

§ 4. ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА



Кожен із вас, напевно, не раз купував батарейки або акумулятори. На найпоширеніших із них написано: 1,5 В. А чи знаєте ви, що це означає? Не кваптеся з відповіддю, доки не прочитаете цей параграф!

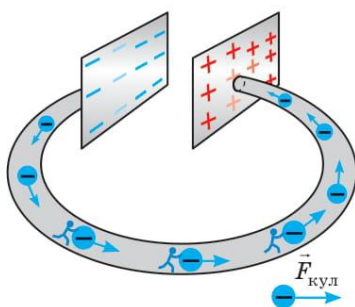


Рис. 4.1. Під дією кулонівських сил електрони рухаються в провіднику від негативно зарядженої пластини до позитивно зарядженої, внаслідок чого пластини втрачають заряд (стають електрично нейтральними)

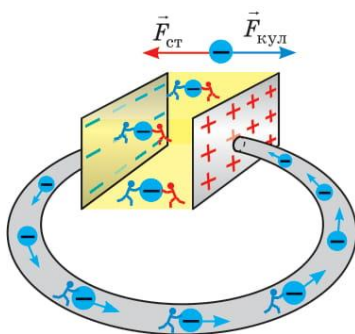


Рис. 4.2. Усередині джерела струму завдяки дії сторонніх сил $\vec{F}_{\text{ст}}$ негативні заряди переміщуються від позитивного полюса до негативного, тобто в напрямку, протилежному напрямку кулонівських сил, які також діють усередині джерела

1 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.

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).

? Розгляньте рис. 4.4. Визначте, що є механічним аналогом джерела струму; з'єднувальних проводів; споживача струму.

2 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.

? Яку роботу виконали сторонні сили всередині джерела, зображеного на рис. 4.5, якщо під час телефонної розмови по колу перемістився заряд +5 Кл?

3 Закон Ома для повного кола

Розглянемо найпростіше повне замкнене електричне коло (рис. 4.6). Зовнішня ділянка цього кола (з'єднувальні проводи і нагрівник) має опір R . Внутрішня ділянка кола (джерело

* Зазначимо, що назва цієї фізичної величини дещо невдала: електрорушійна сила є роботою, а не силою у звичайному, «механічному», розумінні. Проте цей термін усталився.

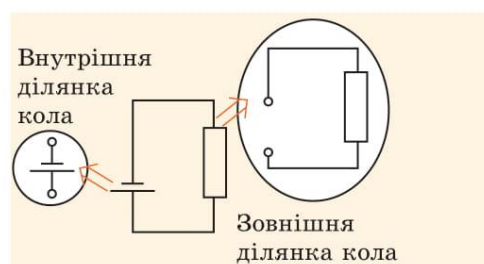


Рис. 4.3. Повне коло складається із двох ділянок — внутрішньої (джерело струму) і зовнішньої (споживач + з'єднувальні проводи)

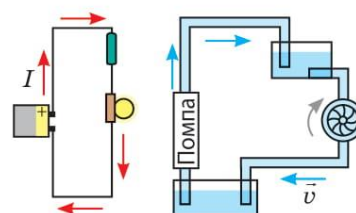


Рис. 4.4. Аналогія між електричним струмом і плинном рідини



Рис. 4.5. Літій-йонна акумуляторна батарея телефона. ЕРС батареї зазначено на її поверхні

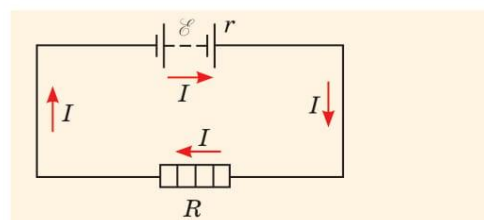
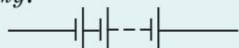


Рис. 4.6. Споживач і джерело струму з'єднані послідовно, тому сила струму в них є однаковою

Зверніть увагу!

Для вирішення різноманітних електротехнічних завдань джерела струму з'єднують у батареї.

■ Для збільшення загальної ЕРС використовують батарею послідовно з'єднаних джерел струму:

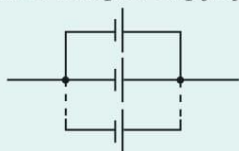


У разі послідовного з'єднання n однакових джерел струму, кожне з яких має ЕРС \mathcal{E}_0 і внутрішній опір r_0 , загальна ЕРС батареї збільшується:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n = n\mathcal{E}_0.$$

Разом із тим збільшується і внутрішній опір батареї: $r = nr_0$, тому послідовне з'єднання застосовують, коли внутрішній опір джерел набагато менший від зовнішнього опору кола.

■ Якщо внутрішній опір джерела порівнянний або більший за зовнішній опір кола, то загальний внутрішній опір можна зменшити, якщо використати батарею паралельно з'єднаних джерел струму:



У разі паралельного з'єднання n однакових джерел струму, кожне з яких має ЕРС \mathcal{E}_0 і внутрішній опір r_0 , ЕРС батареї не змінюється: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0$, а внутрішній опір зменшується в n разів: $r = \frac{r_0}{n}$.

? Як з'єднати джерела струму, якщо необхідно одночасно збільшити ЕРС і зменшити внутрішній опір? До речі, так побудовані «джерела струму» в «батареї» електричного ската.

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: $Q = I^2Rt + I^2rt$. З'ясуємо, звідки береться ця енергія.

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

Оскільки $A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q$, а $q = It$, отримаємо: $I^2Rt + I^2rt = \mathcal{E}It$. Після скорочення на It отримуємо: $I(R+r) = \mathcal{E}$, 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:

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

4 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.

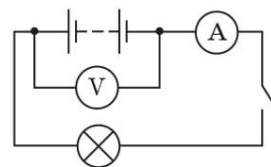
Підключення до джерела струму провідника з дуже малим опором ($R \rightarrow 0$) теж спричиняє коротке замикання. *Сила струму короткого замикання* є максимальною для даного джерела та визначається за формулою:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

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

5 Учимся розв'язувати задачі

Задача. 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:

$$U_1 = 5,6 \text{ В}$$

$$U_2 = 4,8 \text{ В}$$

$$I_2 = 0,8 \text{ А}$$

$$\mathcal{E} = ?$$

$$r = ?$$

$$\eta = ?$$

Пошук математичної моделі, розв'язання.

Запишемо закон Ома для повного кола ($I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$) у вигляді:

$$\mathcal{E} = I(R+r) = IR + Ir. \text{ Оскільки } IR = U, \text{ отримаємо:}$$

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

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

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

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.

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

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



Підбиваємо підсумки

- Будь-які сили, що діють на електрично заряджені частинки і не є кулонівськими, називають сторонніми силами. Саме сторонні сили, «працюючи» всередині джерела струму, підтримують напругу на його полюсах.
- Основна енергетична характеристика джерела струму — електрорушійна сила (ЕРС) — скалярна фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи сторонніх сил $A_{\text{ст}}$ з переміщення позитивного заряду q всередині джерела до значення цього заряду: $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$.
- Сила струму в повному колі дорівнює відношенню ЕРС джерела струму до повного опору кола: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, де R і r — опір зовнішньої і внутрішньої ділянок кола відповідно. Це твердження є законом Ома для повного кола.



Контрольні запитання

1. Що називають сторонніми силами? 2. Охарактеризуйте ЕРС як фізичну величину. 3. Skorиставшись законом збереження енергії, законом Джоуля — Ленца та означеннями ЕРС і сили струму, отримайте закон Ома для повного кола. Сформулюйте цей закон. 4. Що називають коротким замиканням? Наведіть приклади. 5. Як розрахувати силу струму короткого замикання? 6. Як і чому ККД джерела струму залежить від навантаження?



Вправа № 4

Якщо не зазначено інше, опором з'єднувальних проводів нехтуйте.

1. До джерела струму з ЕРС 6 В і внутрішнім опором 2 Ом підключено резистор опором 10 Ом. Визначте: а) силу струму в колі; б) напругу на полюсах джерела струму.
2. До полюсів джерела струму з ЕРС 4 В підключили лампу опором 8 Ом, у результаті чого в колі встановилася сила струму 0,4 А. Визначте внутрішній опір джерела.
3. Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму склали електричне коло (рис. 1). Коли обидва ключі замкнули, показ амперметра був 1,8 А. Після того як один ключ розімкнули, показ амперметра став 1 А. Які результати було отримано?
4. Визначте потужність, яку споживає кожен із трьох резисторів (рис. 2), і ККД джерела струму при цьому навантаженні, якщо ЕРС джерела 12 В, а його внутрішній опір — 6 Ом.
5. Дізнайтесь, як побудований електричний орган електричного ската (рис. 3) або електричного вугра, яку ЕРС він створює, якими є потужність його електричного розряду, сила струму та напруга під час розряду. Використавши отримані дані, складіть 2–3 задачі та розв'яжіть їх.

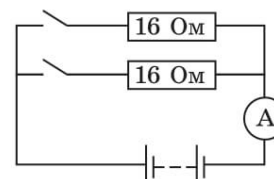


Рис. 1

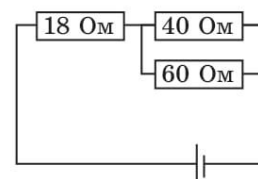


Рис. 2



Рис. 3