

**Розділ I. Кола постійного струму**  
**Тема 1.1 «Електричне поле. Постійний електричний струм»**

**Лекція 2**

Електричний струм, електричний опір. Електричне коло та його основні елементи. Закон Ома. Прості електричні кола та методи їх розрахунку при послідовному, паралельному та змішаному з'єднанні резисторів

**Мета:** оволодіти знаннями про електричний струм, електричний опір. Розглянути основні елементи електричного кола. Повторити закон Ома

**Методи:** словесний, практичний, наочний.

**План:**

1. Електричний струм.
2. Електричний опір.
3. Електричне коло та його основні елементи. Закон Ома.
4. Прості електричні кола та методи їх розрахунку при послідовному, паралельному та змішаному з'єднанні резисторів.

**1. Електричний струм.**

Електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок.

Умови виникнення та існування електричного струму:

1. У середовищі повинні бути вільні заряджені частинки.
2. Необхідна наявність електричного поля.

Залежно від здатності проводити електричний струм всі речовини й матеріали поділяють на *провідники, діелектрики та напівпровідники*.

**Провідники** — речовини та матеріали, які добре проводять електричний струм.

Провідниками є метали (як у твердому, так і в рідкому стані), графіт, водні розчини солей (наприклад, кухонної солі), кислот і лугів. Висока електрична провідність провідників пояснюється наявністю в них великої кількості вільних заряджених частинок. Так, у металевому провіднику частина електронів, залишивши атоми, вільно «мандрує» по всьому його об'єму, і кількість таких електронів сягає  $10^{23}$  в кубічному сантиметрі. Волога земля, тіло людини або тварини добре проводять електричний струм, бо містять речовини, що є провідниками.

**Діелектрики** — речовини та матеріали, які погано проводять електричний струм.

Діелектриками є багато твердих речовин (ебоніт, порцеляна, гума, скло та ін.), рідин (дистильована вода, гас, спирт, бензин та ін.) і газів (кисень, водень, азот, вуглекислий газ та ін.). У діелектриках майже відсутні вільні заряджені частинки. Провідники й діелектрики широко застосовують у промисловості, побуті, техніці. Так, проводи, якими підводять електричний струм від електростанцій до споживачів, виготовляють із металів — хороших провідників. При цьому на опорах проводи розташовують на ізоляторах, — це запобігає стіканню електричного заряду в землю.

**Напівпровідники** — це речовини, які займають проміжне місце між провідниками та діелектриками.

Зазвичай вони погано проводять електричний струм і їх можна віднести до діелектриків. Однак якщо підвищити температуру або збільшити освітленість, у напівпровідниках з'являється достатня кількість вільних заряджених частинок і напівпровідники стають провідниками. Напівпровідники використовують для виготовлення радіоелектронної апаратури, сонячних батарей.

**2. Електричний опір.**

Електричний опір — це фізична величина, яка характеризує протидію електричному струму в провіднику.

Твердий металевий провідник являє собою систему з кристалічної іонної решітки в середині якої знаходиться електронний газ з вільних колективізованих електронів. Від кожного атома металу у вільний стан переходить від одного до двох електронів.

Причиною наявності опору у провідника є зіткнення рухомих електронів з іонами кристалічної решітки металевого провідника. Внаслідок цієї взаємодії електрони втрачають частину своєї енергії, тобто електрони ніби «відчують» опір своєму руху.

Різні металеві провідники мають відмінності в будові кристалічної решітки, і через це мають різний опір електричному струму.

Тобто електричний опір – це властивість матеріалу провідника перешкоджати проходженню через нього електричного струму.

Прилади, які мають опір і включаються в електричне коло для обмеження або регулювання струму, називаються резисторами та реостатами.

Електричний опір вимірюють в омах (Ом) і позначають літерою R.

$$[R] = 1 \text{ Ом}$$

**1 Ом** – це опір провідника, в якому при напрузі на його кінцях в 1 вольт виникає сила струму 1 ампер.

Оскільки електричний опір – це характеристика самого провідника, тоді опір залежить від:

- довжини провідника
- поперечного перерізу провідника (площа фігури, що утворюється при поперечному розрізі)
- роду речовини, з якого виготовлено провідник (залежність опору провідника від речовини визначається величиною, що називається питомим опором  $\rho$ )

Експериментальним шляхом було встановлено:

- при збільшенні довжини провідника опір збільшується пропорційно (це пояснюється тим, що руху електронів в металах заважають іони, що становлять кристалічну решітку. Чим їх більше, тобто чим довше провідник, тим більше в електрона шансів уповільнити свій рух)

- при збільшенні перерізу провідника опір зменшується пропорційно (при збільшенні поперечного перерізу для електронів «дорога стає більш широкою», кількість зіткнень з вузлами кристалічної решітки зменшується. Тобто чим дріт товще, тим опір менше)

- при збільшенні питомого опору речовини опір провідника збільшується пропорційно.

Отже, опір провідника прямо пропорційний довжині провідника, обернено пропорційний площі поперечного перерізу і залежить від речовини, із якого виготовлено провідник:

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

де  $\ell$  – довжина провідника  $[\ell] = 1 \text{ м}$ ;

$S$  – площа поперечного перерізу провідника  $[S] = 1 \text{ м}^2$ ;

$\rho$  – питомий опір речовини.

### Питомий опір

Фізичний зміст питомого опору – це опір провідника довжиною 1 м та площею поперечного перерізу  $1 \text{ мм}^2$ .

Одиниця вимірювання питомого опору  $[\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Але оскільки площа перерізу провідника зазвичай дуже мала, то її вимірюють не в квадратних метрах ( $\text{м}^2$ ), а в квадратних міліметрах ( $\text{мм}^2$ ), тому

$$[\rho] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

$$\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Варто запам'ятати:

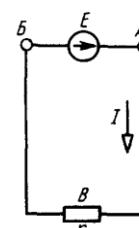
Нижче приведено таблицю значень питомого опору, що були отримані експериментальним шляхом для різних речовин.

| Питомий електричний опір $\rho$ деяких речовин (при $t = 20^\circ\text{C}$ ) |                                                      |            |                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------|
| Речовина                                                                     | $\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ | Речовина   | $\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ |
| Срібло                                                                       | 0,016                                                | Нікелін    | 0,40                                                 |
| Мідь                                                                         | 0,017                                                | Константан | 0,50                                                 |
| Золото                                                                       | 0,024                                                | Ртуть      | 0,96                                                 |
| Алюміній                                                                     | 0,028                                                | Ніхром     | 1,1                                                  |
| Вольфрам                                                                     | 0,055                                                | Графіт     | 13,0                                                 |
| Залізо                                                                       | 0,10                                                 | Фарфор     | $10^{19}$                                            |
| Свінець                                                                      | 0,21                                                 | Ебоніт     | $10^{20}$                                            |

Значення питомого опору потрібні для практичного застосування речовин. Речовини з великим питомим опором використовуються для ізоляційних матеріалів, а з маленьким – для провідників. Через те, що дорогоцінні метали мають найменший питомий опір, їх використовують для пайки особливо важливих елементів в електротехніці.

### 3. Електричне коло та його основні елементи. Закон Ома.

Впорядкований рух електрично заряджених часток (або електричний струм) в провідниках виникає під дією сил електричного поля. Для виникнення струму необхідне замкнене електричне коло. Найпростіше коло складається із джерела енергії з ЕРС  $E$ , приймача електричної енергії з опором  $r$  та з'єднувальних проводів. Окрім джерел та приймачів електричні кола мають велику кількість допоміжних елементів, які виконують різноманітні функції. До них відносяться вимикачі та перемикачі, електровимірювальні прилади, захисні прилади та ін. На мал. 1 подана схема найпростішого електричного кола.



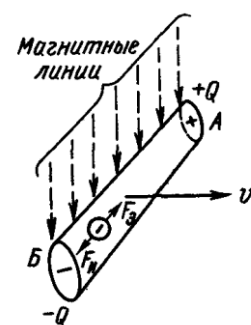
Мал. 1

В джерелах електричного струму, які називають також джерелами ЕРС, електрична енергія отримується з механічної, хімічної, теплової та ін. При перетворенні будь-якого виду енергії в електричну в джерелах утворюється електрорушійна сила (ЕРС).

До джерел енергії відносяться електричні генератори, первинні елементи і акумулятори, термоелементи та фотоелементи.

До приймачів електричної енергії відносяться електродвигуни, лампи розжарювання, нагрівальні прилади та ін.

**ЕРС.** Основним джерелом електричної енергії є електричний генератор. На його обертальній частині – якорі, який рухається в магнітному полі, розташована обмотка. На мал. 2 показаний прямолінійний провідник АБ цієї обмотки, який рухається з постійною швидкістю  $v$  в однорідному магнітному полі. З курсу фізики відомо, що на електрично заряджені частки, які рухаються в магнітному полі, діють сили електромагнітної індукції (сторонні сили)  $F_H$ . Такі сили діють і на електрони провідника АБ, пересуваючи їх на кінець Б. В результаті тут утворюється надлишковий електричний заряд  $-Q$ . На кінці провідника АБ внаслідок нестачі електронів з'являється позитивний заряд  $+Q$ . Заряди  $-Q$  і  $+Q$  всередині провідника утворюють електричне поле, сили поля  $F_E$  будуть діяти протилежно силам електромагнітної індукції  $F_H$ . Отже, результуюча сила, яка діє на кожний електрон провідника АБ,  $F = F_H - F_E$ .



Мал. 2

З розділом і накопиченням електричних зарядів на кінцях провідника АБ збільшується сила  $F_E$  і зменшується результуюча сила  $F$ . Коли сили електричного поля повністю врівноважать сили електромагнітної індукції, пересування електрично заряджених часток в провіднику АБ припиниться.

В джерелі ЕРС на пересування електричних зарядів витрачається деяка робота  $A_H$ . В електричних генераторах вона здійснюється за рахунок сил неелектричного походження (сторонніх сил).

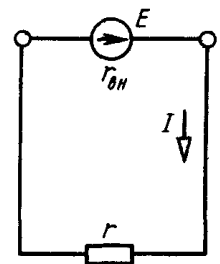
Відношення роботи  $A_H$ , яка здійснюється сторонніми силами при переносі зарядженої частинки всередині джерела, до її заряду називається **електрорушійною силою джерела енергії**:

$$E = \frac{A_H}{Q}$$

Якщо  $Q = 1$  Кл, то  $E = A_H$ .

Отже, ЕРС чисельно дорівнює роботі, яку здійснюють сили електромагнітної індукції при переносі одиниці заряду на ділянці АБ. ЕРС вимірюється в В.

**Закон Ома для електричного кола.** На мал. 3 зображене нерозгалужене електричне коло, де  $E$  – ЕРС джерела енергії,  $r_{BH}$  – внутрішній опір джерела;  $r$  – зовнішній опір джерела кола, тобто опір приймача енергії;  $I$  – сила струму в колі.



Мал. 3

По всіх ділянках нерозгалуженого кола проходить однаковий струм. Всі перераховані величини пов'язані один з одним. Цей зв'язок вперше був установлений у 1827 р. німецьким фізиком Г.С.Омом і називається законом Ома, який формулюється наступним чином: сила струму  $I$  в колі прямо пропорційна електрорушійній силі  $E$  джерела електричної енергії і обернено пропорційна повному опору  $R$  кола, тобто

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

Повний опір кола дорівнює сумі зазвичай малого внутрішнього опору  $r_{BH}$  джерела електроенергії і відносно великого опору зовнішнього кола  $r$ , тобто

$$R = r_{BH} + r$$

Визначимо ЕРС джерела:

$$E = IR = I(r_{BH} + r) = Ir_{BH} + Ir$$

де  $Ir_{BH} = U_{BH}$  – внутрішнє падіння напруги;  $Ir = U$  – зовнішня напруга на затискачах генератора.

Таким чином,

$$E = U_{BH} + U$$

тобто ЕРС генератора дорівнює сумі внутрішнього падіння напруги в ньому і напруги на його затискачах.

**Закон Ома для ділянки кола.** Струм на ділянці кола можна визначити наступним чином:

$$I = \frac{U_{BH}}{r_{BH}} \text{ і } I = \frac{U}{r}$$

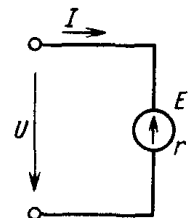
Ці формули виражають закон Ома для ділянки кола: сила струму на ділянці кола прямо пропорційна падінню напруги на цій ділянці і обернено пропорційна його опору. Таким чином, в простому нерозгалуженому колі струм  $I$  можна визначити по закону Ома для всього кола і для будь-якої його ділянки.

При визначенні струму активного приймача необхідно враховувати два параметри: опір –  $r$  і зустрічну ЕРС  $E$ , яка виникає в приймачі при його роботі (мал. 4). В цьому випадку напруга джерела врівноважує проти-ЕРС і внутрішнє падіння напруги, тобто

$$U = E + Ir$$

Отже, струм активного приймача

$$I = \frac{(U-E)}{r}$$

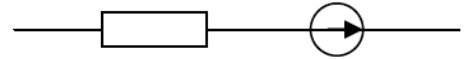


Мал. 4

#### 4. Прості електричні кола та методи їх розрахунку при послідовному, паралельному та змішаному з'єднанні резисторів.

Розглядаючи схеми будь – яких електричних кіл, можна виділити в них характерні ділянки: гілки, вузли, контури.

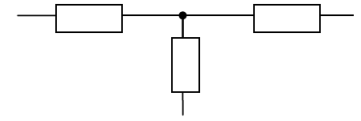
Гілка – ділянка електричного кола, яка складається з одного або декількох послідовно з'єднаних елементів, струм вздовж яких в визначений момент часу має одне значення.



Гілка починається і закінчується в вузлі.

Вузол – місце з'єднання трьох і більше гілок.

Гілки, які приєднані до першої пари вузлів, називаються паралельними.



Контур електричного кола – це будь – який замкнений шлях, який проходить крізь ряд гілок і вузлів.

Розрізняють: внутрішні і зовнішні контури. Контури, які не включають в себе інші контури, називаються внутрішніми.

В електричних колах застосовують три види з'єднання резисторів: послідовне, паралельне, змішане.

**Послідовним** з'єднанням (мал. 5) називається таке з'єднання, при якому через усі елементи кола проходить один і той самий струм.

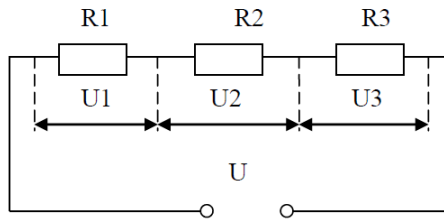
При такому з'єднанні на кожному резисторі відбувається спад напруги, який визначається законом Ома. Загальна напруга складається із сум напруг у колі:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

$$R_{\text{заг}} = R_1 + R_2 + R_3$$

Для замкненого кола, згідно з законом Ома

$$I = \frac{E}{R_i + R_{\text{заг}}}$$



Мал. 5. Послідовне з'єднання резисторів

Якщо в рівнянні загальної напруги обидві частини помножити на  $I$ , то дістанемо

$$UI = U_1I + U_2I + U_3I,$$

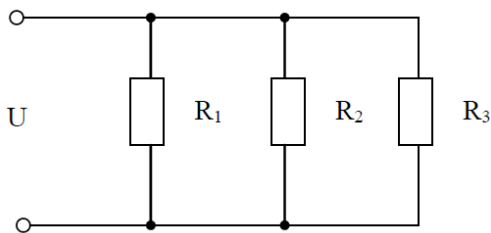
звідки

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

Загальна потужність кола дорівнює сумі потужностей послідовно з'єднаних резисторів. Потужності на цих резисторах розподіляються прямо пропорційно опорам резисторів:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_1}{R_2}, \text{ а також } \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

**Паралельним** з'єднанням резисторів (мал. 6) називається таке з'єднання, при якому кілька резисторів включено між двома загальними точками, і струм у колі розгалужується.



Мал. 6. Паралельне з'єднання резисторів

Напруги на паралельних ділянках кола однакові і дорівнюють напрузі між вузлами:

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

Загальна провідність усіх паралельних гілок:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Струми в паралельних гілках розподіляються обернено пропорційно їх опорів:

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

Для  $m$  паралельно з'єднаних резисторів з однаковими опором, загальний опір:

$$R = R1 / m,$$

де:  $R1$  - величина опору одного резистора,

$m$  – кількість гілок з однаковими опором.

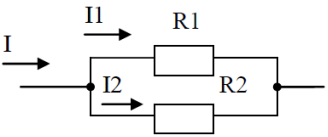
Для двох паралельно з'єднаних резисторів загальний опір:

$$R_{\text{заг}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

струми в гілках:  $U = R_{\text{заг}} I$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{R_{\text{заг}} I}{R_1} = I \frac{R_1 R_2}{R_1 (R_1 + R_2)} = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{R_{\text{заг}} I}{R_2} = I \frac{R_1 R_2}{R_2 (R_1 + R_2)} = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



Правило розкиду

**Мішане з'єднання** – це таке з'єднання, при якому в електричному колі є і послідовне, і паралельне з'єднання резисторів.

При розрахунках таких кіл розглядають окремі ділянки кола послідовного та паралельного з'єднань і застосовують відповідні формули.

**Алгоритм розрахунку:**

1. Визначення еквівалентних опорів.

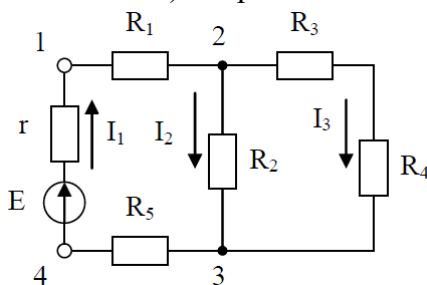
На схемі (мал. 7) опори  $R_3$  та  $R_4$  ввімкнені послідовно. Ці два опори можна замінити одним (еквівалентним), визначив його як суму  $R_3 + R_4 = R_{3,4}$ .

Після такої заміни утворюється більш проста схема (мал. 8). опори  $R_2$  та  $R_{3,4}$  з'єднані паралельно, їх можна замінити одним (еквівалентним), визначив його по формулі:

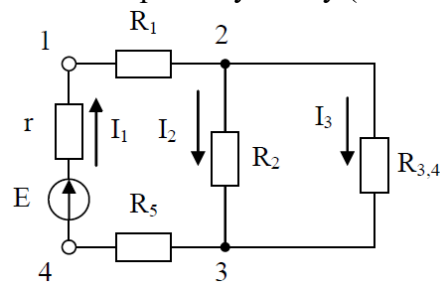
$$R_{2-4} = \frac{R_2 R_{3,4}}{R_2 + R_{3,4}}$$

і отримати більш просту схему (мал. 9).

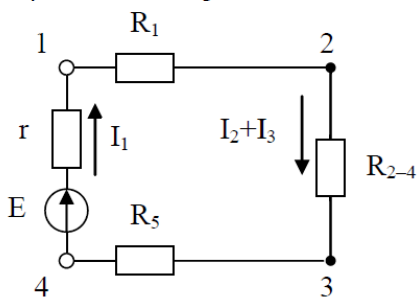
В схемі мал. 9 опори  $R_1$ ,  $R_{2-4}$ ,  $R_5$  з'єднані послідовно. Замінивши ці опори одним (еквівалентним) опором між точками 1 і 4, отримаємо найпростішу схему (мал. 10).



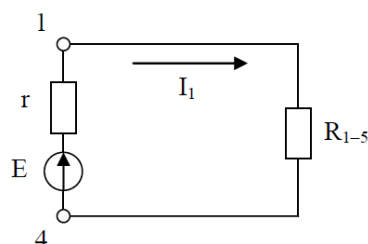
Мал. 7



Мал. 8



Мал. 9



Мал. 10

Подібним перетворенням схему мішаного з'єднання пасивних елементів з одним джерелом енергії в більшості випадків можна привести до найпростішої схеми. В більш складних схемах методом еквівалентних опорів досягається спрощення, яке значно полегшує розрахунок.

## 2. Визначення струмів.

В найпростішій схемі (мал. 10) струм визначається по закону Ома для повного кола. Струми в інших гілках первісної схеми визначають, переходячи від схеми до схеми в зворотному порядку.

### 1 спосіб визначення струмів:

Зі схеми 9 бачимо, що  $I_1 = I_2 + I_3$ .

Крім того, напруга між точками 2 і 3:

$$U_{2-3} = I_1 \cdot R_{2-3}$$

Знаючи цю напругу, легко визначити струми  $I_2$  та  $I_3$ :

$$I_2 = U_{2-3} / R_2; I_3 = U_{2-3} / R_{3,4}$$

### 2 спосіб визначення струмів:

За законом Ома визначаємо струм  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{E}{R_{1-5} + r}$$

За правилом розкиду визначаємо струми  $I_2$  та  $I_3$ :

$$I_2 = I_1 \frac{R_{3,4}}{R_2 + R_{3,4}}$$

$$I_3 = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_{3,4}}$$

## Знання, корисні для практики!

Властивості паралельного з'єднання елементів електричного кола широко використовують у техніці та побуті. Так, усі побутові електроприлади розраховані на однакову робочу напругу 220 В, тому їх приєднують до електромережі паралельно (при паралельному з'єднанні напруга на окремих елементах та кінцях ділянки однакова). Також споживачів можна вмикати і вимикати незалежно один від одного, тому вихід із ладу одного приладу не впливає на роботу інших.

Проте при паралельному з'єднанні елементів кола загальна сила струму дорівнює сумі струмів у окремих споживачів. Тому не можна одночасно вмикати потужні побутові прилади (електрочайник, праску, бойлер), оскільки загальна сила струму в нерозгалуженій ділянці електричного кола буде значною. Відповідно, виділятиметься велика кількість теплоти, і виникає небезпека пошкодження провідників, виходу з ладу пристроїв та виникнення пожежі (мал. 11).



Мал. 11. Перевантаження за паралельного з'єднання споживачів електричного струму