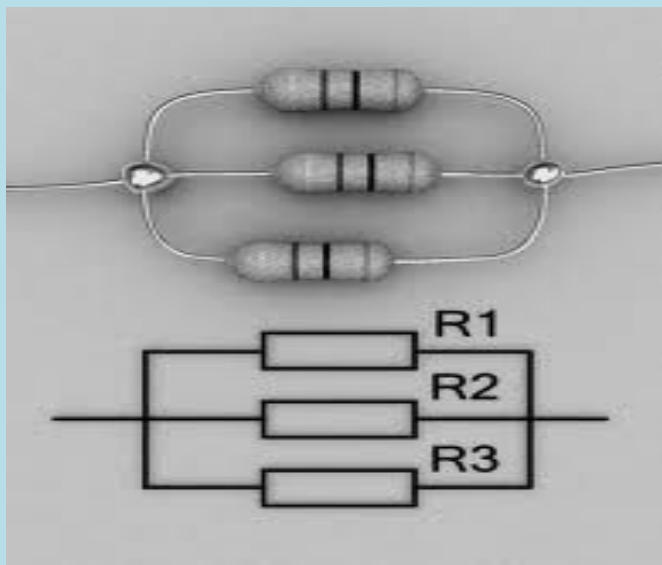
З підвищенням температури збільшуються амплітуда і частота коливань вузлів кристалічної решітки провідника (основної фізичної причини опору), це веде до збільшення ймовірності зіткнень носіїв заряду з вузлами, чим й пояснюється зростання опору провідника:



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.



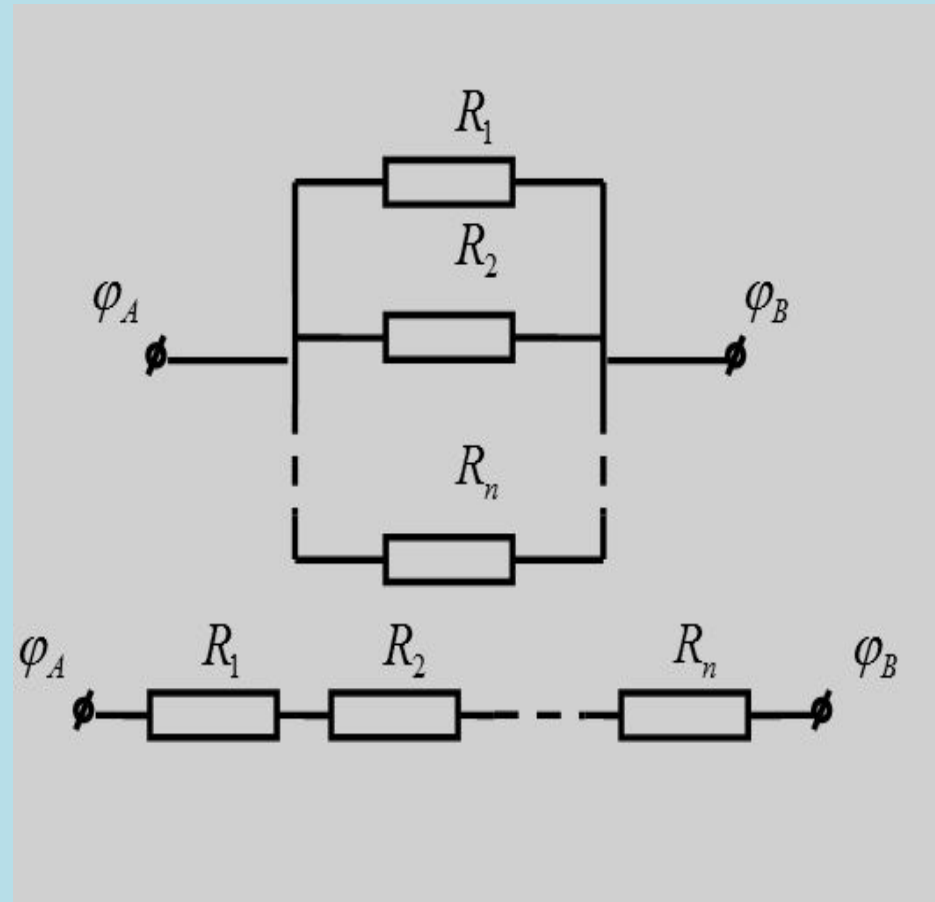
На залежності електричного опору металів від температури базується Дія *термометрів опору*, які дозволяють вимірювати температуру з точністю до тисячних часток кельвіна. Використання у якості робочої речовини термометрів опору напівпровідників, виготовлених за спеціальною технологією, – *термісторів*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

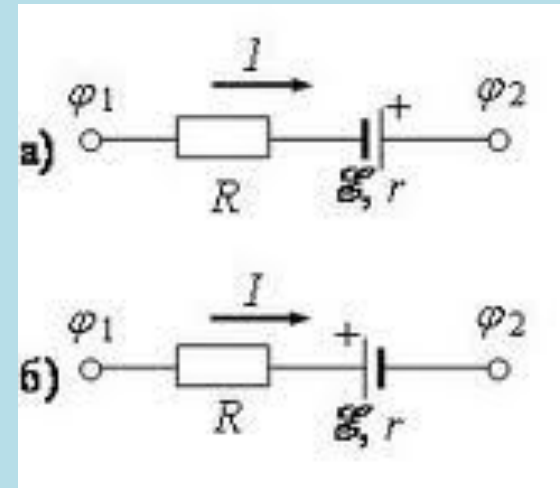
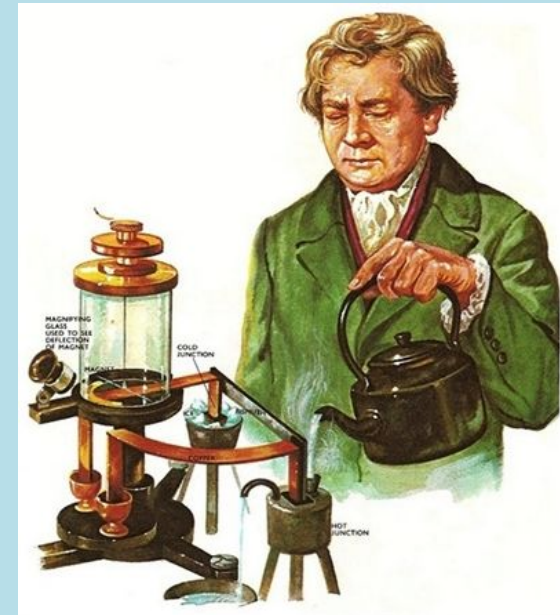
Розглянемо закони Ома для різних частин електричного кола.



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 опорю цієї ділянки:

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

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



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

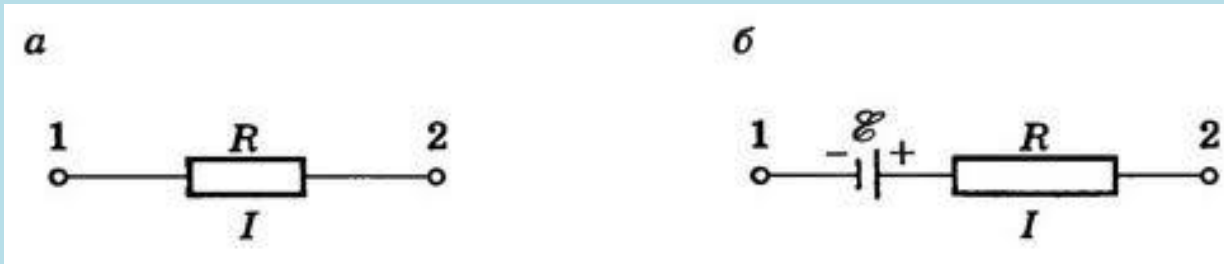
де $\varphi_1 - \varphi_2$ – різниця потенціалів на кінцях ділянки кола;
 \mathcal{E} – електрорушійна сила джерела струму (знак ЕРС залежить від знаку роботи, яку виконують сторонні сили).

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 $\mathcal{E} < 0$);

– 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, ($\varepsilon = 0$, $r = 0$):



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

оскільки

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

$\boxed{S} = j$ $\boxed{\rho} = \sigma$ $\boxed{l} = E$

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

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

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

j – густина струму,

σ – питома електропровідність провідника,

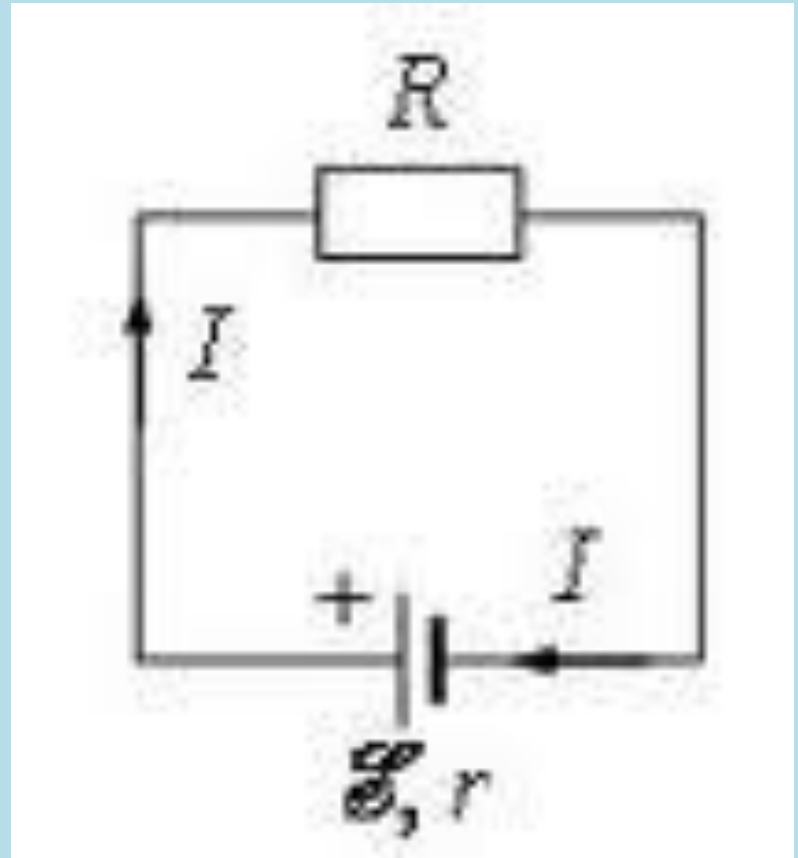
E – напруженість електричного поля;

У такій формі закон Ома застосовний для кожної точки кола.

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

тобто $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$

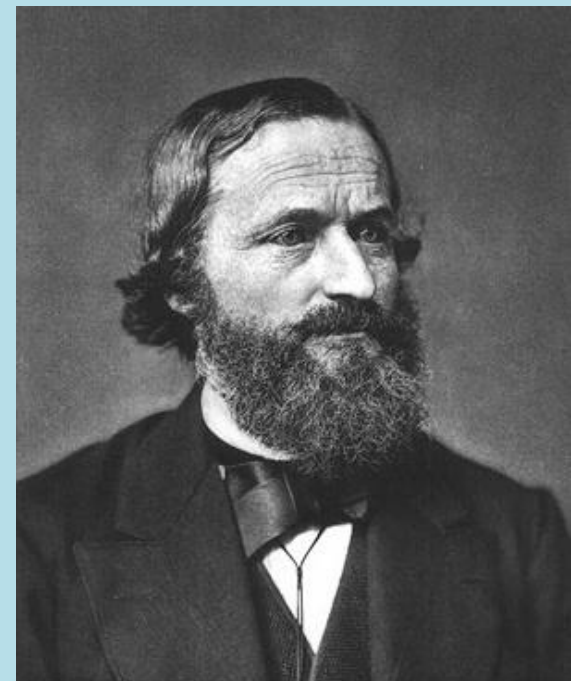
$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$



5. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа.

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

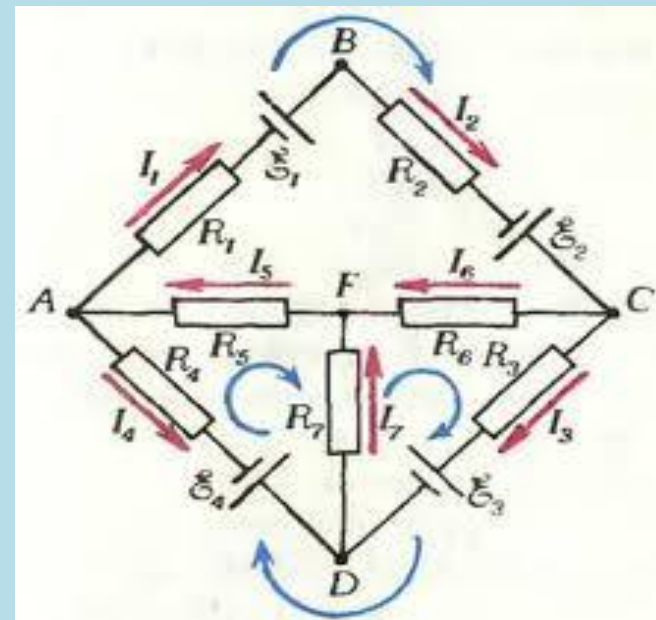
Під електричним колом розуміють систему, яка складається із джерел струму (електрорушійною силою \mathcal{E} , опором r) і споживачів електричної енергії (опором R), з'єднаних між собою провідниками.



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*.



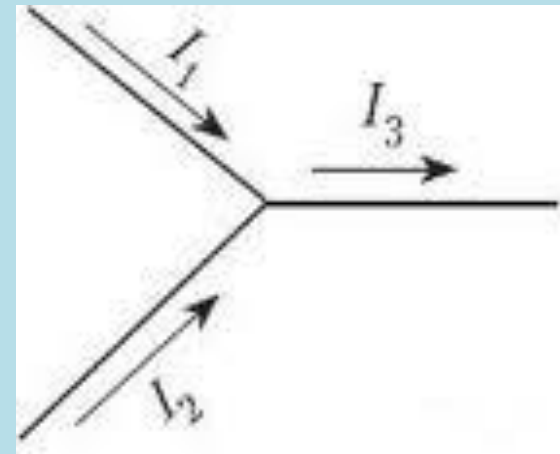
Ділянкою розгалуженого кола називають частину контуру між двома вузлами, яка містить джерела струму, резистори або інші елементи кола. По різних ділянках одного контуру проходять різні струми.

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

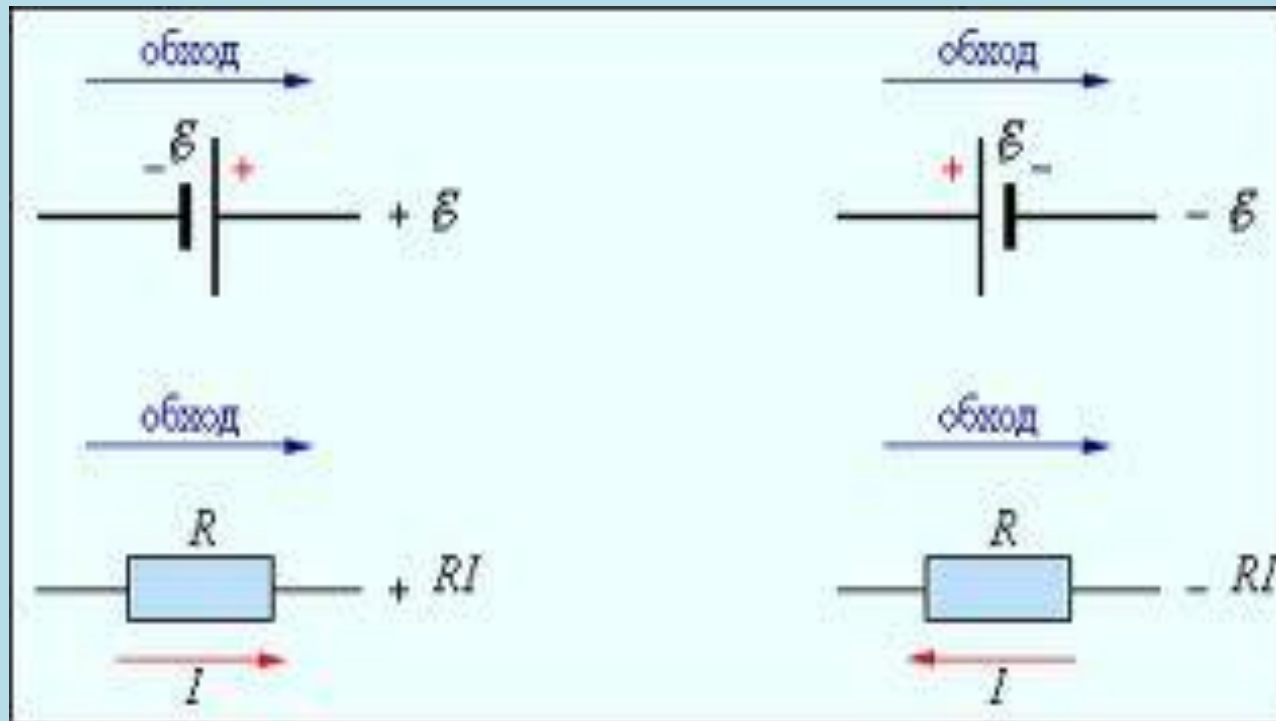
Ома для довільного контуру розгалуженого електричного кола: у контурі алгебраїчна сума спадів напруг (добутків сил струмів на опори провідних ділянок) дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, які діють у цьому контурі:

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

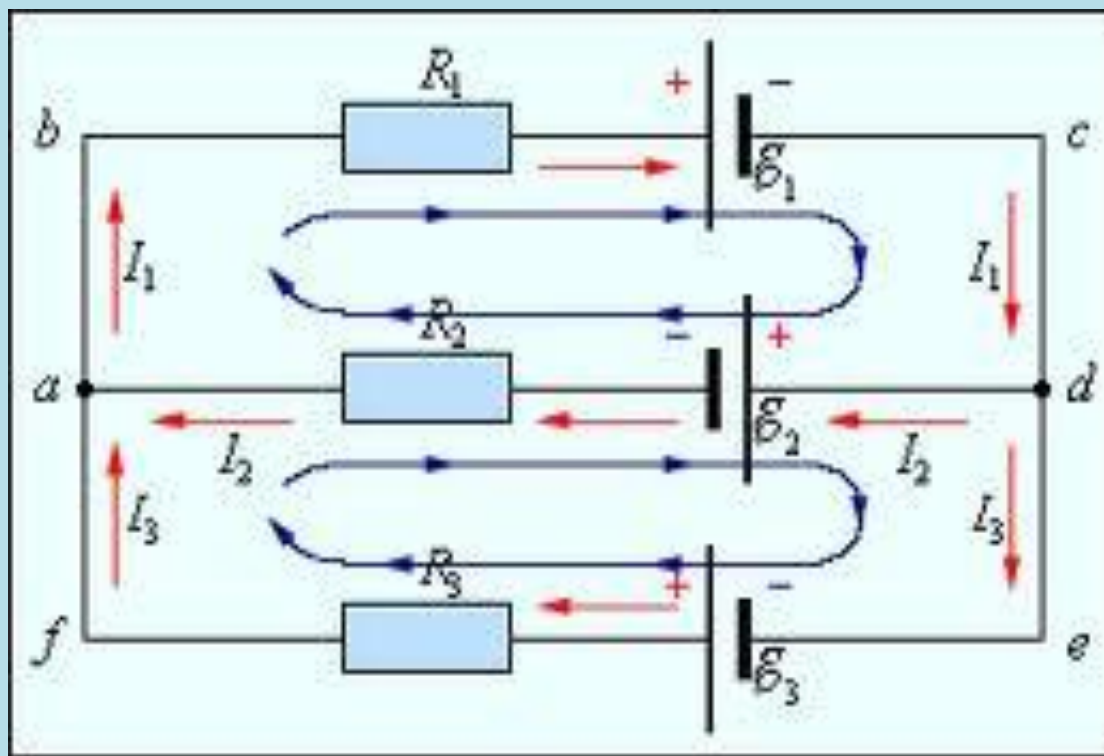
де , n – кількість ділянок у контурі,

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.