

# Лекція №7

Енергія електричного поля. Постійний електричний струм

Викл Коваль В.В.

ФОК

2021р.

# Питання

Електроємність. Конденсатор. Енергія системи точкових зарядів. Енергія зарядженого провідника.

Енергія електричного поля. Електричний струм. Густина електричного струму з мікроскопічної точки зору. Рівняння неперервності для електричного заряду. Сторонні сили. Електрорушійна сила. Закон Ома. Правила Кірхгофа. Потужність струму. Закон Джоуля-Ленца в інтегральній і диференціальній формі. Процеси встановлення струму під час заряду і розряду конденсатора.

## ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. КОНДЕНСАТОРИ

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma dS}{r}$$

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

$$\varphi = \frac{q}{C}$$

$$C = \frac{q}{\phi}$$

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi$$

$$r \leq R$$

$$E_r = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$$

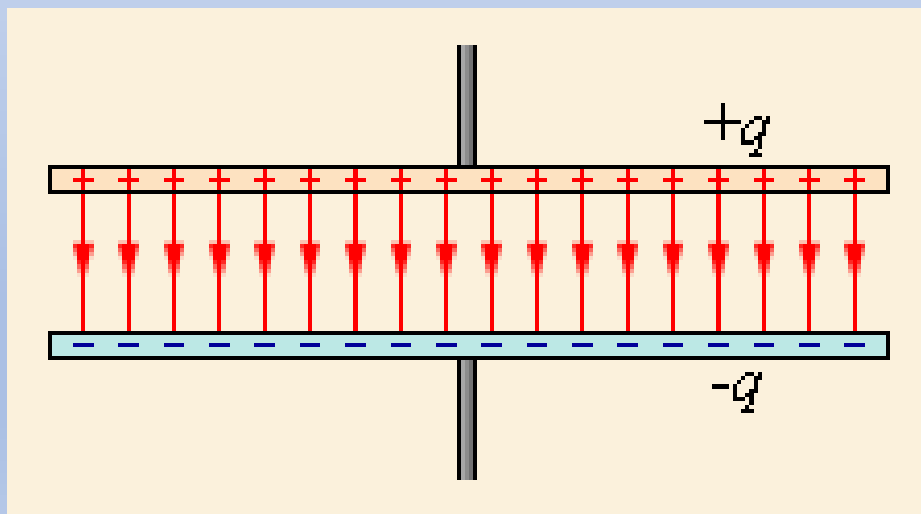
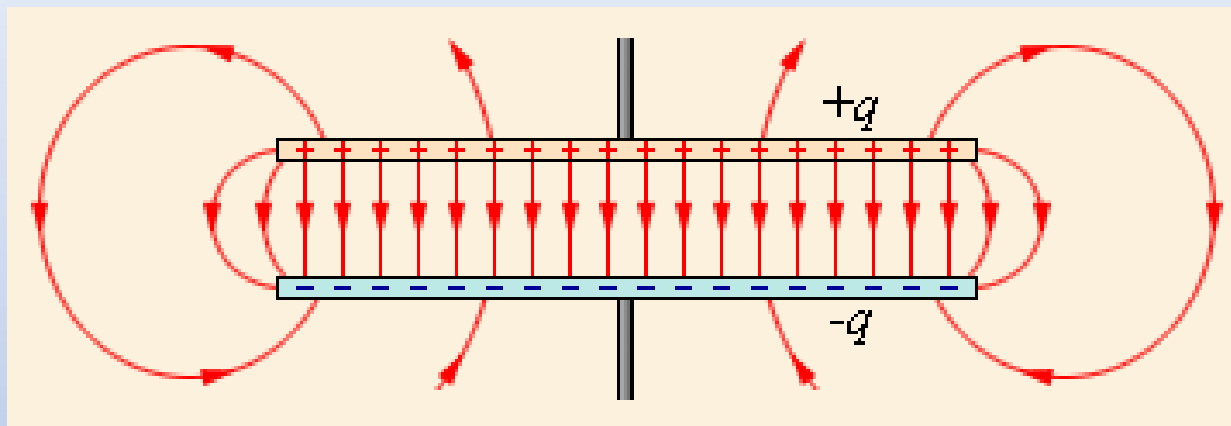
$$\varphi = \int_0^R E_r dr = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}$$

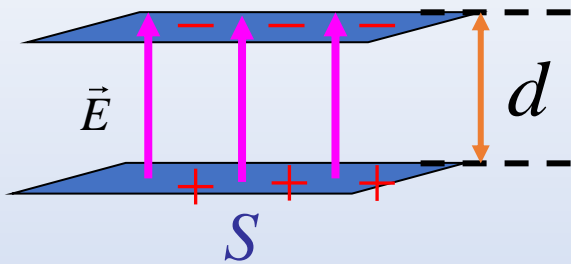
$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$$

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \phi} = \frac{q}{U}$$

$$[C] = \frac{K_{\mathcal{L}}}{B} = 1\Phi$$

## Поле плоского конденсатора





$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$$

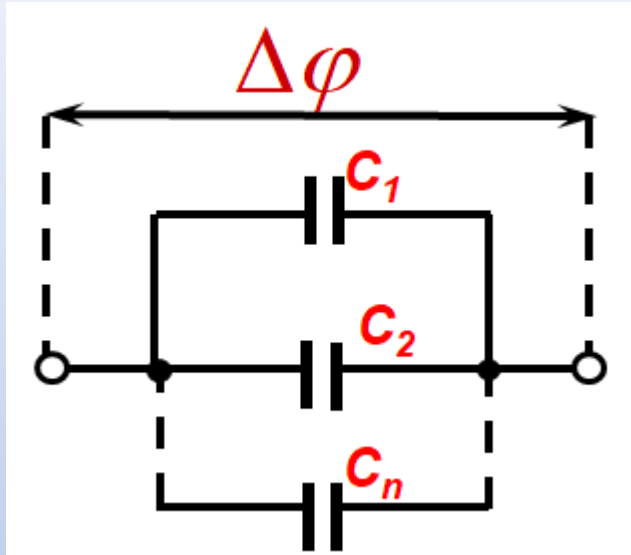
$$\Delta\varphi = \int_0^d E_x dx = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} \int_0^d dx = \frac{\sigma d}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{qd}{\epsilon\epsilon_0 S}$$

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 L}{\ln(R/r)}$$

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

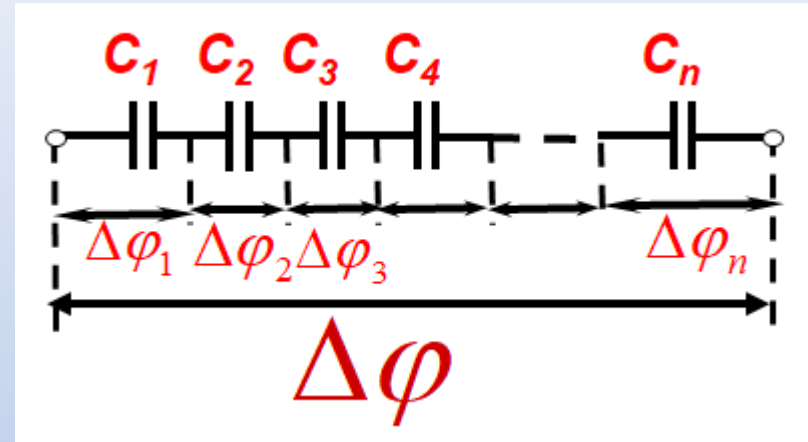
## З'єднання конденсаторів



$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \dots = \Delta\varphi_n$$

$$q = \sum_{i=1}^n q_i$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i$$

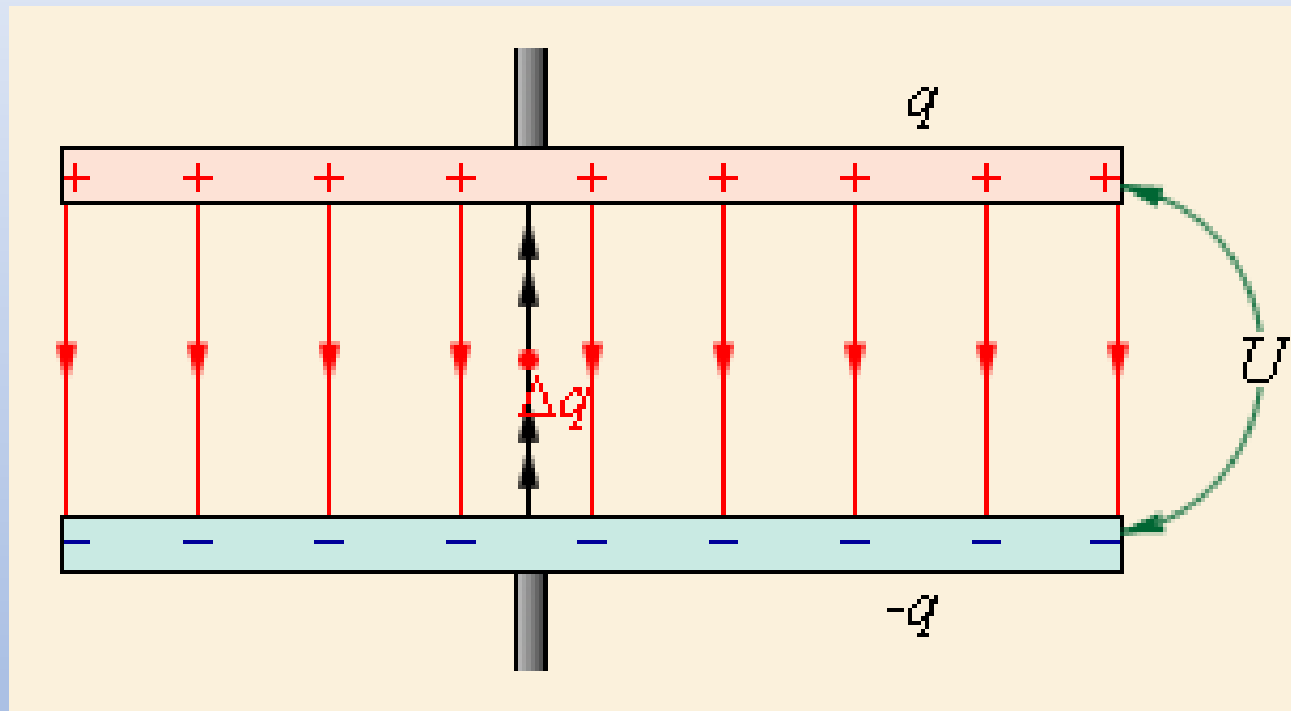


$$q = q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = \dots = q_n$$

$$\Delta\varphi = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i$$

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

# Енергія електричного поля





$$dq$$

$$dA = \Delta\varphi \, dq = \frac{q \, dq}{C} \Rightarrow A = \int_0^q \frac{q \, dq}{C} = \frac{q^2}{2C}$$

$$W_E = \frac{q^2}{2C} = \frac{C\Delta\phi^2}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}$$

$$\left(\vec{E} = \text{const}\right) \quad \Delta\varphi = E \cdot d$$

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$

$$W_E = \frac{C\Delta\varphi^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2d} E^2 \cdot d^2 = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 V$$

$$S \cdot d = V$$

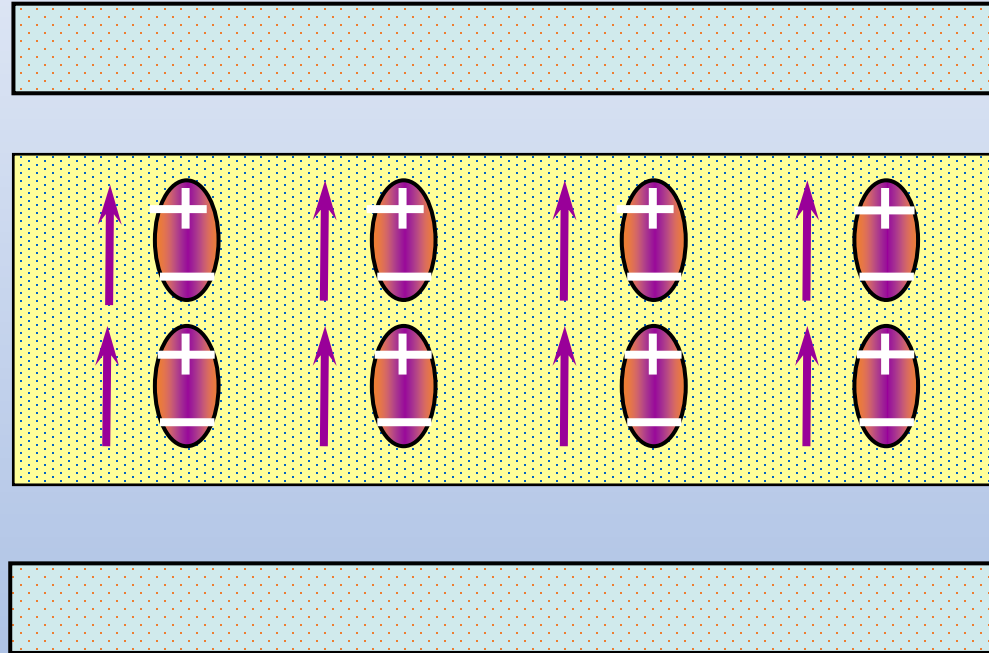
$$w = \frac{dW}{dV} \qquad [w] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$

$$w = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} ED$$

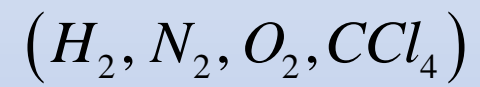
**Енергія електричного поля**

$$W_E = \int_V w dV = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 \int_V E^2 dV$$

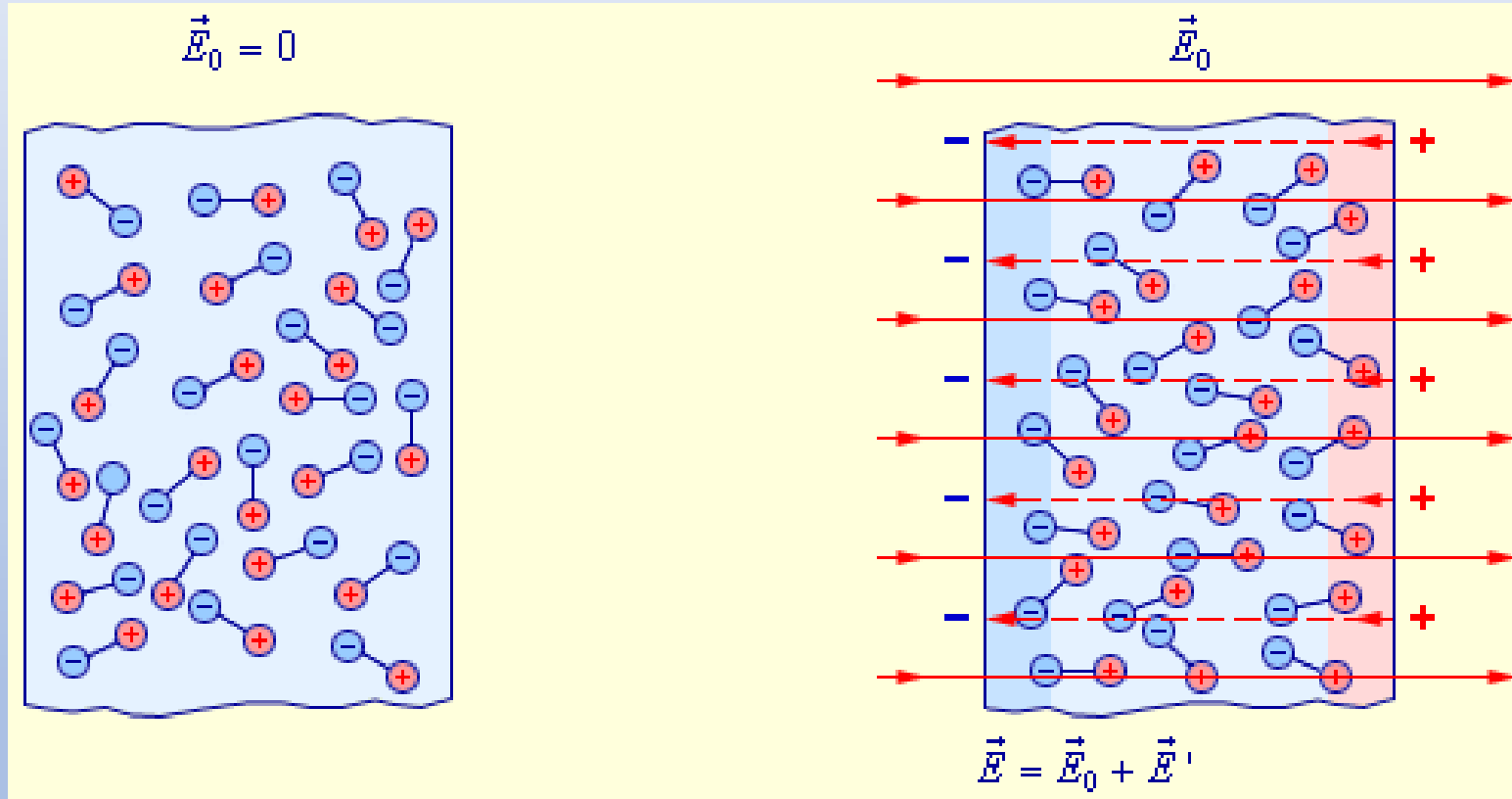
# ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ В ДІЕЛЕКТРИКАХ



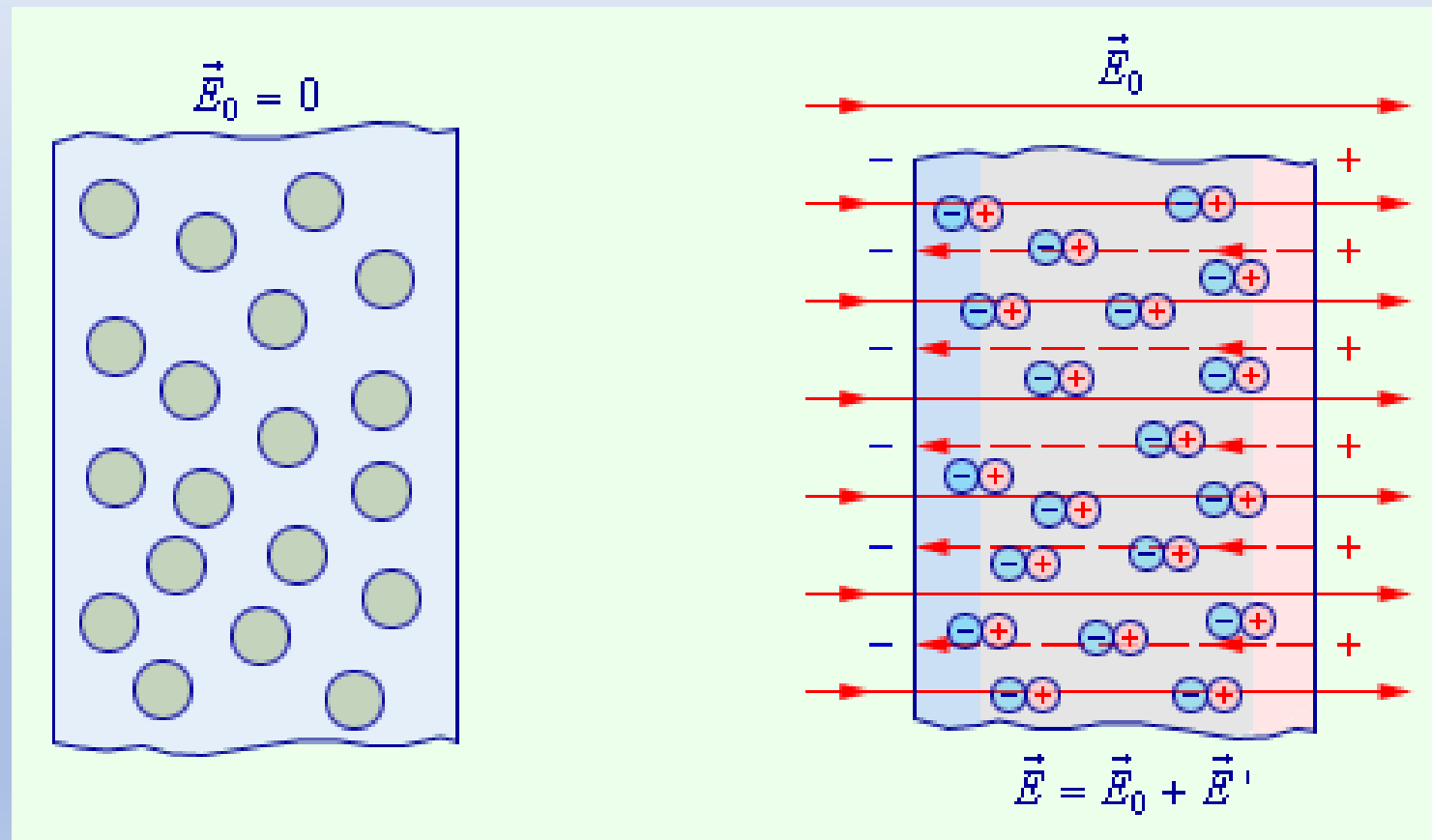
# Полярні і неполярні діелектрики



# Орієнтаційний механізм поляризації полярного діелектрика



# *Електронний або пружний механізм поляризації*



$$E = E_0 - E_{зв}$$

$$\vec{p}_e = \chi_{e,мол} \varepsilon_0 \vec{E}_0$$

$\chi_{e,мол}$  - діелектрична сприйнятливiсть молекули.

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{p}_{ei}}{\Delta V}$$

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$E_{36} = \frac{\sigma_{36}}{\varepsilon_0} \quad P = \sigma_{36}$$

$$E = E_0 - E_{36}$$

$$E = E_0 - \frac{\sigma_{36}}{\varepsilon_0} \quad \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 E_0 - \sigma_{36} \quad \varepsilon_0 E = D - P$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$



$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \chi \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\varepsilon = 1 + \chi$$

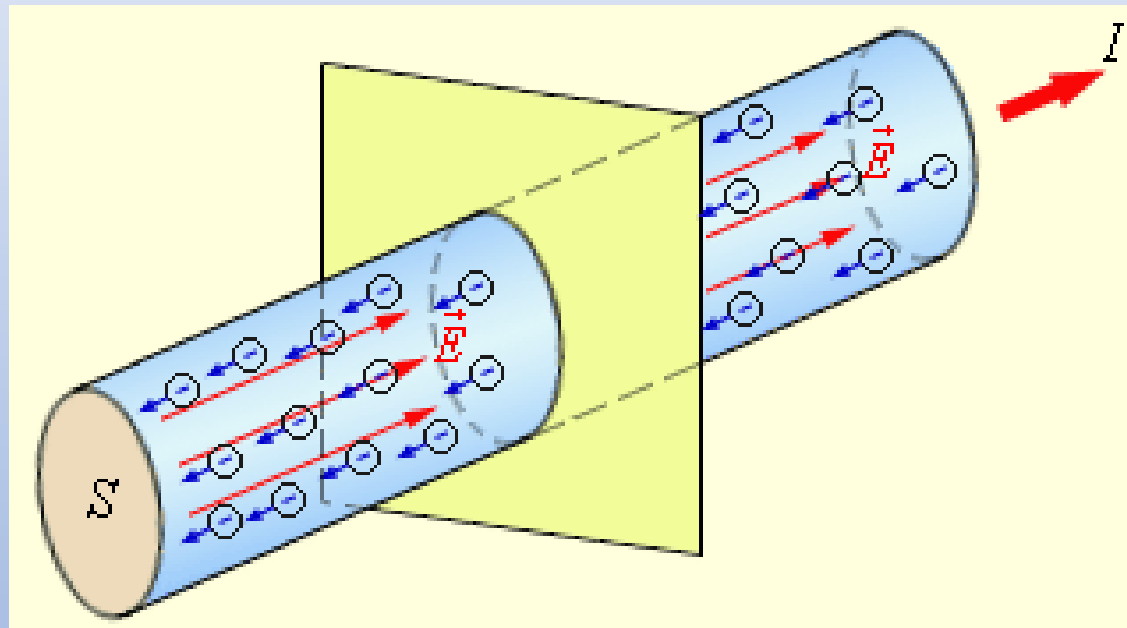
## ТЕОРЕМА ГАУСА ДЛЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ В ДІЕЛЕКТРИКУ

$$\Phi_D = \int_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_i$$

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$$

# Постійний струм

Електричний струм



$I$   
 $S$   
 $E$

$$I = \frac{dq}{dt} \quad [I] = 1 A$$

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n} \quad [j] = \frac{A}{\mathcal{M}^2}$$

$$I = \frac{q}{t} \quad j = \frac{I}{S}$$

# Рівняння нерозривності струму

$$I = \int \vec{j} d\vec{S}$$

$$dq = -I dt$$

$$\oint_{(s)} \vec{j} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}$$

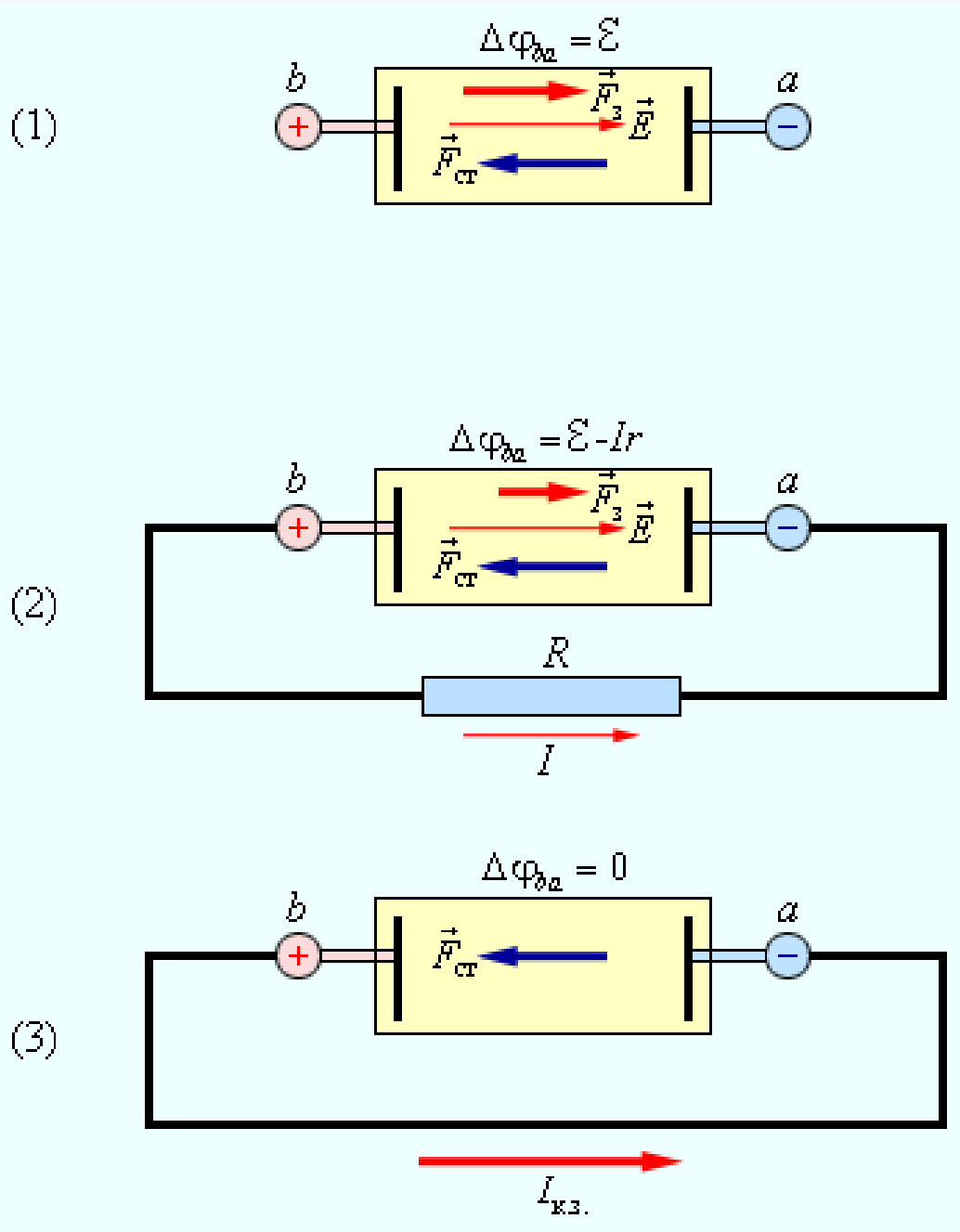
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div} \vec{j}$$

$$\oint_{(s)} \vec{j} d\vec{S} = 0$$

# Електрорушійна сила (ЕРС)

$$\mathcal{E}_{12} = \frac{A_{cm}}{q}$$

$$[\mathcal{E}] = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В}$$

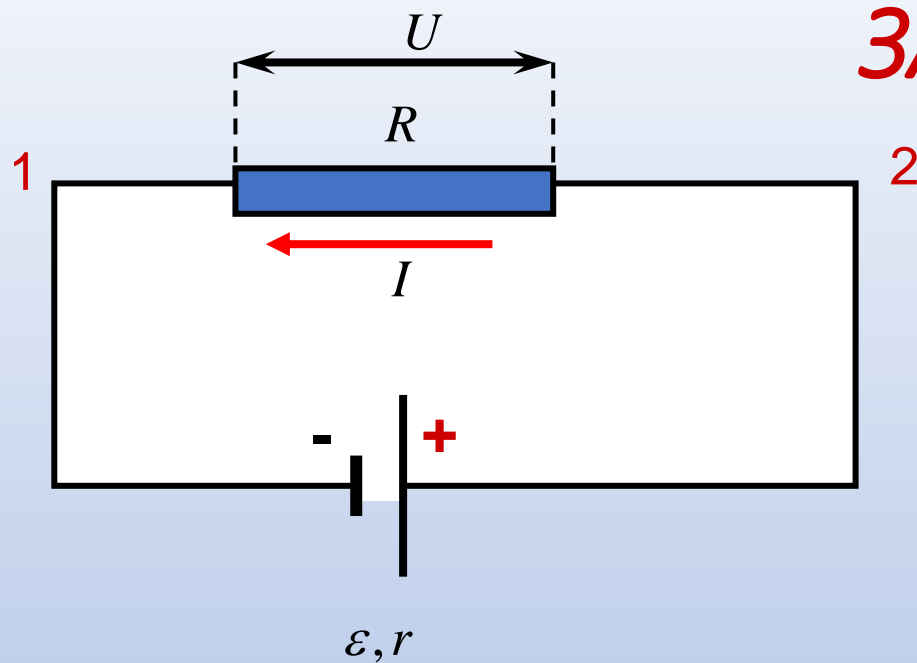


**Схематичне  
зображення  
джерела  
постійного  
струму:**

**1** – батарея  
розімкнута;

**2** – батарея  
замкнута на  
зовнішній опір  $R$ ;

**3** – режим  
короткого  
замикання.



## ЗАКОН ОМА

$$I = kU$$

$$[k] = C_M$$

**Закон Ома для ділянки  
кола в інтегральній  
формі:**

*Коло постійного струму*

$R$        $r$

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

**Закон Ома для замкнутого  
кола в інтегральній формі:**

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



$$I = j dS \qquad R = \rho \frac{dl}{dS} \qquad U = E dl$$

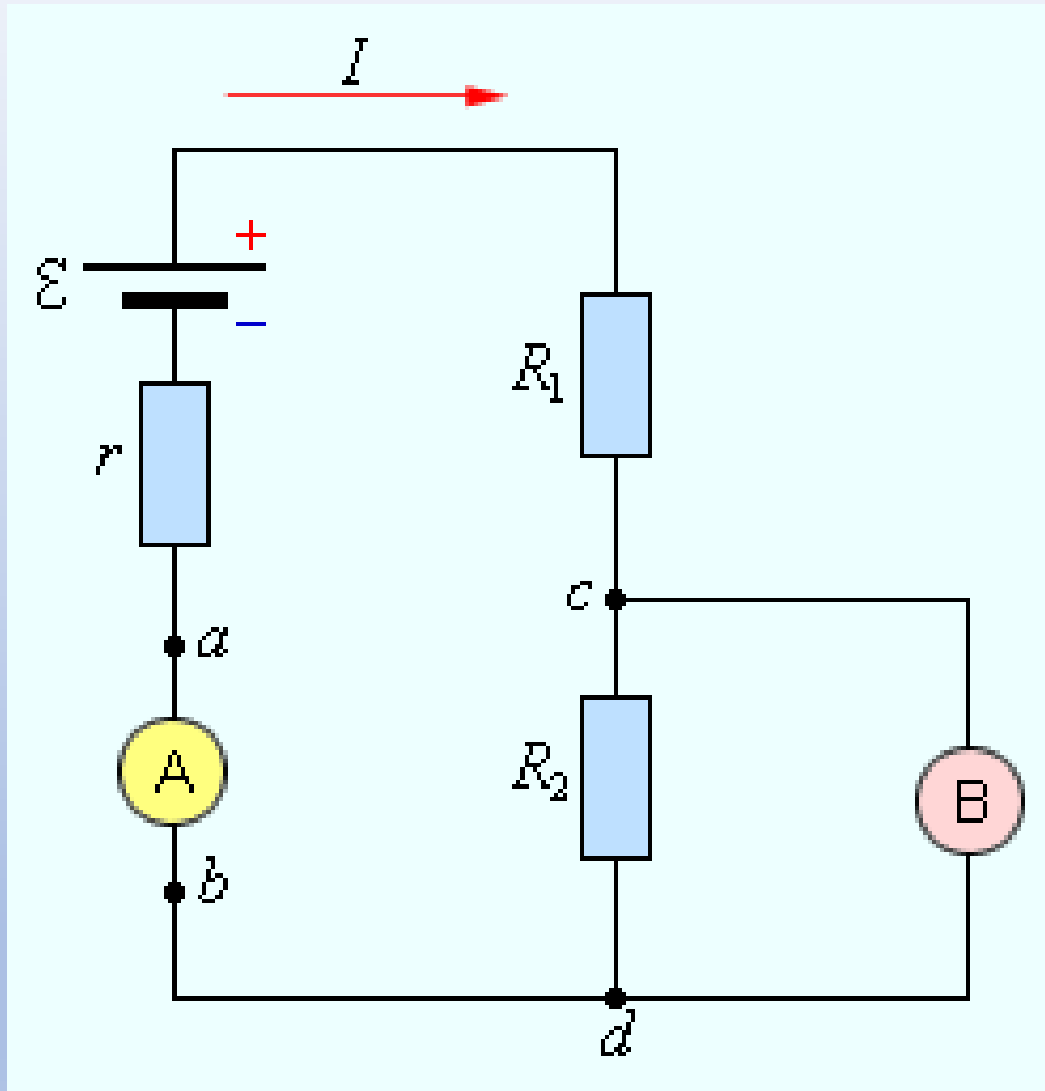
$$j dS = \frac{dS}{\rho dl} E dl \Rightarrow$$

$$j dS = \frac{dS}{\rho} E \Rightarrow j = \frac{1}{\rho} E$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \qquad [\gamma] = \frac{C_{\mathcal{M}}}{\mathcal{M}}$$

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \gamma \vec{E}$$

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}_{cm} = \gamma \vec{E}_{cm}$$



**Вмикання  
амперметра та  
вольтметра в  
електричне коло**

# Електричний опір

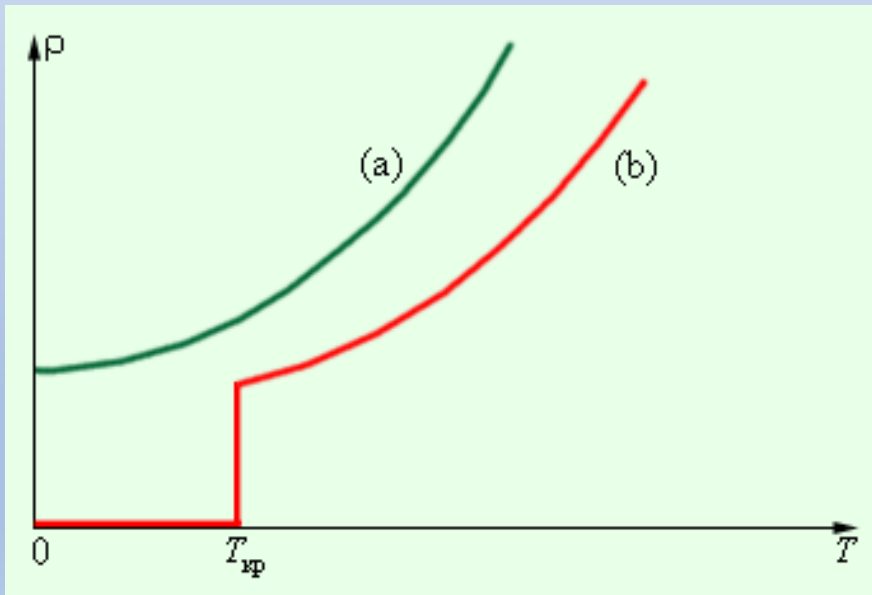
$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

$$[R] = \frac{1B}{1A} = 1Om$$

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

$\rho$

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



Залежність питомого опору  $\rho$  від абсолютної температури  $T$  при низьких температурах:

a – нормальний метал;

b – надпровідник

**Надпровідність** – це явище зникнення опору в речовині в околі низьких температур.

1911 р. – Камерлінг Оннес відкрив надпровідність для ртуті.

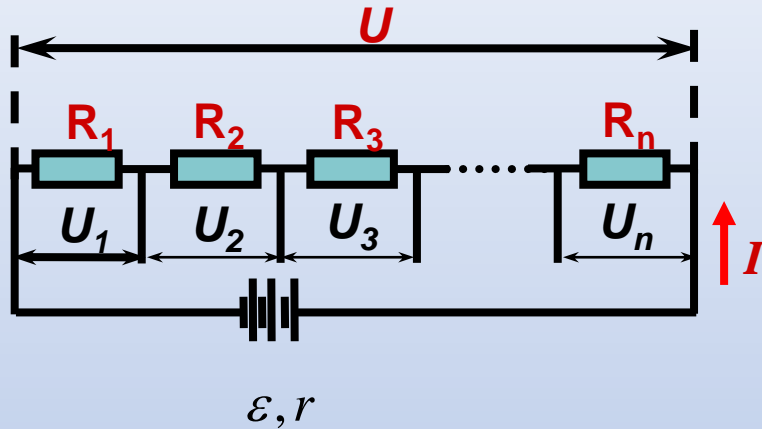
Пояснення надпровідності в рамках квантової теорії провідності - Дж.Бардін, Дж. Купер та Дж. Шріффер, 1957 р.

При деякій певній температурі  $T_{кр}$ , яка є різною для різних речовин, питомий опір стрибком зменшується до нуля. Критична температура у ртуті дорівнює 4,1 К, у алюмінію 1,2 К, у олова 3,7 К.

Надпровідність спостерігається не тільки у елементів, але й у хімічних сполук та сплавів.

Деякі речовини, що переходять при низьких температурах у надпровідний стан, не є провідниками за звичайних температур, тоді як такі «гарні» провідники, як мідь і срібло, не стають надпровідниками при низьких температурах.

### Послідовне з'єднання провідників

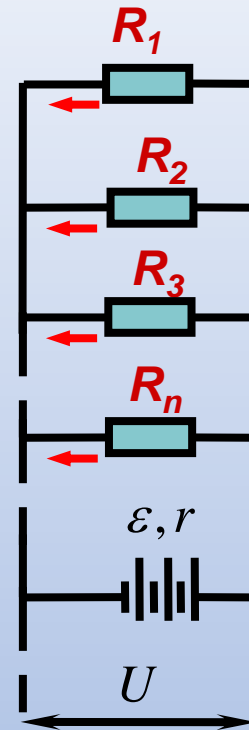


$$U = \sum_{i=1}^n U_i$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$$

$$R = \sum_{i=1}^n R_i$$

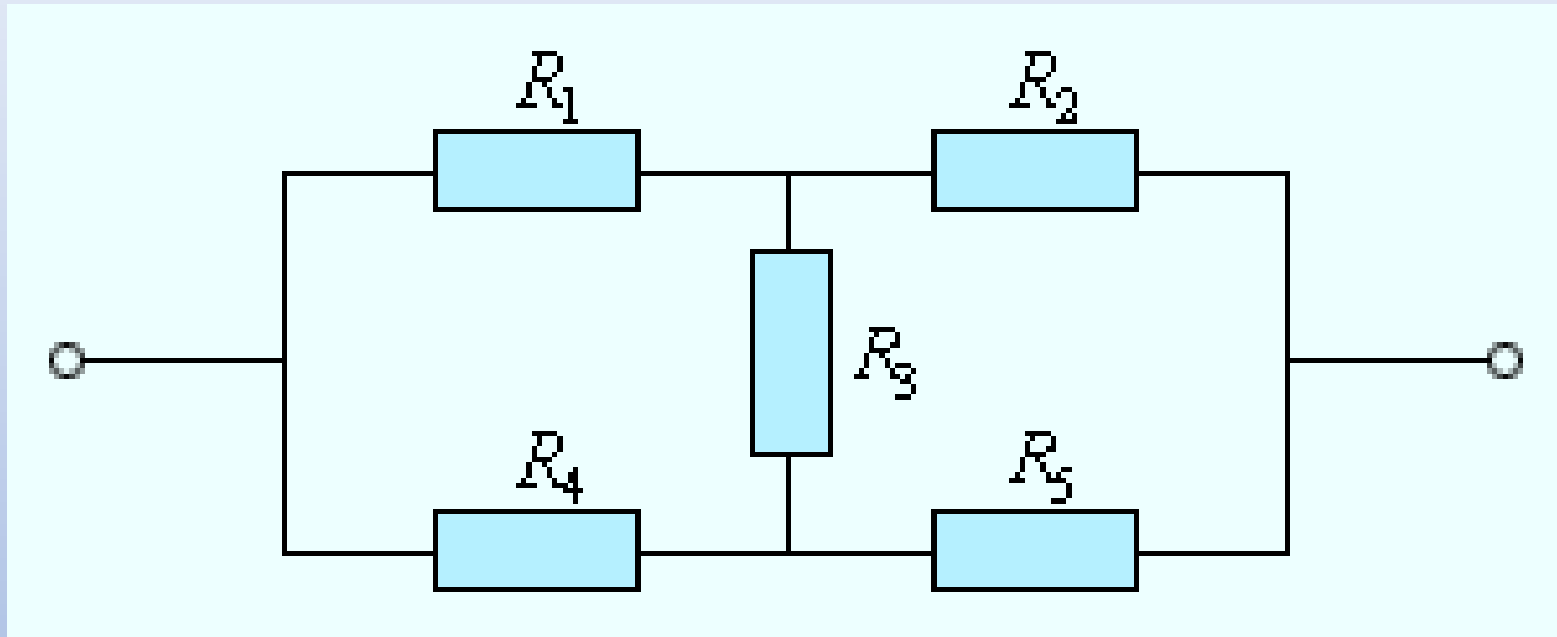
### Паралельне з'єднання провідників



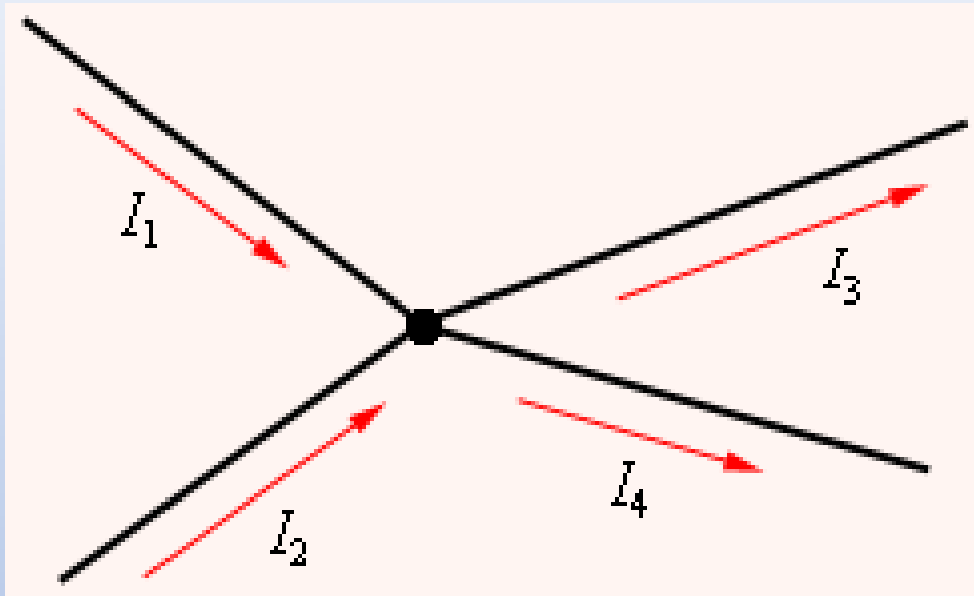
$$I = \sum_{i=1}^n I_i;$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n;$$

$$\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}$$



# Правила Кірхгофа



**Вузол  
електричного  
кола**

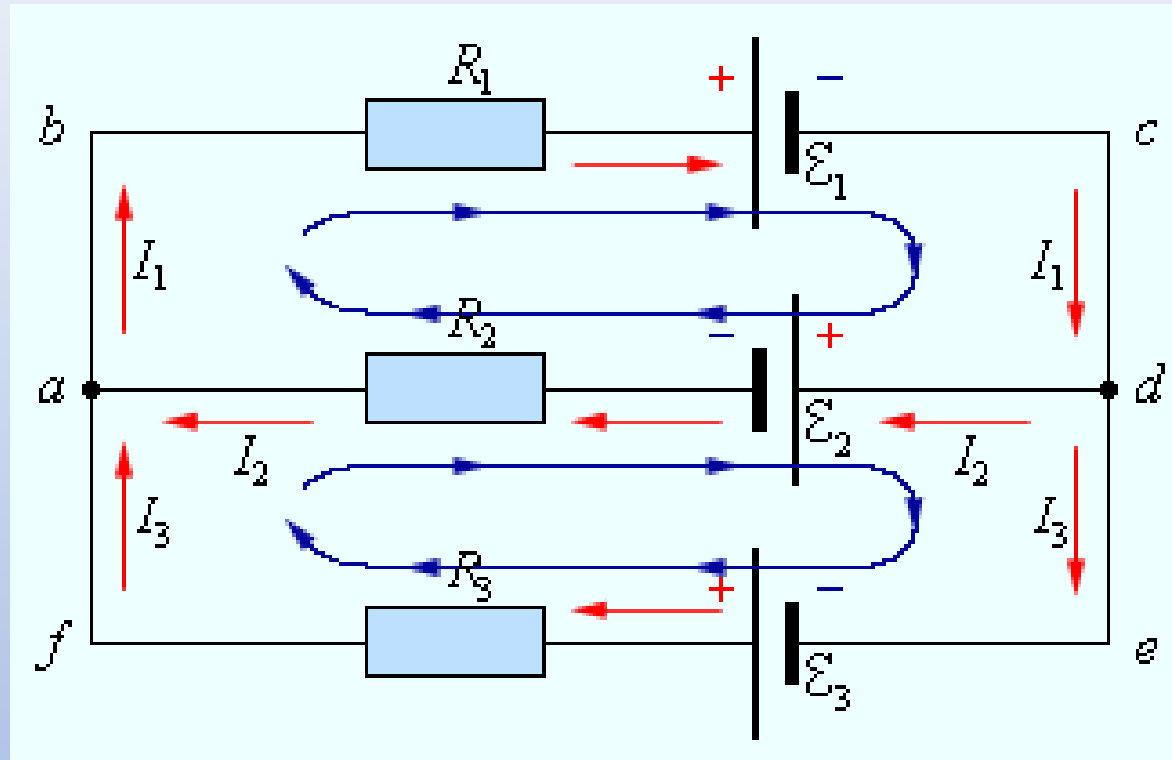
$$I_1, I_2 > 0;$$

$$I_3, I_4 < 0$$

**Перше правило Кірхгофа**

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

## Друге правило Кірхгофа

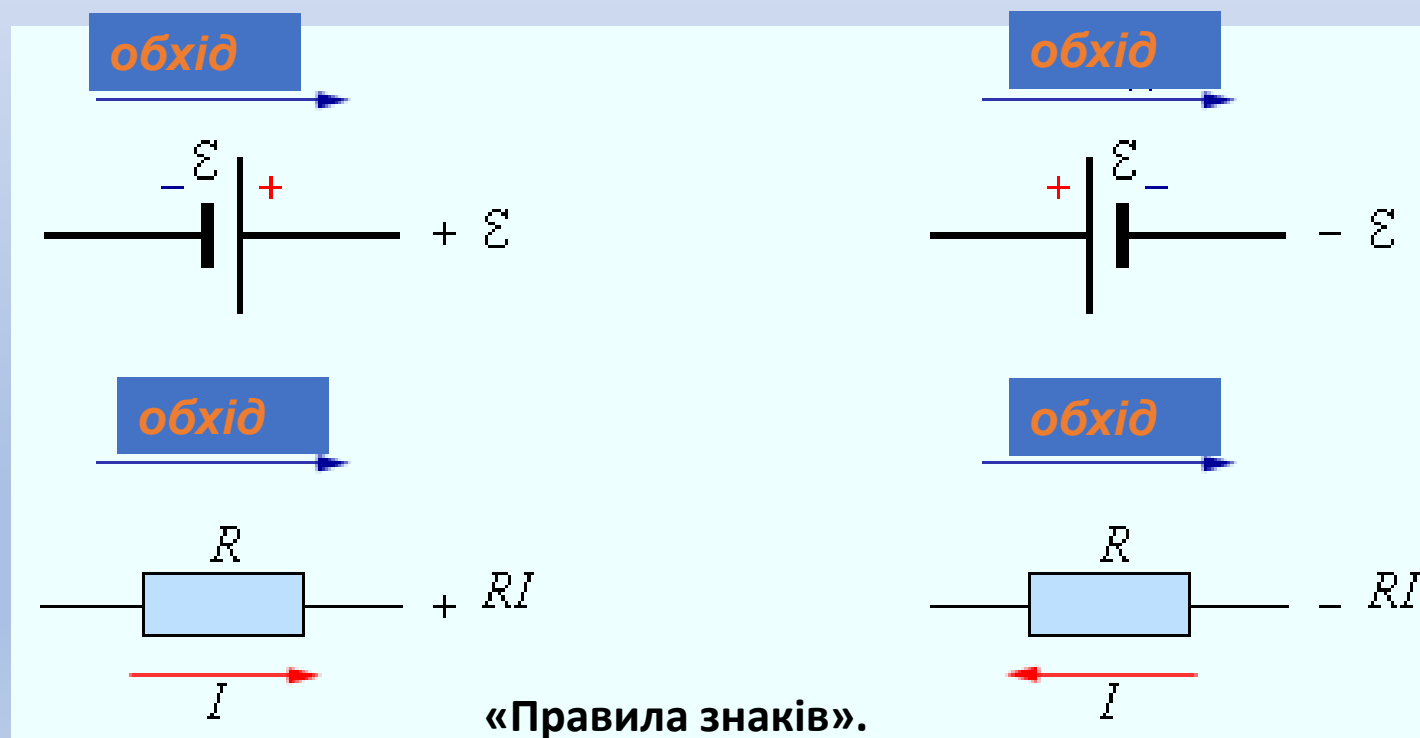


Коло містить один незалежний вузол ( $a$  або  $d$ ) та два незалежних контура (наприклад,  $abca$  і  $adef$ ).



# Друге правило Кірхгофа

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i$$



# ЗАКОН ДЖОУЛЯ – ЛЕНЦА

$$Q = I^2 R t$$

$$Q = I U t$$

$$Q = \int I^2 R dt$$

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

$$dV = dl \, dS \qquad I = j dS \qquad R = \rho \frac{d\ell}{dS} \qquad dt$$

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

$$Q_{\text{пит}} = \frac{dQ}{dt dV} \qquad [Q_{\text{пит}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^3} \qquad Q_{\text{пит}} = \rho j^2$$

$$P_{\text{дж}} = \xi I = \frac{\xi^2}{R + r} \qquad P = RI^2 = \frac{\xi^2 R}{(R + r)^2}$$

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

Ваші питання?!