



# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*  
Кафедра «Загальна електротехніка»

Професор, д-р техн. наук  
Болюх Володимир Федорович

<https://web.kpi.kharkov.ua/ze/uk/literatura/>

1. Болюх В. Ф. **Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки** : навч. посібник / В. Ф. Болюх, В. Г. Данько, Є. В. Гончаров ; ред. В. Г. Данько ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : Планета-Прінт, 2019. – 248 с.
2. Болюх В.Ф., Бондарук П.А., Коритченко К.В., Марков В.С., Поляков І.В., Шпінда Є.М **Електротехніка та електромеханіка**: Навчальний посібник – Харків: ВІТВ НТУ «ХПІ». – 2020. – 352 с.
3. **Збірник задач з електротехніки**: збірник задач / В. Ф. Болюх, К. В. Коритченко, В. С. Марков та інш.; за ред. В. Ф. Болюха. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 196 с
4. **Розрахунок електричних кіл та електротехнічних пристроїв** : навч. посібник/ В.Ф. Болюх, К.В. Коритченко, В.С. Марков, І.В. Поляков. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 288 с.
5. **Lectures on electrical engineering/** Text of lectures for students./ Volodymyr Boliukh, Kostyantyn Korytchenko, Vladyslav Markov and others., – Kharkiv, NTU«KhPI», 2023. – 272 p.

Електротехніка – галузь науки і техніки, яка пов’язана з практичним використанням електроенергії, що включає її виробництво, передачу, розподіл і споживання.

Носієм електроенергії є електромагнітне поле, створюване електричним струмом у провіднику.

Електромагнітне поле це є різновид матерії, який характеризується двома її сторонами – електричним полем і магнітним полем, і завдає силової дії на заряджені частинки, що залежить від їх швидкості і заряду.

### **Переваги електроенергії перед іншими видами енергії:**

універсальність, тобто можливість отримання злюбих інших видів енергії (хімічної, механічної, теплової, сонячної, ядерної та ін.) та, навпаки, можливість перетворення влюбий другий вид енергії;

можливість економічної передачі (зі швидкістю світла) на практично необхідну відстань, розподіл та споживання влюбій кількості;

надійність, відносна простота обслуговування, постійна готовність до дії;

екологічність та високі техніко-економічні показники електричних машин та апаратів електроустаткування;

можливість на базі електрифікації повної механізації та автоматизації виробництва.

**Особливістю електроенергії** є те, що вона не накопичується у вигляді готової продукції. Її виробництво електричними генераторами, передача за допомогою електричних мереж та споживання приймачами здійснюються роздільно, але одночасно. Це нерозривний та безперервний процес перетворення одних видів енергії в інші.

## Електричні кола постійного струму та їх структура

Електричне коло – це сукупність пристроїв та об'єктів, утворюючих шлях для електричного струму і призначених для отримання, передачі та перетворення електричної енергії, електромагнітні процеси в яких можуть бути описані за допомогою понять електрорушійної сили (ЕРС), струму та напруги.

### Елементи електричного кола :

1. джерела електроенергії (генератори, гальванічні елементи, термопари, батареї, фотоелементи та ін.);
2. споживачі електроенергії (електродвигуни, нагрівачі, лампи розжарювання, та ін.);
3. лінії зв'язку або електропередачі (двох-, трьох- чотирьохпровідні);
4. перетворювачі електроенергії (трансформатори, випрямлячі, інвертори);
5. комутаційна апаратура (ключі, контакти, захисна апаратура);
6. вимірювальні пристрої

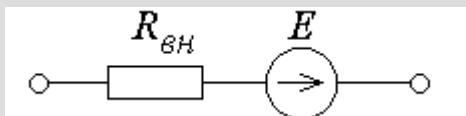


Схема заміщення джерела ЕРС

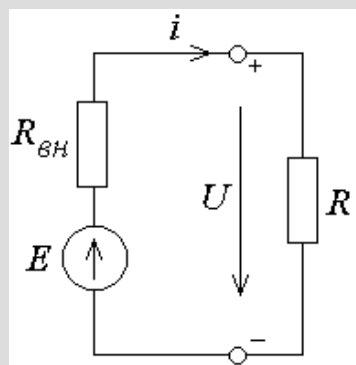


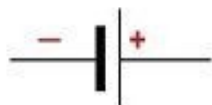
Схема електричного кола постійного струму

Сила струму  $I$  в електричному колі визначається кількістю електричного заряду  $q$ , що тече через переріз провідника за одну секунду:

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

## Условное обозначение элементов электрической цепи

источники  
тока



гальванический  
элемент



батарея

потребители



лампочка

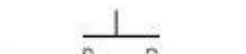


звонил



резистор

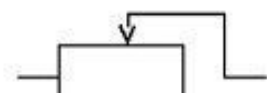
управляющие  
элементы



кнопка



ключ



реостат

соеди

(

пе

Выключатель	
Кнопочный выключатель	
Электрическая лампа накаливания	
Предохранитель	
Катушка	
Катушка с железным сердечником	
Амперметр	

Лампочка



Элемент № 8

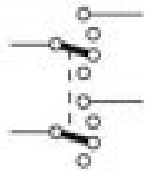
Выключатель



Насос/  
двигатель



Множительный  
выключатель



Заземление



Гнездо



Предохранитель



Датчик



Резистор



Диод



Переменный  
резистор



Разделение  
провода



Соединение



Соленоид

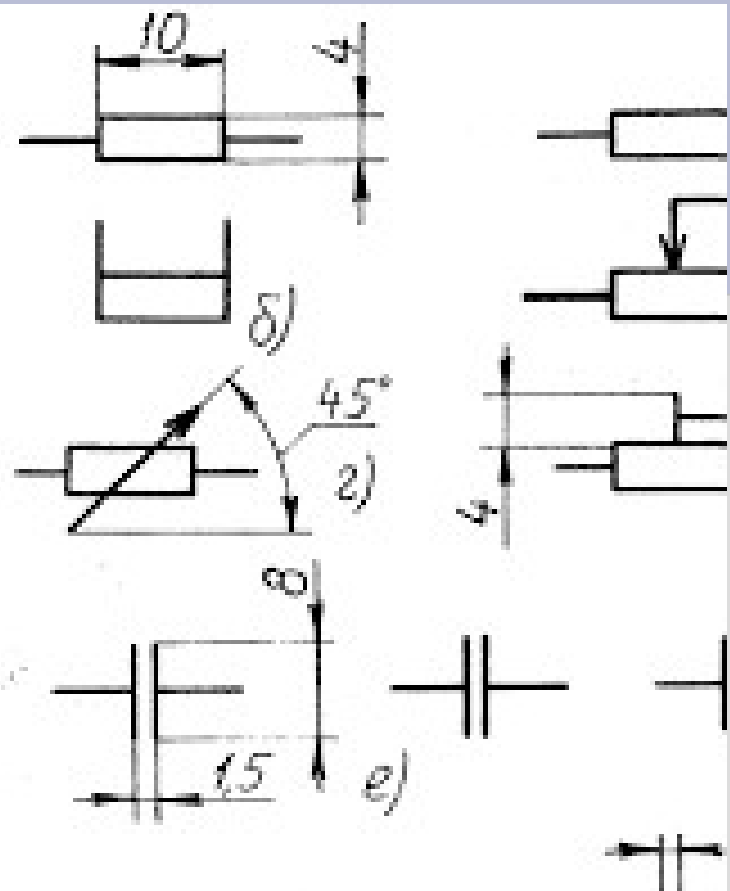


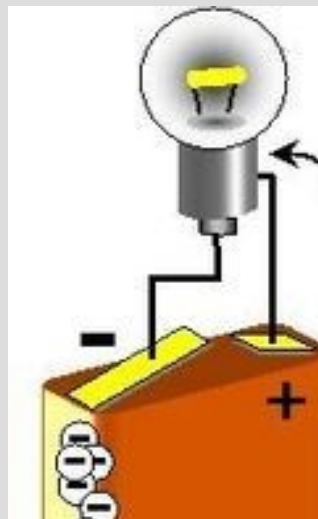
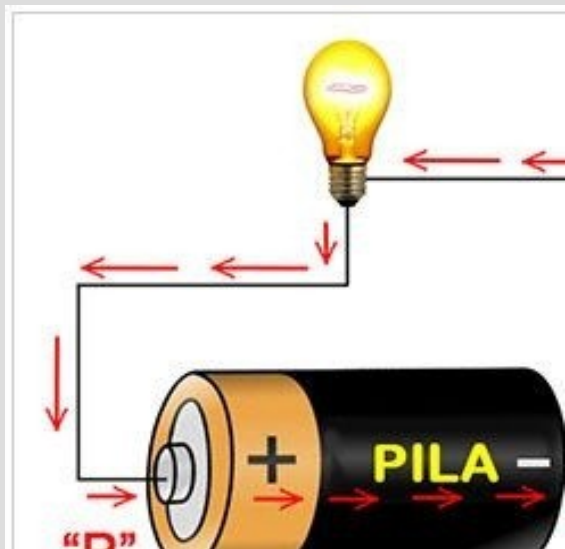
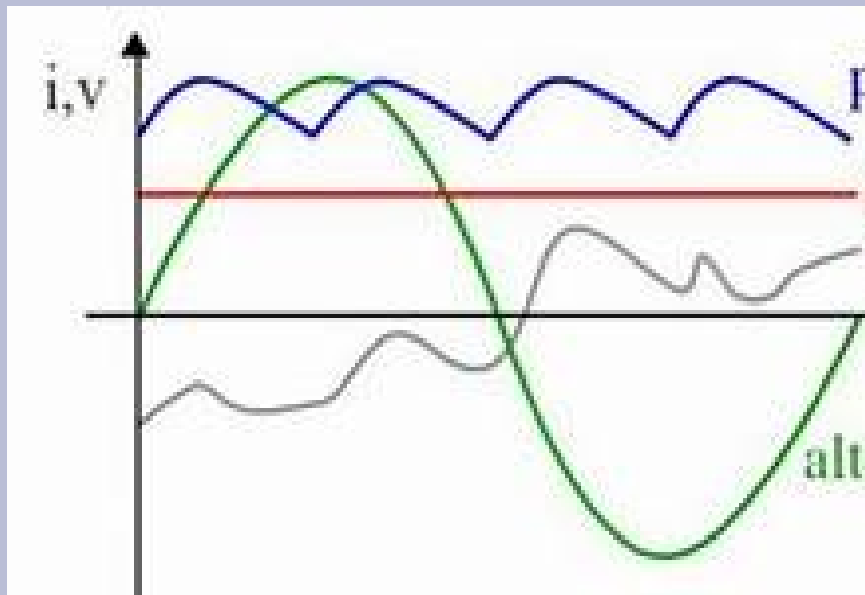
Экранированный кабель

Пунктирная рамка  
обозначает большой э

T8b/4 - идентификаци  
соединения

30 - идентификаци  
клеммы





Постійні значення електричних величин електричних кіл позначають прописними літерами:  
**струм  $I$ , ЕРС  $E$ , напруга  $U$ , потужність  $P$ .**

Змінні значення електричних величин позначають рядковими літерами:  
**струм  $i$ , ЕРС  $e$ , напруга  $u$ , потужність  $p$ .**

Якщо значення струму в електричному колі непостійне, змінюється у часі, то миттєве значення струму визначається виразом

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

**Схема заміщення електричного кола.**

**Умовно-позитивні напрямки електричних величин**

### **Закон Ома**

На пасивній ділянці електричного кола (без ЕРС), струм  $I$  пропорційний напрузі  $U$

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

$G = \frac{1}{R}$  – провідність ділянки електричного кола. Провідність вимірюється в сименсах (См).

Закон Ома для повного кола враховує всі опори кола та його ЕРС

$$I = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R}$$

Падінням напруги або просто напругою  $U$  на певній ділянці кола називається величина, яка чисельно дорівнює роботі, що здійснюється електричним полем при переміщенні одиничного позитивного заряду (від плюса до мінуса).

$$U = I \cdot R$$

## Джерела ЕРС та джерела струму

У **джерела ЕРС** внутрішній опір малий і напруга на його затисках при змінюванні струму від 0 до  $I_{НОМ}$  змінюється незначно

$$E = IR_{вн} + IR = IR_{вн} + U$$

$$U = E - IR_{вн}$$

До **джерел струму** відносять джерела електроенергії з великим внутрішнім опором, в яких струм у колі слабо залежить від напруги на приймачі при його змінюванні від 0 до номінального значення.

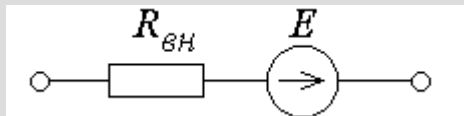


Схема заміщення джерела ЕРС

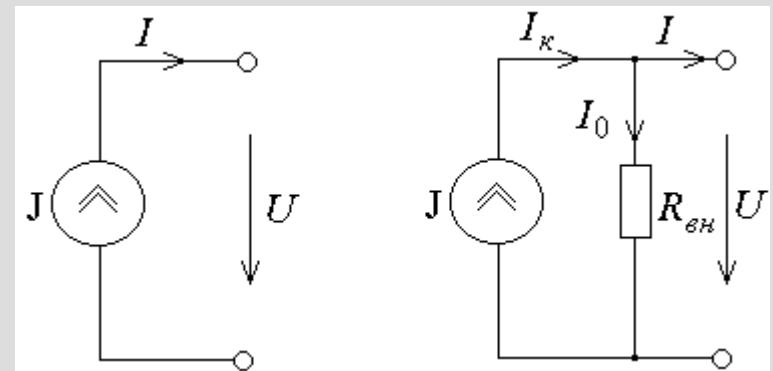
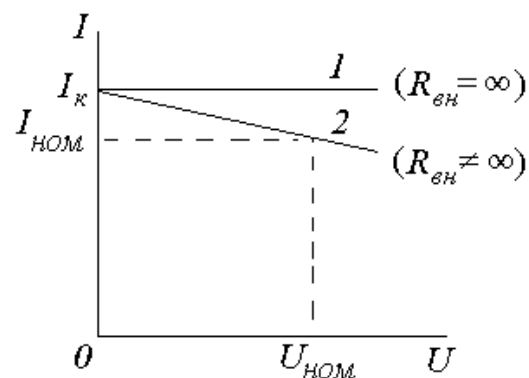
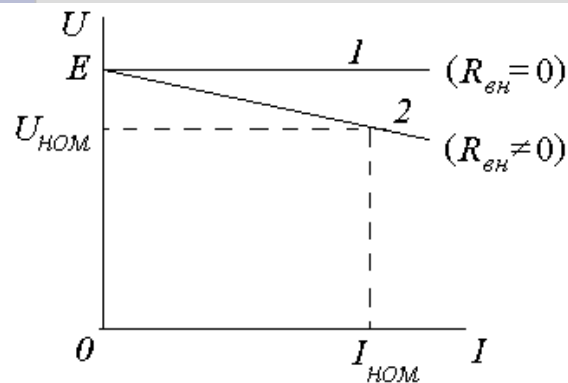


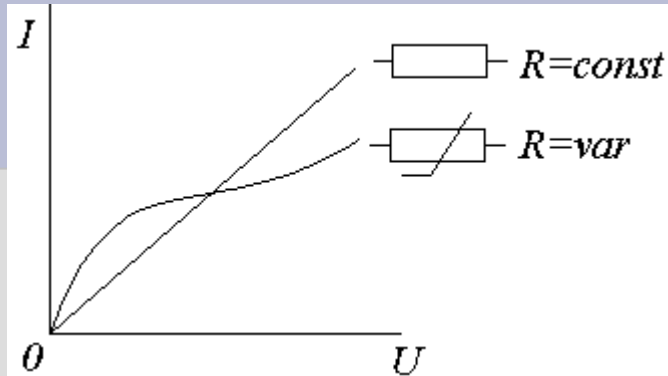
Схема заміщення ідеального (а) і реального (б) джерела струму



Зовнішні характеристики джерел ЕРС (а) і джерел струму (б):  
1 – ідеального; 2 – реального

**Опір  $R$**  характеризує властивість елемента незворотно перетворювати електроенергію джерела в інші види енергії, наприклад, у теплову

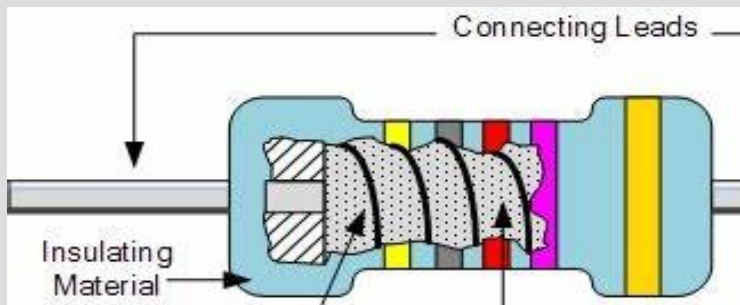
$$R = \frac{U}{I}$$



Лінійний опір ( $R = const$ ) залежить тільки від

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

де  $\rho$  – питомий опір (Ом·м);  $l$ ,  $s$  – довжина і переріз провідника



## Електротехнічні матеріали

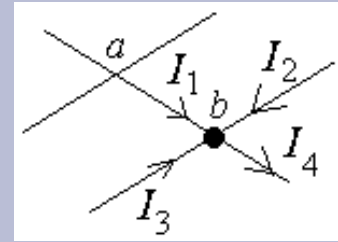
В електротехніці широко використовуються провідникові, ізоляційні, напівпровідникові та магнітні (ферромагнітні) матеріали.



**1-й закон Кірхгофа:** алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю

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

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4$$



**Вузол** – це точка електричного кола, в якій з'єднані не менше 3-х віток. Вузол на схемі позначається жирною точкою.

**Вітка** – це ділянка електричного кола, де всі елементи з'єднані послідовно, тобто по ним тече один струм.

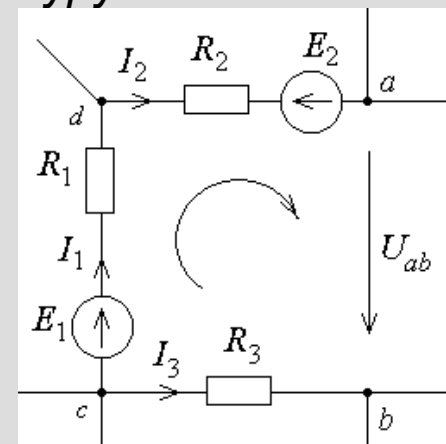
Будь-який замкнений путь, що проходить кількома ділянками, називається **контуром** електричного кола.

**2-й закон Кірхгофа:** алгебраїчна сума ЕРС, діючих вздовж будь-якого замкненого контуру розгалуженого електричного кола, дорівнює алгебраїчній сумі падінь напруг в усіх ділянках цього контуру

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m I_k R_k$$

Для складання рівняння за 2-м законом Кірхгофа необхідно:  
 обрати додатний напрям струмів;  
 обрати додатний напрям обходу контуру

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + U_{ab} - I_3 R_3$$



Ділянка електричного кола постійного струму

## Енергетичний баланс електричного кола

За законом збереження енергії:

Кількість тепла, що виділяється в опорах споживачів за одиницю часу, має дорівнювати кількості енергії, що за той самий час віддають джерела живлення.

$$\sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{k=1}^m I_k^2 R_k$$

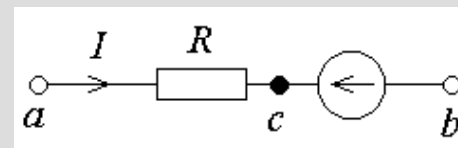
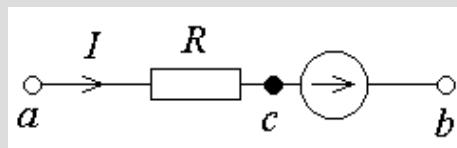
**Закон Джоуля-Ленца:** Визначає кількість електричної енергії  $W$ , перетвореної у теплову на ділянці кола з опором  $R$  за час  $t$

$$W = R \cdot I^2 t$$

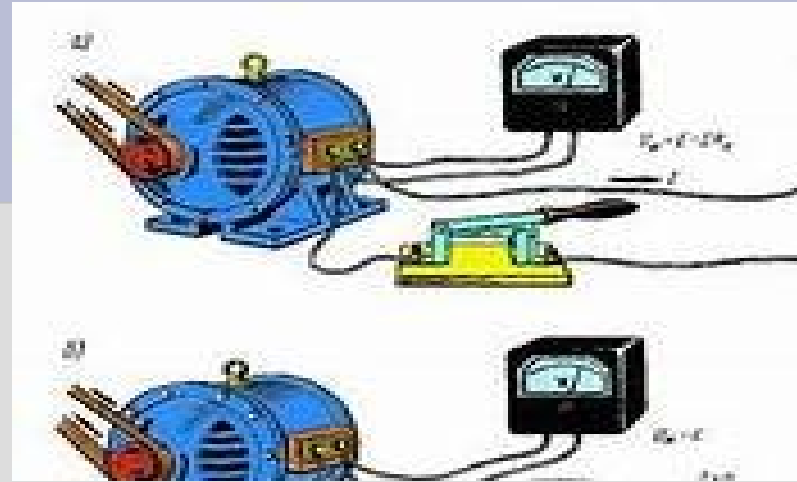
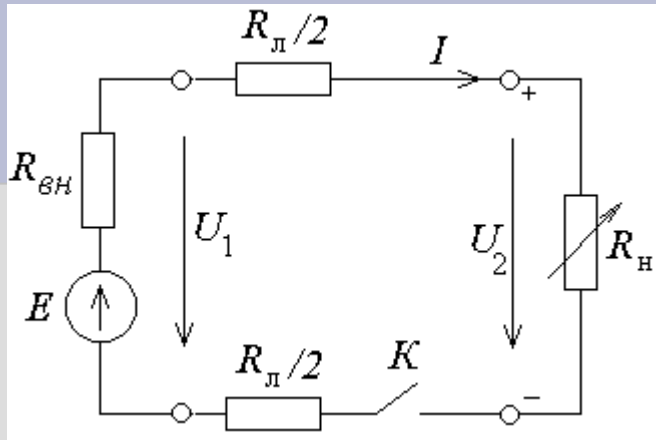
$$P = \frac{W}{t}$$

$P = I_k^2 R_k$  – за законом Джоуля-Ленца – це потужність, яку споживає опір  $R_k$ .  
 $E_k I_k$  – потужність джерела.

Алгебраїчна сума потужностей усіх джерел енергії дорівнює арифметичній сумі потужностей усіх приймачів.



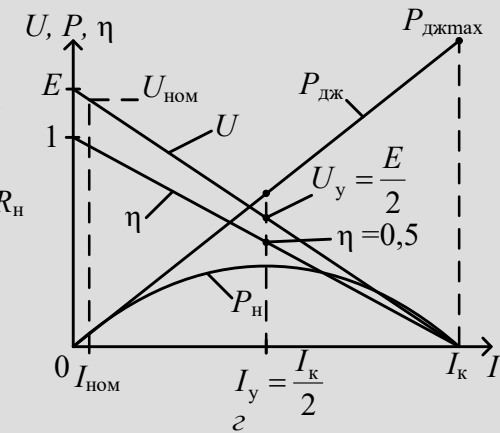
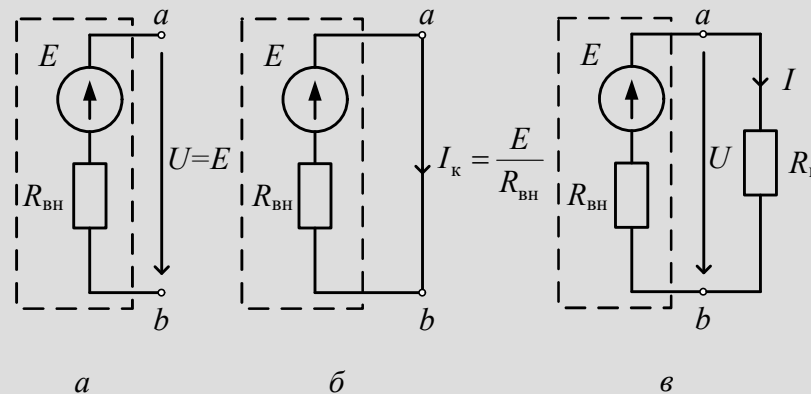
## Режими роботи електричного кола



**Номинальний** – це режим, в якому усі елементи електричного кола за нормальними умовами навколишнього середовища можуть виконувати своє функціональне призначення досить тривалий час із заданою надійністю. Режим характеризують номінальні: напруга  $U_{\text{НОМ}}$ , струм  $I_{\text{НОМ}}$ , потужність  $P_{\text{НОМ}}$  і ККД  $\eta_{\text{НОМ}}$ , які вказані у паспорті або на щитку пристрою.

$$I = \frac{E}{R_{\text{аі}} + R_{\text{е}} + R_i} \quad U = E - I(R_{\text{аі}} + R_{\text{е}}) \quad P_2 = I^2 R_i = \frac{E^2 R_i}{(R_{\text{аі}} + R_{\text{е}} + R_i)^2} \quad P_1 = EI = \frac{E^2}{R_{\text{аі}} + R_{\text{е}} + R_i}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{R_i}{R_{\text{аі}} + R_{\text{е}} + R_i}$$



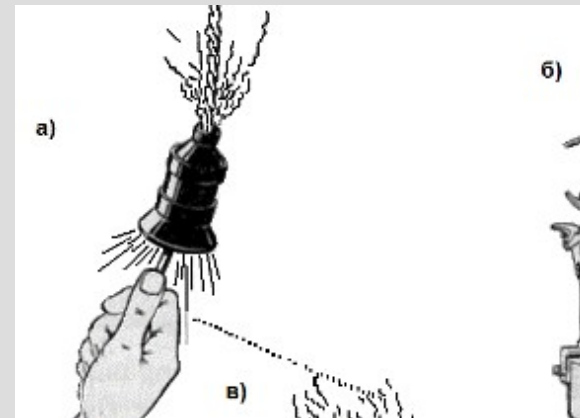
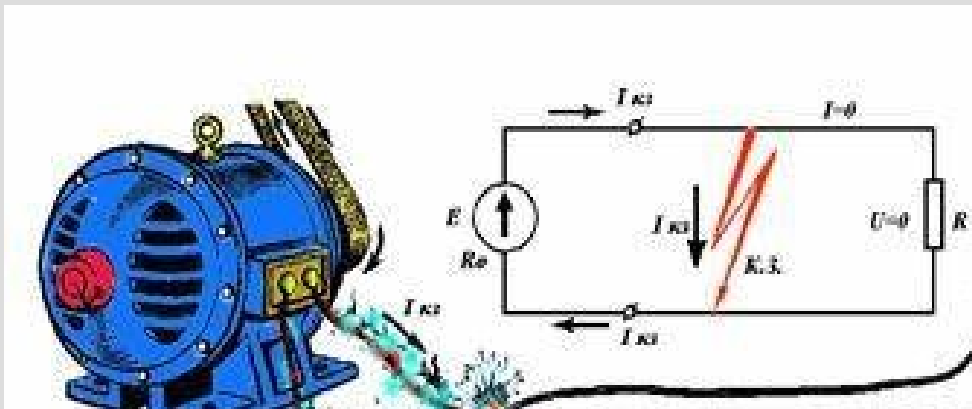
Неробочий хід (НХ) – це режим, в якому електричне коло розірване і струм відсутній  $I = 0$

$$U_1 = U_2 = E.$$

Коротке замикання (КЗ) – це режим, в якому опір приймача наближається до нуля, або провідником замкнуті його полюси, а також коли замкнуті провідники лінії або полюси джерела.

напруга приймача  $U_2 = 0$ , струм  $I_{кз} \gg I_{ном}$ .

$$I_k = \frac{U_1}{R_{\Sigma}} = \frac{E}{R_{ai} + R_e}$$



Узгодженим називають режим, в якому потужність, яку віддає джерело у зовнішнє коло, є максимальною, якщо змінною величиною є опір приймача. Режим є можливим при певних значеннях опору приймача  $R_H$ .

$$R_i = R_{ai} + R_e$$

При цьому ККД  $\eta = 0,5$ , а струм  $I_y = 0,5 I_{кз} \gg I_{ном}$ .

## МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

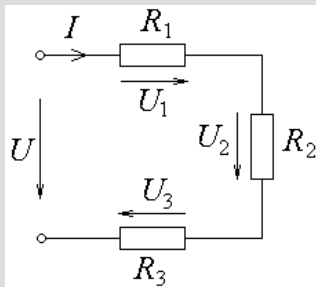
### Метод еквівалентного перетворення схем.

При розрахунку електричних кіл виникає необхідність замінити одну певну групу опорів еквівалентним опором або групою еквівалентних опорів.

### Умови еквівалентної заміни:

1. Потенціали всіх вузлів схеми, а відтак і напруги на ділянках мають залишитися незмінними.
2. Струми у гілках, які не зачеплені перетворюванням, мають залишитись незмінними.

### Коло з послідовним з'єднанням елементів

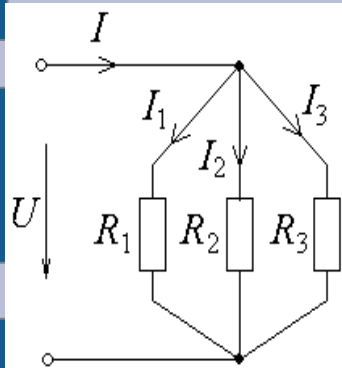


За другим законом Кірхгофа  $U = U_1 + U_2 + U_3$

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR_E \quad R_E = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_E = \sum_{i=1}^k R_i$$

## Коло з паралельним з'єднанням елементів



Струми у гілках за законом Ома  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ;  $I_2 = \frac{U}{R_2}$ ;  $I_3 = \frac{U}{R_3}$ ;

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = U$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}; \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{R_3}{R_2}$$

За першим законом Кірхгофа  $I = I_1 + I_2 + I_3$

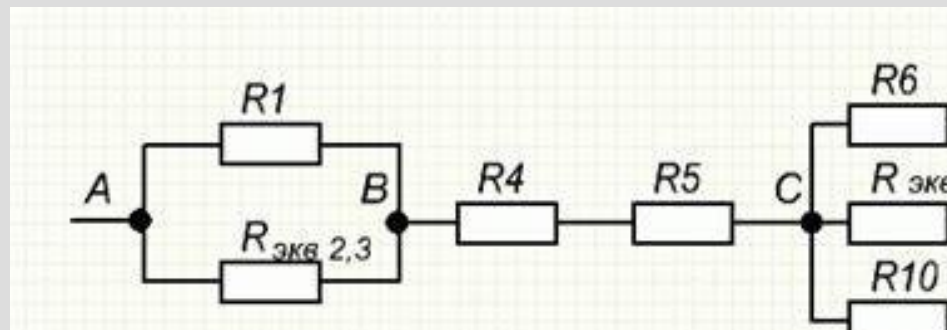
Струм у нерозгалуженій частині кола  $I = U/R_E$

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = \frac{U}{R_E}$$

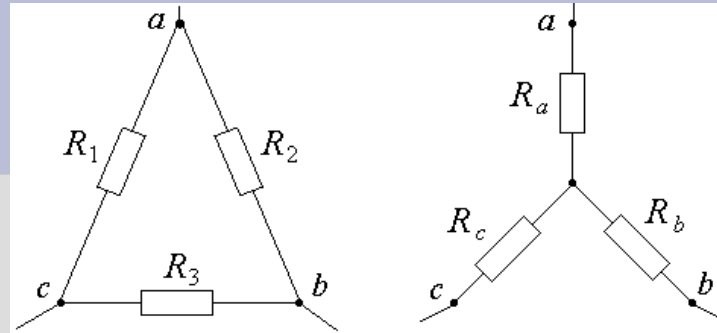
$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad G_E = G_1 + G_2 + G_3$$

$$\frac{1}{R_E} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{R_i} \quad G_E = \sum_{i=1}^k G_i$$

## Коло зі змішаним з'єднанням елементів



## Розрахунок електричного кола на підставі перетворення трикутника опорів в еквівалентну зірку і зворотно



З'єднанням елементів у трикутник та зірку

Перетворення трикутника опорів  $R_1$ ,  $R_2$  та  $R_3$  в еквівалентну зірку, що має опори  $R_a$ ,  $R_b$  та  $R_c$ , виконується за наступними виразами:

$$R_b = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad R_c = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

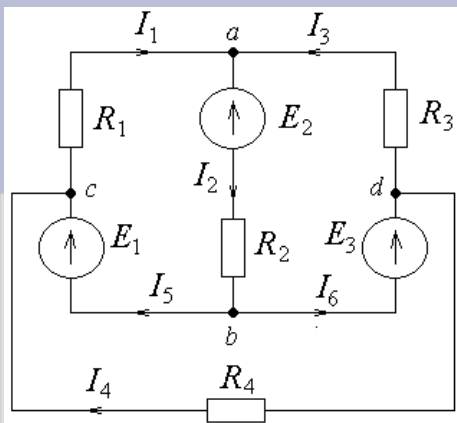
Перетворення зірки опорів  $R_a$ ,  $R_b$  та  $R_c$ , в еквівалентний трикутник з опорами  $R_1$ ,  $R_2$  та  $R_3$ , виконується наступним чином:

$$R_3 = R_c + R_b + \frac{R_c R_b}{R_a} \quad R_2 = R_b + R_a + \frac{R_b R_a}{R_c} \quad R_1 = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}$$

Якщо всі опори трикутника  $R_\Delta$  або зірки  $R_Y$  рівні між собою, то опори еквівалентної зірки або трикутника також будуть однаковими, причому

$$R_Y = R_\Delta / 3, \text{ а } R_\Delta = 3R_Y.$$

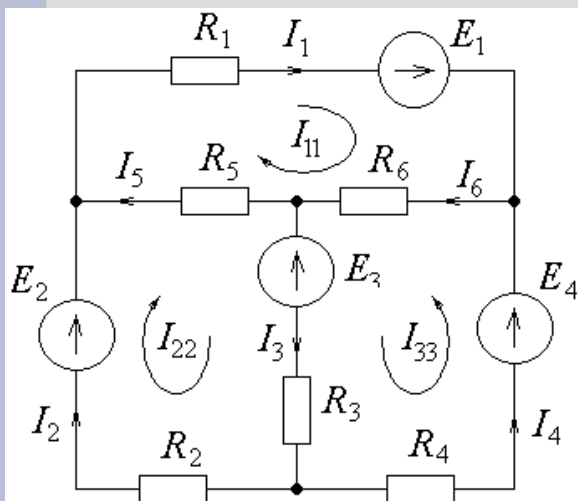
## Метод безпосереднього застосування законів Кірхгофа



За першим законом Кірхгофа можна скласти  $n-1$  рівнянь, де  $n$  – число вузлів електричного кола. Решта рівнянь ( $m-n+1$ ), яких не вистачає для вирішення задачі, необхідно скласти, використовуючи другий закон Кірхгофа.

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 + I_3 &= 0 & R_1 I_1 + R_2 I_2 &= E_1 - E_2 \\ I_2 - I_5 - I_6 &= 0 & R_2 I_2 + R_3 I_3 &= E_3 - E_2 \\ -I_1 + I_4 + I_5 &= 0 & R_1 I_1 - R_3 I_3 + R_4 I_4 &= 0 \end{aligned}$$

## Метод контурних струмів



$$I_1 = I_{11} \quad I_2 = I_{22} \quad I_4 = I_{33} \quad I_3 = I_{22} + I_{33} \quad I_5 = I_{11} - I_{22} \quad I_6 = I_{11} + I_{33}$$

Три контурні струми знаходяться з системи трьох рівнянь

$$\begin{cases} R_{11} \cdot I_{11} + R_{12} \cdot I_{22} + R_{13} \cdot I_{33} = E_{11}; \\ R_{21} \cdot I_{11} + R_{22} \cdot I_{22} + R_{23} \cdot I_{33} = E_{22}; \\ R_{31} \cdot I_{11} + R_{32} \cdot I_{22} + R_{33} \cdot I_{33} = E_{33}, \end{cases} \quad \begin{aligned} E_{11} &= E_1 & E_{22} &= E_2 - E_3 & E_{33} &= E_3 - E_4 \\ R_{12} &= R_{21} = -R_5, & R_{13} &= R_{31} = R_6, & R_{32} &= R_{23} = R_3 \\ R_{11} &= R_1 + R_5 + R_6 & R_{22} &= R_2 + R_3 + R_5 \\ R_{33} &= R_3 + R_4 + R_6 \end{aligned}$$

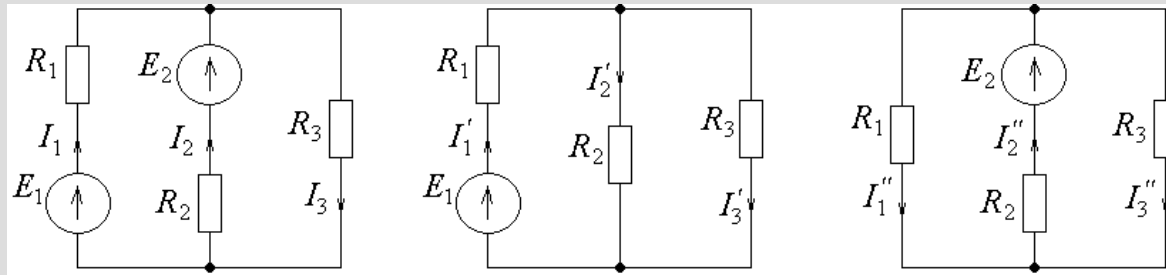
$$\text{Контурний струм} \quad I_{kk} = E_{11} \frac{\Delta k_1}{\Delta} + E_{22} \frac{\Delta k_2}{\Delta} + E_{33} \frac{\Delta k_3}{\Delta}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix} \quad \text{визначник системи}$$

$\Delta k_n = (\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3)$  – алгебраїчне доповнення, отримане з визначника  $\Delta$  через закреслення  $k$ -ої строчки та  $n$ -го стовпчика і помноження отриманого визначника на  $(-1)^{k+n}$

## Принцип і метод суперпозиції

Принцип суперпозиції (накладання) заснований на незалежній дії окремих ЕРС в лінійних колах. Цей принцип є справедливим тільки для лінійних електричних кіл. Принцип суперпозиції полягає в тому, що струм у будь-якій гілці являє собою суму струмів, створених кожною ЕРС схеми окремо.



Діючі значення струмів складного кола знаходяться як алгебраїчна сума часткових струмів, створених окремо кожною ЕРС. Так, для складної схеми (рис. а) діючі значення струмів дорівнюють:

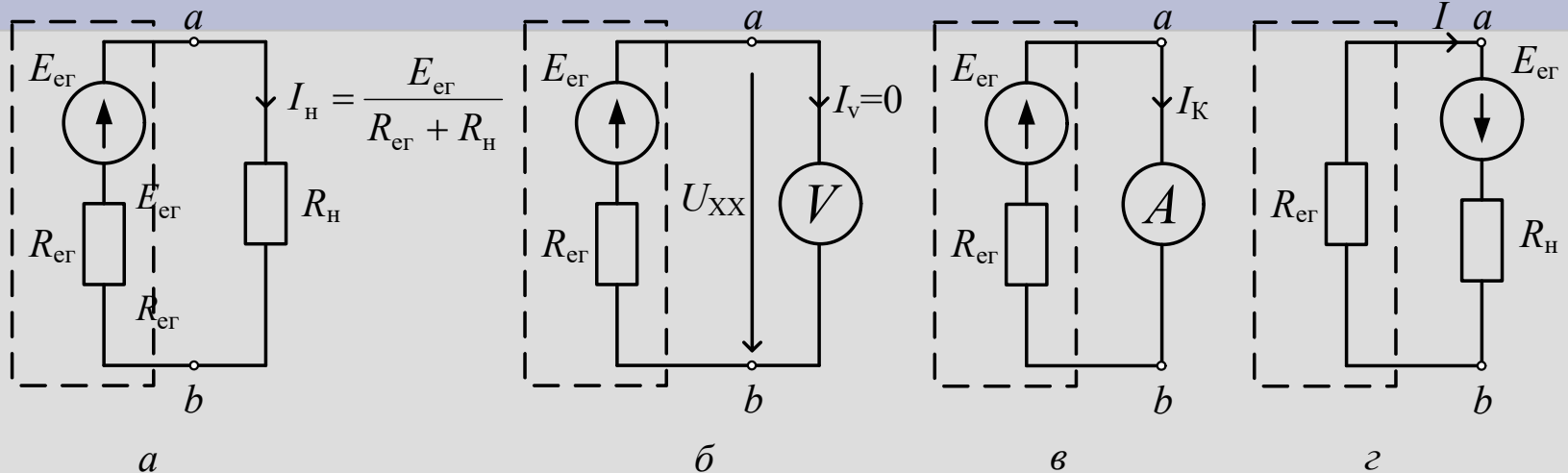
$$I_1 = I_1' - I_1'' \quad I_2 = I_2'' - I_2' \quad I_3 = I_3' + I_3''$$

$I_1', I_2', I_3'$  - часткові струми, які створюються ЕРС  $E_1$  та визначаються з простої схеми, зображеної на рис. б

$I_1'', I_2'', I_3''$  - часткові струми, які створюються ЕРС  $E_2$  та визначаються з простої схеми, зображеної на рис. в

## Метод еквівалентного генератора

Струм крізь будь-якого споживача  $R_H$  можна знайти, замінивши все електричне коло, з яким з'єднаний цей споживач, активним двополюсником з  $E_{ер}$  і  $R_{ер}$



ЕРС еквівалентного генератора і його внутрішній опір

між затискачами  $a$  і  $b$ , яку можна або виміряти (рис. б), або розрахувати.

$E_{ер}$  дорівнює напрузі неробочого ходу  $U_{xx}$

Провівши дослід короткого замикання (рис. в), визначаємо  $R_{ер} = \frac{E_{ер}}{I_K} = \frac{U_{xx}}{I_K}$

Опір  $R_{ер}$  можна визначити і розрахунковим шляхом, якщо вилучити з активного двополюсника джерело ЕРС (рис. г), перетворивши його на пасивний.

***Thanks for your attention***