

## Заняття (практичне) № 11

### Тема: ПОТУЖНІСТЬ, РОБОТА, ЕРС

#### **Як визначити роботу і потужність електричного струму.**

Розглянемо ділянку кола, на яку подано напругу  $U$  і в якій тече постійний електричний струм силою  $I$ . Це може бути будь-який провідник: обмотка електродвигуна, стовп йонізованого газу в лампі денного світла, спіраль нагрівального елемента праски тощо. Якщо за деякий час  $t$  через поперечний переріз провідника проходить заряд  $q$ , то електричне поле виконує роботу  $A = qU$ .

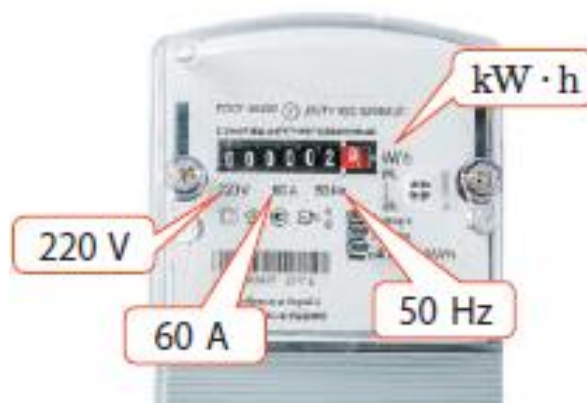
Подавши заряд  $q$  через силу струму  $I$  і час  $t$  ( $q = It$ ), отримуємо формулу для розрахунку роботи електричного струму на даній ділянці кола:

$$A = UIt$$

Одиниця роботи струму в СІ — джоуль:

$$[A] = 1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \quad (1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}).$$

В електротехніці використовують позасистемну одиницю роботи струму — кіловат-годину:  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$  ( $1 \text{ кВт} \cdot \text{h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ ). Саме в таких одиницях подає роботу струму лічильник електричної енергії.



На електролічильнику наявні значення ще трьох фізичних величин. Одна з них показує, до кола з якою напругою слід приєднувати електролічильник, друга — максимально допустиму силу струму в приладі, третя — частоту змінного струму в мережі. За значеннями перших двох величин визначають максимально допустиму потужність споживачів, які можна підключити через електролічильник.

Потужність струму  $P$  — фізична величина, яка чисельно дорівнює роботі струму за одиницю часу:

$$P = \frac{A}{t},$$

де  $A$  — робота, виконана струмом за час  $t$ .

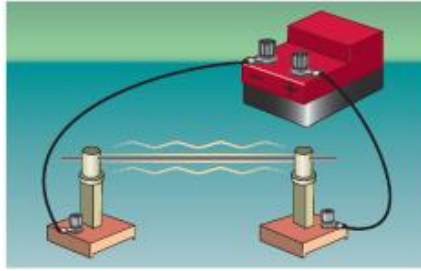
Врахувавши, що  $A = UIt$ , маємо:

$$P = UI,$$

де  $U$  — напруга на ділянці кола, на якій визначають потужність струму;  $I$  — сила струму в ділянці.

#### **Закон Джоуля — Ленца**

Будь-який провідник під час проходження струму нагрівається. Це відбувається тому, що вільні заряджені частинки в провіднику розганяються електричним полем і, зіштовхуючись з іншими частинками, передають їм частину своєї кінетичної енергії. Унаслідок цього внутрішня енергія провідника збільшується — провідник нагрівається.



Зрозуміло, що температура провідника зі струмом не може зростати нескінченно, адже шляхом теплопередачі він віддає частину отриманої енергії навколишнім тілам. Що вища температура провідника, то більше енергії він віддає. Із часом кількість теплоти, що виділяється в провіднику, дорівнюватиме кількості теплоти, яка віддається довкіллю, і провідник припинить нагріватися.

Закон, що визначає кількість теплоти, яка виділяється в провіднику зі струмом і яку він віддає довкіллю, незалежно один від одного експериментально встановили англійський фізик Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889) і російський фізик Емілій Християнович Ленц (Генріх Ленц) (1804–1865). Згодом цей закон отримав назву **закон Джоуля — Ленца**:

Кількість теплоти  $Q$ , яка виділяється в провіднику зі струмом, прямо пропорційна квадрату сили струму  $I$ , опору  $R$  провідника та часу  $t$  проходження струму:

$$Q = I^2 R t$$

Проаналізувавши закон Джоуля — Ленца, доходимо висновку: якщо в різних ділянках кола сила струму однакова, то в ділянці, що має більший опір, виділяється більша кількість теплоти. Отже, збільшивши опір певної ділянки кола, можна досягти того, що майже вся теплота буде виділятися саме тут. Так працюють електронагрівальні пристрої, нагрівальний елемент яких має невелику площу поперечного перерізу і виготовлений із матеріалу з великим питомим опором (ніхром, константан). А от підвідні проводи, навпаки, мають порівняно велику площу поперечного перерізу й виготовлені із матеріалу з малим питомим опором (мідь, алюміній, сталь). Унаслідок цього опір підвідних проводів набагато менший, ніж опір нагрівального елемента, і тому вони майже не нагріваються.

### Приклад розв'язування задач

Електродвигун дитячого електромобіля живиться від батареї акумуляторів, напруга на виході якої є незмінною і становить 12 В. Сила струму в обмотці двигуна — 6 А. Визначте опір обмотки, якщо ККД ( $\eta$ ) двигуна 80 %. Втратами енергії на тертя знехтуйте.

*Аналіз фізичної проблеми.* Для розв'язання задачі скористаємося формулою для визначення ККД. Втратами енергії на тертя нехтуємо, тому електрична енергія (вона дорівнює роботі струму) витрачається на корисну (механічну) роботу та нагрівання обмотки двигуна внаслідок проходження струму:

$$A_{\text{повна}} = A_{\text{кор}} + Q.$$

Дано:  
 $U = 12 \text{ В}$   
 $I = 6 \text{ А}$   
 $\eta = 80\% = 0,8$

$R = ?$

Пошук математичної моделі, розв'язання.

За означенням ККД:  $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}}$ .

Оскільки  $A_{\text{повна}} = UIt$ , а  $A_{\text{кор}} = A_{\text{повна}} - Q$ , де  $Q = I^2Rt$  за законом Джоуля — Ленца, то  $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}} = \frac{UIt - I^2Rt}{UIt}$ . Після скорочення на

$It$  маємо:  $\eta = \frac{U - IR}{U}$ . Звідси отримаємо формулу для визначення опору обмотки:  $R = \frac{U(1 - \eta)}{I}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[R] = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}; \quad R = \frac{12 \cdot (1 - 0,8)}{6} = 0,4 \text{ (Ом)}.$$

Відповідь:  $R = 0,4 \text{ Ом}$ .

## Які сили називають сторонніми

Якщо на кінцях металевого дроту створити різницю потенціалів, наприклад приєднати кінці дроту до пластин зарядженого конденсатора, то під дією кулонівських сил  $\vec{F}_{\text{кул}}$  електрони всередині провідника почнуть рухатися напрямлено і в провіднику виникне електричний струм. Але такий струм швидко припиниться (рис. 4.1).

Щоб струм існував тривалий час, необхідно якимось чином безперервно «перетягувати» електрони на негативно заряджену пластину. Таке «перетягування» не може відбуватися під дією кулонівських сил, які, навпаки, заважають рухові електронів, адже однойменні заряди відштовхуються. Слід використати сили іншого — не електростатичного (не кулонівського) — походження.

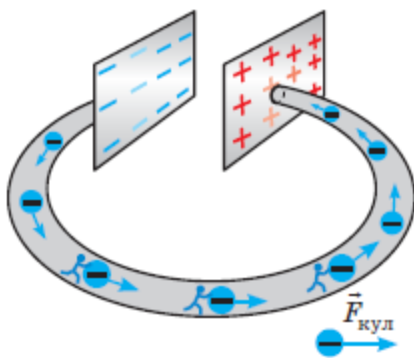


Рис. 4.1. Під дією кулонівських сил електрони рухаються в провіднику від негативно зарядженої пластини до позитивно зарядженої, внаслідок чого пластини втрачають заряд (стають електрично нейтральними)

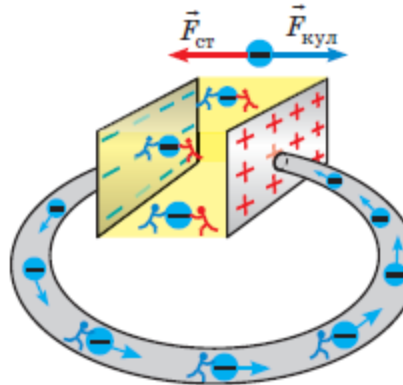


Рис. 4.2. Усередині джерела струму завдяки дії сторонніх сил  $\vec{F}_{\text{ст}}$  негативні заряди переміщуються від позитивного полюса до негативного, тобто в напрямку, протилежному напрямку кулонівських сил, які також діють усередині джерела

Будь-які сили, що діють на електрично заряджені частинки і не є кулонівськими, називають **сторонніми силами**.

Сторонні сили «працюють», наприклад, усередині джерела струму (рис. 4.2). Природа сторонніх сил може бути різною: вони можуть виникати внаслідок хімічних реакцій (у гальванічних елементах і акумуляторах), під час змінення магнітного поля (в

електромагнітних генераторах, електричних двигунах), завдяки дії світла (у фотоелементах, світлодіодах) тощо.

Якщо приєднати споживач до джерела струму, отримаємо повне електричне коло (рис. 4.3). На внутрішній ділянці цього кола «працюють» сторонні сили, які підтримують постійну різницю потенціалів на виході джерела. На зовнішній ділянці кулонівські сили створюють напрямлений рух вільних заряджених частинок — у споживачі та в з'єднувальних проводах тече постійний електричний струм.

Дія сторонніх сил подібна до дії помпи, яка змушує воду рухатися в напрямку, протилежному силі тяжіння, і підніматися на певну висоту. А от униз вода рухається під дією сили тяжіння, подібно до того як під дією кулонівських сил рухаються вільні електрони в зовнішній ділянці електричного кола (рис. 4.4).

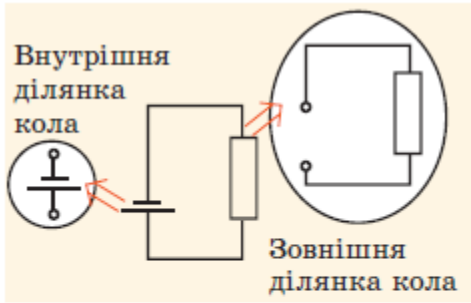


Рис. 4.3. Повне коло складається із двох ділянок — внутрішньої (джерело струму) і зовнішньої (споживач + з'єднувальні проводи)

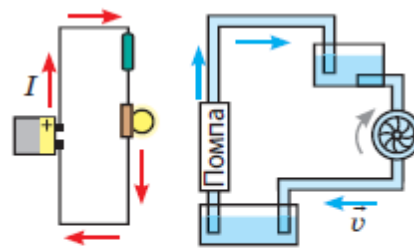


Рис. 4.4. Аналогія між електричним струмом і плином рідини

### Електрорушійна сила

Перетягуючи заряди всередині джерела струму, сторонні сили виконують певну роботу. Роботу сторонніх сил характеризує *електрорушійна сила (ЕРС)\**, яка є основною характеристикою джерела струму.

Електрорушійна сила  $\mathcal{E}$  джерела струму — скалярна фізична величина, яка характеризує енергетичні властивості джерела струму і дорівнює відношенню роботи сторонніх сил  $A_{ст}$  із переміщення позитивного заряду  $q$  всередині джерела до значення цього заряду:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$$

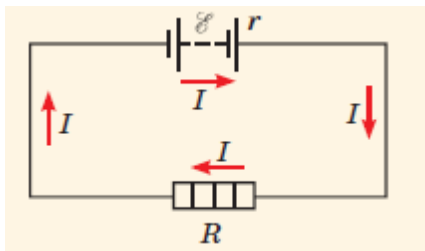
Одиниця ЕРС у СІ — вольт:  $[\mathcal{E}] = 1 \text{ В (V)}$ . ЕРС джерела струму дорівнює 1 В, якщо сторонні сили всередині джерела виконують роботу 1 Дж, переміщуючи заряд +1 Кл від негативного полюса цього джерела до позитивного.

### Закон Ома для повного кола

Розглянемо найпростіше повне замкнене електричне коло. Зовнішня ділянка цього кола (з'єднувальні проводи і нагрівник) має опір  $R$ . Внутрішня ділянка кола (джерело струму) має ЕРС і опір  $r$  (опір електроліту й електродів). Опір джерела струму називають внутрішнім опором джерела.

Якщо сила струму в колі дорівнює  $I$ , то відповідно до закону Джоуля — Ленца за час  $t$  на зовнішній і внутрішній ділянках кола разом виділиться певна кількість теплоти:  $Q = I^2 R t + I^2 r t$ . З'ясуємо, звідки береться ця енергія.

У колі одночасно «працюють» і кулонівські, і сторонні сили:  $A = A_{кул} + A_{ст}$ . Проте кулонівські сили є потенціальними — їхня робота на замкненому контурі дорівнює нулю:  $A_{кул} = 0$  (на зовнішній ділянці кола кулонівські сили виконують додатну роботу, на внутрішній ділянці — від'ємну). Отже, енергія виділяється тільки завдяки роботі сторонніх сил:  $Q = A_{ст}$ .



Оскільки  $A_{ст} = \mathcal{E} q$ , а  $q = It$ , отримаємо:  $I^2 R t + I^2 r t = \mathcal{E} I t$ . Після скорочення на  $It$  отримаємо:  $I(R + r) = \mathcal{E}$ , де  $R + r$  — повний опір кола. З останньої рівності маємо **закон Ома для повного кола**:

*Сила струму в повному електричному колі дорівнює відношенню ЕРС джерела струму до повного опору кола:*

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

### Що таке коротке замикання

Щороку в Україні виникає понад 40 тис. пожеж, і дуже часто їхньою причиною є коротке замикання.

*Коротким замиканням* називають з'єднання кінців ділянки кола, яка перебуває під напругою, провідником, опір якого дуже малий порівняно з опором цієї ділянки.

Коротке замикання може відбутися внаслідок порушення ізоляції, якщо два оголені проводи, приєднані до споживача, торкнуться один одного, або під час ремонту елементів кола, які перебувають під напругою (нагадуємо: це смертельно небезпечно!).

Під час короткого замикання сила струму в колі збільшується в кілька разів, що згідно із законом Джоуля — Ленца призводить до значного нагріву проводів і як наслідок — до пожежі. Саме тому електрична проводка повинна обов'язково містити *запобіжники* — пристрої для розмикання кола в разі надмірного збільшення сили струму.

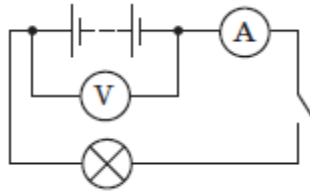
Підключення до джерела струму провідника з дуже малим опором ( $R \rightarrow 0$ ) теж спричиняє коротке замикання. *Сила струму короткого замикання* є максимальною для даного джерела та визначається за формулою:

$$I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

де  $\mathcal{E}$  — ЕРС джерела струму;  $r$  — внутрішній опір джерела.

### Приклад розв'язування задач

До батареї гальванічних елементів приєднали лампу розжарювання, ключ, амперметр і вольтметр (див. рисунок). Спочатку ключ був розімкнений, а показ вольтметра — 5,6 В. Після того як ключ замкнули, показ вольтметра став 4,8 В, а амперметра — 0,8 А. Визначте ЕРС і внутрішній опір джерела струму, а також ККД джерела при цьому навантаженні. Прилади вважайте ідеальними.



Дано:

$$U_1 = 5,6 \text{ В}$$

$$U_2 = 4,8 \text{ В}$$

$$I_2 = 0,8 \text{ А}$$

Пошук математичної моделі, розв'язання.

Запишемо закон Ома для повного кола  $\left(I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}\right)$  у вигляді:  
 $\mathcal{E} = I(R+r) = IR + Ir$ . Оскільки  $IR = U$ , отримаємо:

$$\mathcal{E} = U + Ir. \quad (*)$$

$\mathcal{E} = ?$

$r = ?$

$\eta = ?$

1) Якщо ключ розімкнений, а вольтметр ідеальний ( $R_V \rightarrow \infty$ ), сила струму в колі дорівнює нулю ( $I = 0$ ) і формула (\*) набуває вигляду:  
 $\mathcal{E} = U$ .

Отже,  $\mathcal{E} = U_1 = 5,6 \text{ В}$ .

2) ЕРС і внутрішній опір джерела не залежать від навантаження, тому, знаючи ЕРС, напругу і силу струму в колі при замкненому ключі та скориставшись формулою (\*), визначимо внутрішній опір джерела:

$$\mathcal{E} = U + Ir \Rightarrow r = \frac{\mathcal{E} - U}{I}; \quad r = \frac{\mathcal{E} - U_2}{I_2} = \frac{5,6 \text{ В} - 4,8 \text{ В}}{0,8 \text{ А}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом}.$$

3) За означенням ККД:  $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}}$ , де  $A_{\text{повна}} = \mathcal{E}It$  — робота сторонніх сил усередині джерела струму;  $A_{\text{кор}} = UIt$  — робота струму на зовнішній ділянці кола.

Остаточно маємо:  $\eta = \frac{UIt}{\mathcal{E}It} = \frac{U}{\mathcal{E}}; \quad \eta = \frac{U_2}{\mathcal{E}} = \frac{4,8 \text{ В}}{5,6 \text{ В}} = \frac{6}{7} \approx 0,86$ .

*Аналіз результатів.* Бачимо, що ККД джерела струму залежить від навантаження. І це дійсно так: зі зменшенням зовнішнього опору збільшується сила струму в колі, а отже, збільшується й кількість теплоти, що виділяється в джерелі, тобто витрачається марно.

**Відповідь:**  $\mathcal{E} = 5,6 \text{ В}; r = 1 \text{ Ом}; \eta = 86 \%$ .