

# Лекція № 10.

## Постійний електричний струм

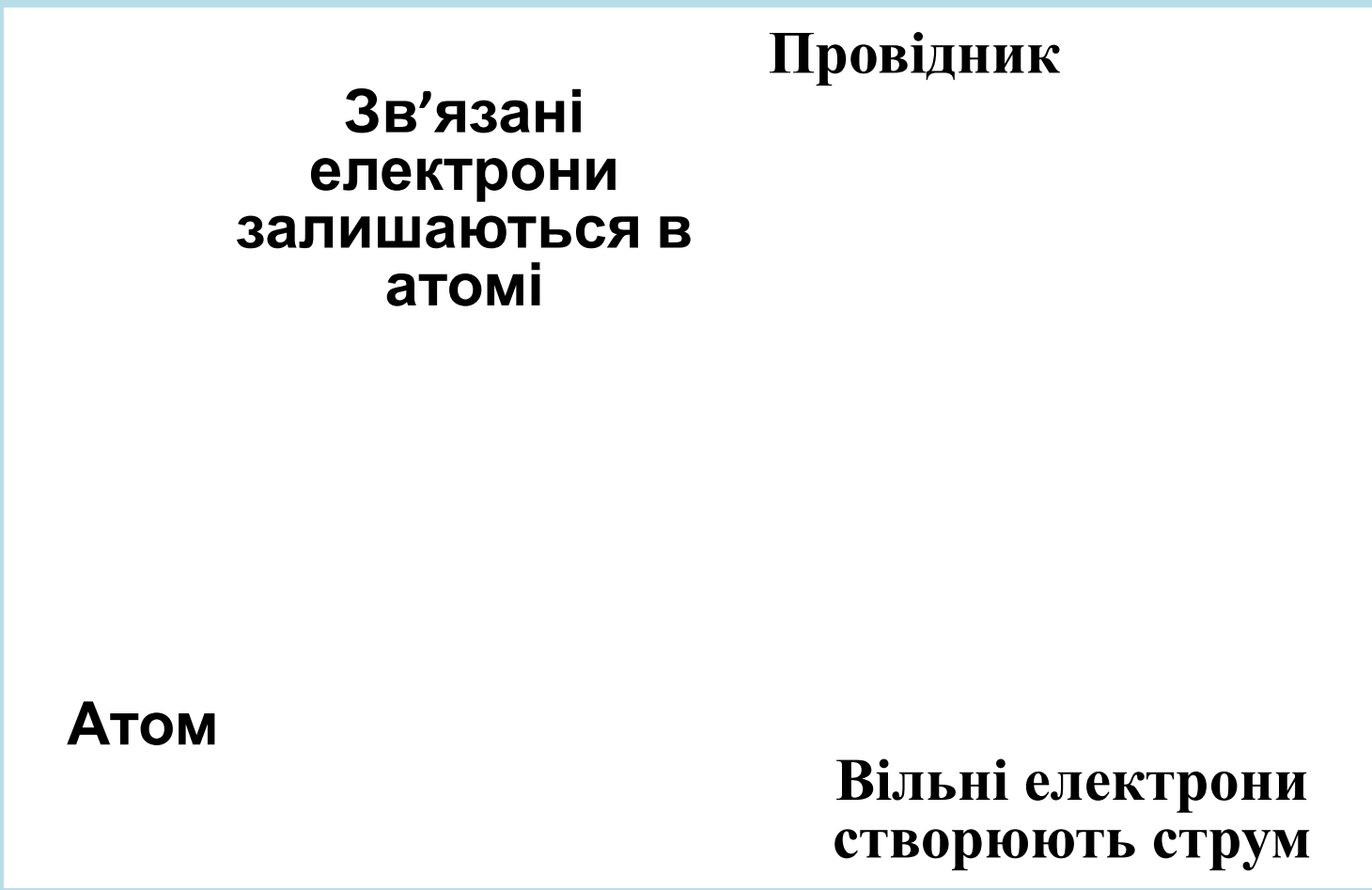
1. Постійний електричний струм, умови його існування
2. Сила та густина струму
3. ЕРС джерела струму. Опір провідників
4. Закони Ома
5. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа

# 1. Постійний електричний струм, умови його існування.

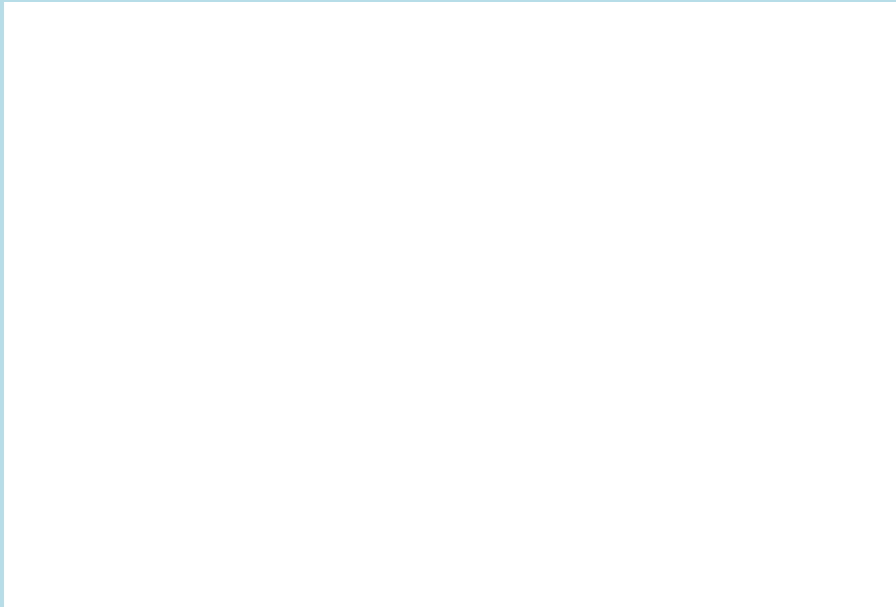
Електричним струмом називають направлений рух електричних заряджених частинок (носіїв заряду).

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 короткочасні 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.

*напря́м струму*

*напря́м струму*

Основними умовами виникнення струму у провіднику є:

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

*струм*

## 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:



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.



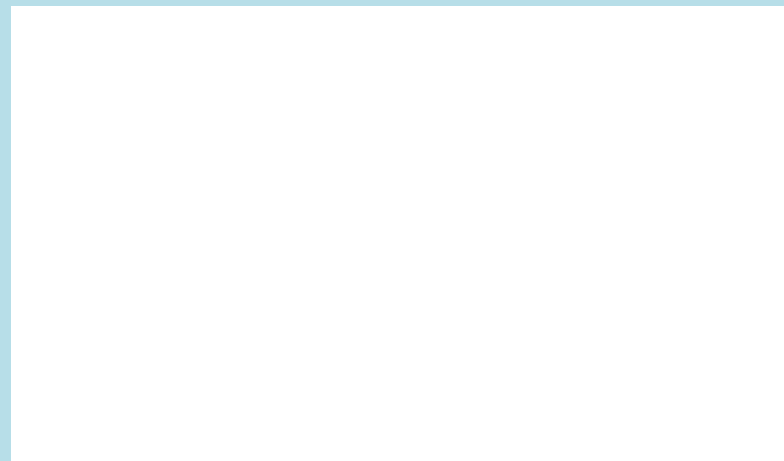
В СІ ампер ( $1 A$ ) разом з кілограмом ( $1 кг$ ), метром ( $1 м$ ) і секундою ( $1 с$ ) становить базу основних одиниць фізичних величин системи.

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



або ж:





де,  $S$  – площа перерізу провідника;  
 $n$  – концентрація носіїв електричного заряду;  
 $v_{dr}$  – дрейфова (спричинена електричним полем) швидкість носіїв електричного заряду;  
 $\vec{n}$  – одиничний вектор нормалі до поверхні перерізу провідника.

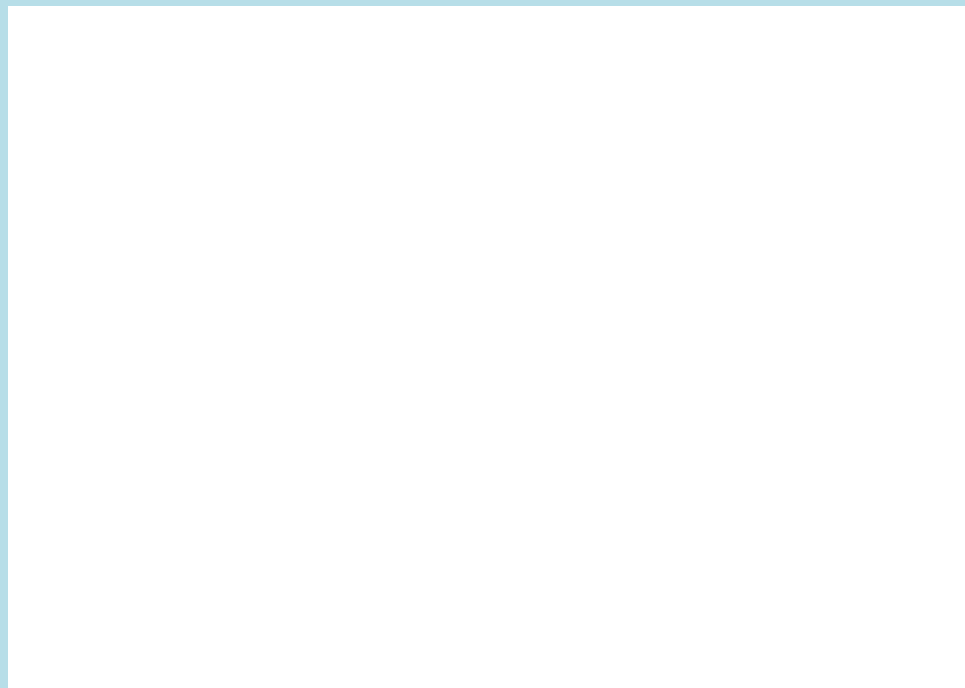
Густина струму вимірюється в амперах на метр квадратний ( $A/m^2$ ).

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

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.

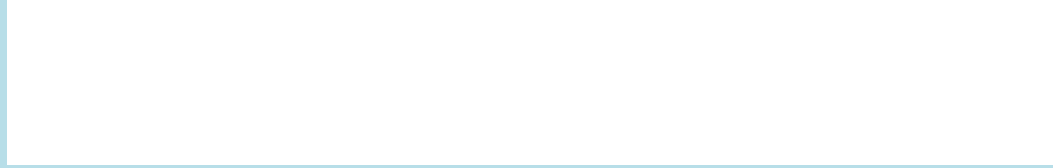
Таким чином, у колі постійного струму окрім електростатичного поля зовнішнього кола напруженістю  $E_{\text{вн}}$  існує електростатичне поле сторонніх сил напруженістю  $E_{\text{ст}}$  всередині джерела струму.

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





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

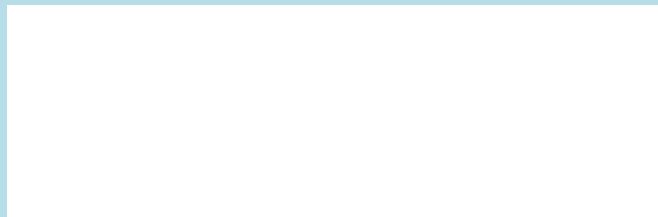


Якщо напруженість результуючого поля у провіднику буде дорівнювати нулю, настане рівновага, тобто направлений рух зарядів буде відсутнім і струм дорівнюватиме нулю.

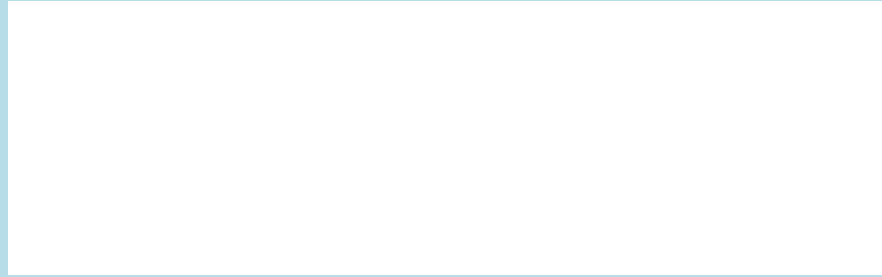
Сторонні сили характеризують роботою, яку вони виконують при переміщенні зарядів по колу або на ділянці кола. *Електрорушійною силою (ЕРС) джерела струму  $\mathcal{E}$*  називають скалярну фізичну величину, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиничного позитивного заряду по колу:



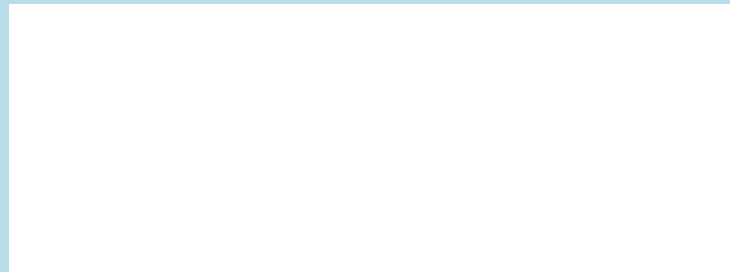
,де



Значення ЕРС, що діє у замкненому колі:



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

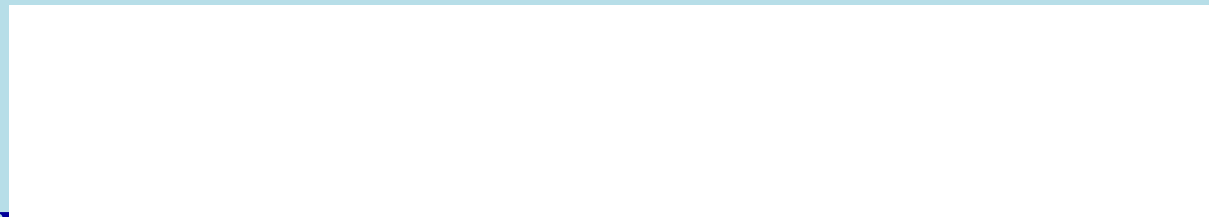


*Напругою (спадом напруги)  $U$  на ділянці кола 1–2 називають скалярну фізичну величину, чисельно рівну роботі, яку виконують кулонівські і сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду із точки 1 у точку 2:*

де



,



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

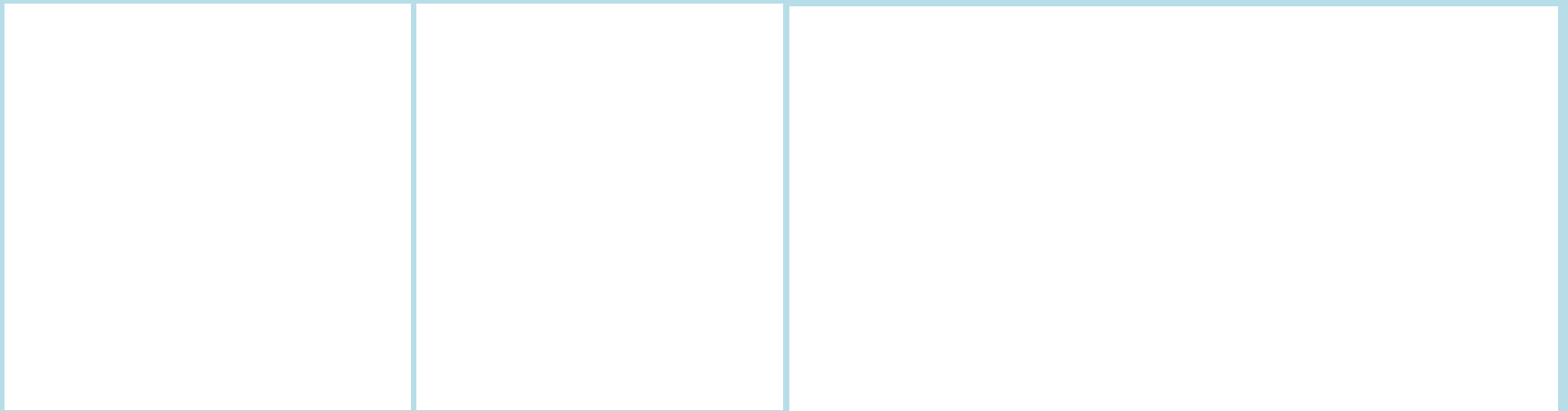
*Неоднорідною ділянкою кола* називають таку ділянку кола, яка містить джерело струму.

*Електричний опір провідника* — це скалярна фізична величина, яка є властивістю провідника щодо перешкодження направленому рухові носіїв заряду вздовж нього.

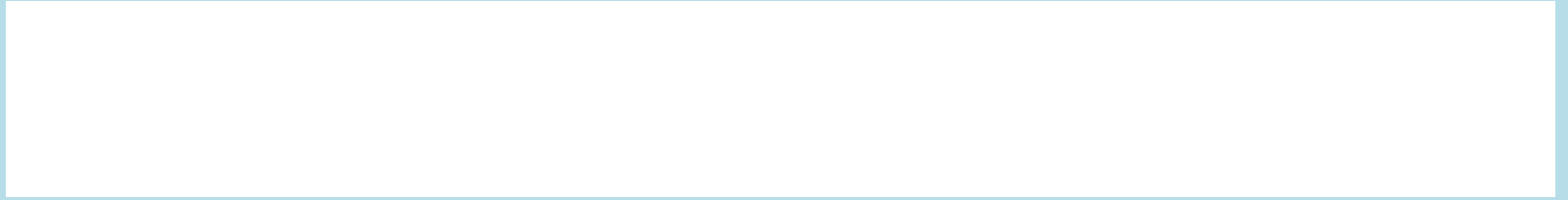


Наявність опору у металевих провідників першого роду пов'язана із розсіюванням енергії електронів провідності на теплову енергію коливань кристалічної решітки або неоднорідностей її структури (домішки, дефекти).

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:



де,  $\rho$  – *питомий опір матеріалу*, з якого виготовлений провідник, вимірюється в  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ,  
 $\ell$  – 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  $\rho$ :



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:

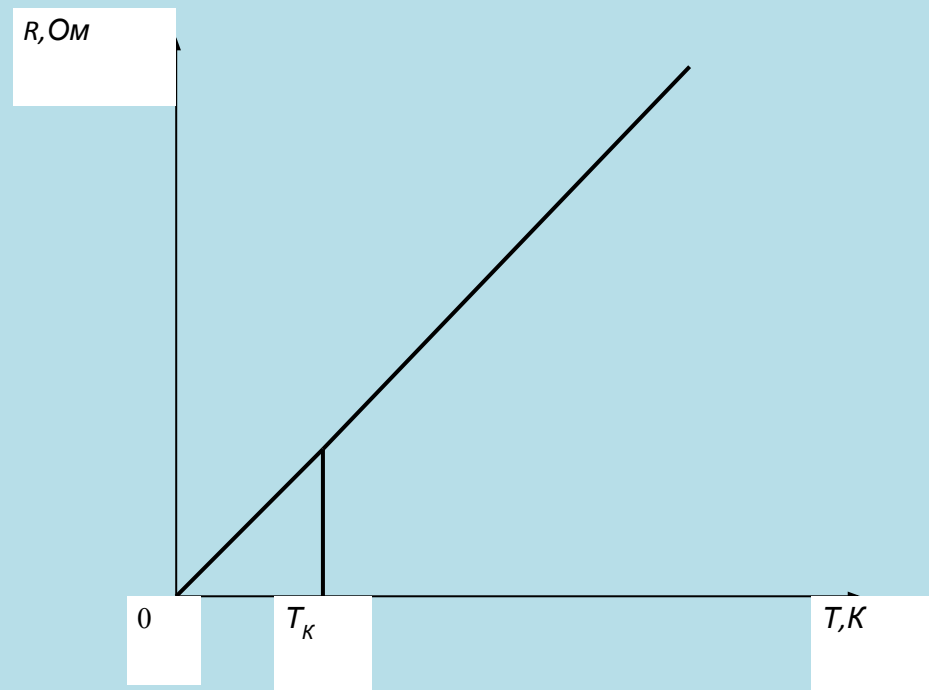
**Провідник**

**Зв'язані  
електрони  
залишаються в  
атомі**

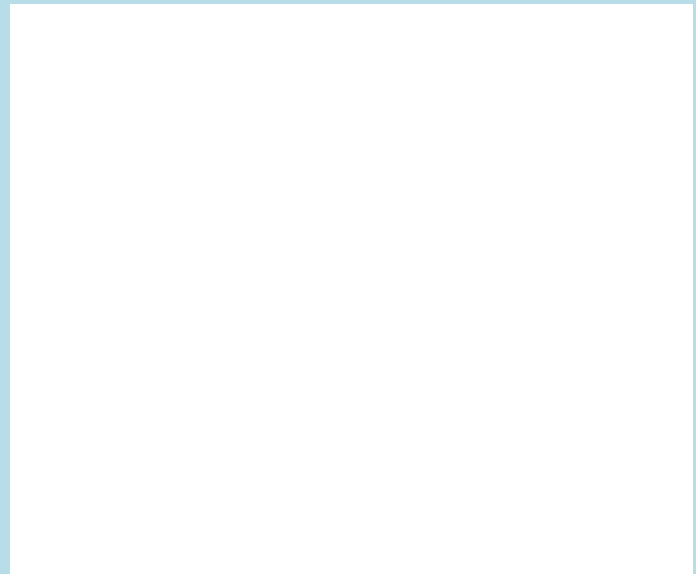
**Атом**

**Вільні електрони  
створюють струм**

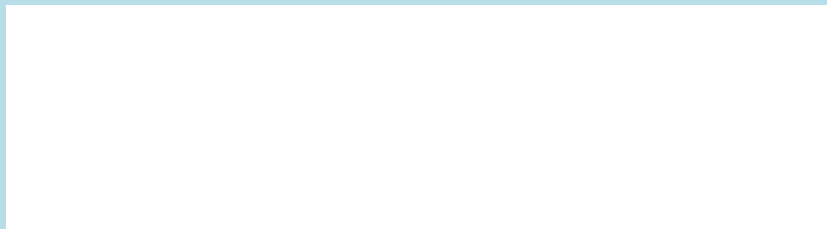
При дуже низьких температурах (  – критична температура) спостерігається явище повного зникнення опору – явище надпровідності, виявлене вперше Г. Камерлінг-Оннесом для ртуті у 1911 р. Пояснення механізму виникнення явища надпровідності дає квантова фізика.



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:



## 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

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

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

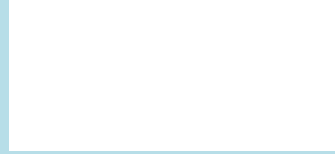
– внутрішній опір, тобто опір джерела струму;


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



*Закон Ома для однорідної ділянки кола, тобто ділянки, яка не містить джерела струму, (  ,  ):*

*оскільки*

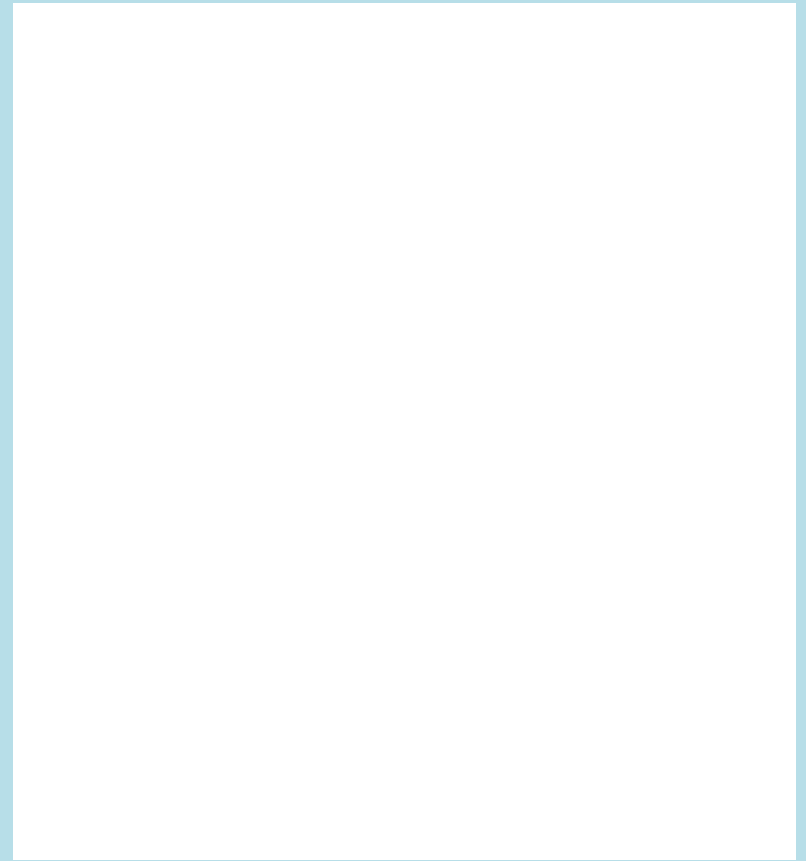
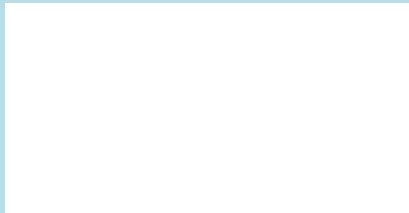
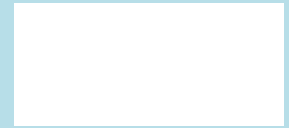
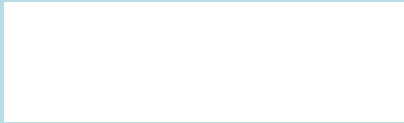


де  – напруга на кінцях ділянки кола,  
 $j$  – густина струму,  
 $\sigma$  – питома електропровідність провідника,  
 $E$  – напруженість електричного поля;

У такій формі закон Ома застосовний для кожної точки кола.

*Закон Ома замкненого (повного) кола*

Тобто



## 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.

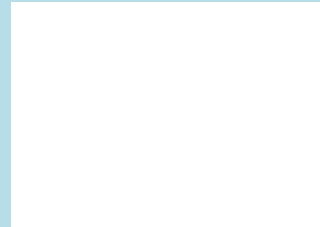
*Гюстав Кірхгоф*

*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:



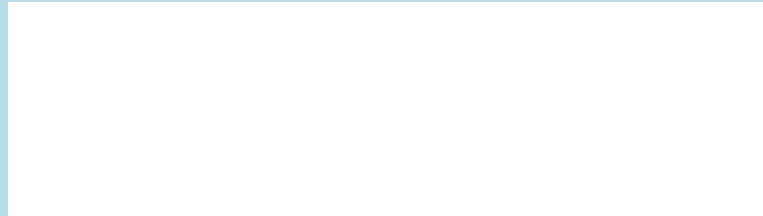
де,  $n$  – кількість ділянок, що сходяться у вузлі.

*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

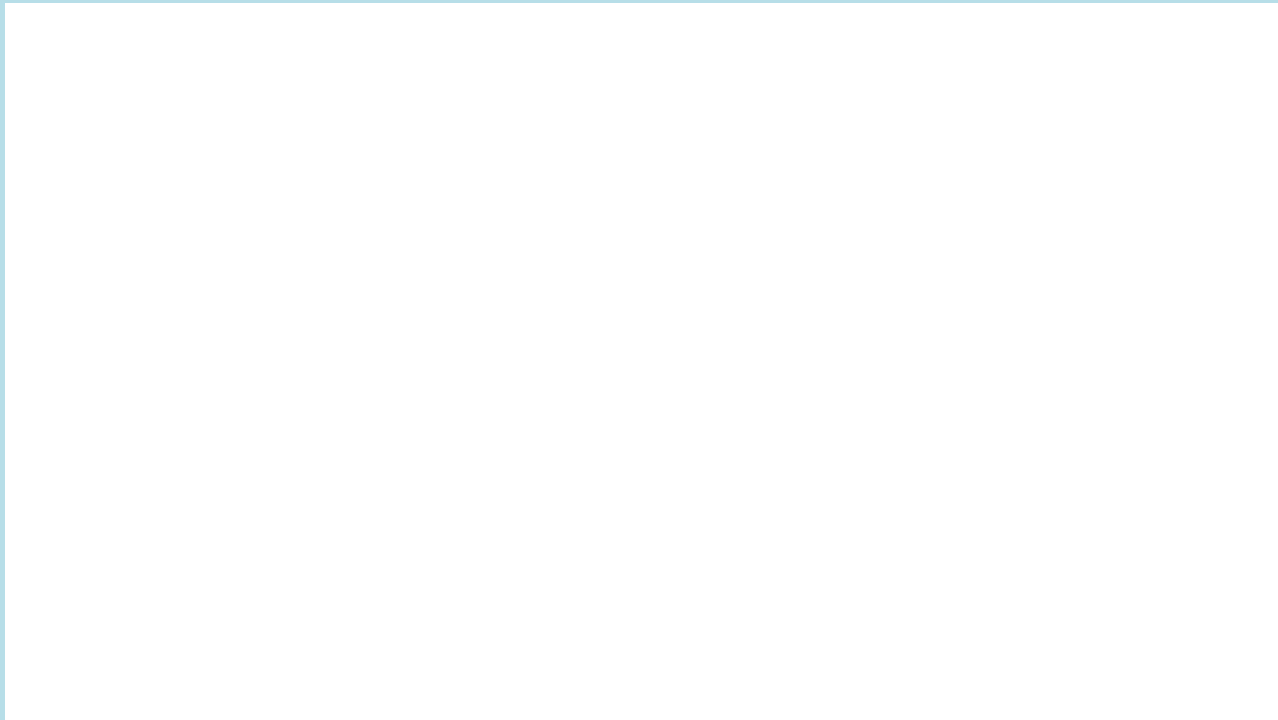
Ома для довільного контуру розгалуженого електричного кола: у контурі алгебраїчна сума спадів напруг (добутків сил струмів на опори провідних ділянок) дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, які діють у цьому контурі:



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  $U_{ab}$  і  $U_{ba}$  беруться зі знаком “+”, якщо напрямок обходу контуру співпадає з напрямком струму і зі знаком “–”, якщо напрямок обходу контуру протилежний до напрямку струму;





2) Доданки 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.