

§ 10. ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА

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

1 **Умови існування постійного електричного струму в колі**
Ви вже знаєте умови виникнення та існування електричного струму. Існування електричного струму в провіднику можливе тільки за наявності в ньому електричного поля. Розглянемо, як це можна реалізувати на практиці.

Відомо, що електричне поле існуватиме в провіднику, якщо на його кінцях якимось чином створити різницю потенціалів,— наприклад, приєднати один кінець провідника до позитивно зарядженої обклашки конденсатора, а другий — до негативно зарядженої. Як тільки буде створена різниця потенціалів, вільні електрони провідника, не припиняючи хаотичного руху, під дією кулонівських сил почнуть рухатися напрямлено — від кінця провідника з нижчим потенціалом до кінця з вищим потенціалом, тобто від кінця, що має негативний заряд, до кінця, що має позитивний заряд. Такий перерозподіл зарядів спричинить зменшення різниці потенціалів між

кінцями провідника та поступово приведе до того, що ця різниця дорівнюватиме нулю (конденсатор розрядиться), а електричний струм припиниться.

Таким чином, щоб електричний струм у провіднику існував протягом *тривалого часу*, необхідно *постійно підтримувати різницю потенціалів на кінцях провідника*. Тобто необхідно приєднувати провідник не до конденсатора, а до пристрою, між клемми якого тривалий час може існувати різниця потенціалів. Такий пристрій називають *джерелом струму* або *генератором струму*.

Різниця потенціалів між клемми джерела струму створюється за рахунок примусового «перетягування» зарядів усередині джерела; при цьому долаються сили, що діють з боку електричного поля, яке, власне, виникає та підсилюється в результаті такого «перетягування». Причини руху зарядів у джерелі за своєю природою *відмінні від природи кулонівських сил*. Тому сукупність причин, які викликають примусове переміщення зарядів усередині джерела струму, називають *сторонніми силами*.

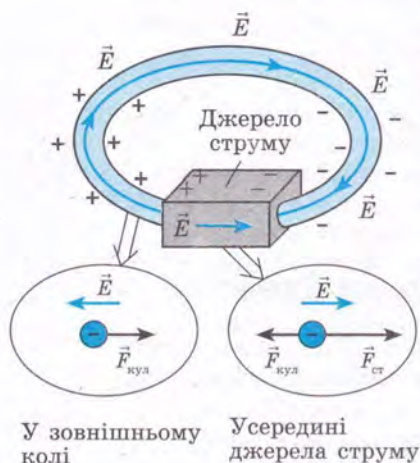


Рис. 10.1. Модель замкненого кола. Коли до полюсів джерела струму приєднують провідник (споживач струму), то в провіднику створюється електростатичне поле напруженістю \vec{E} . Під дією кулонівських сил ($\vec{F}_{\text{кул}}$) електрони починають рухатися від негативного полюса джерела струму до позитивного. Усередині ж джерела 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

Природа сторонніх сил може бути дуже різною: вони можуть виникати в результаті хімічних реакцій (у гальванічних елементах і акумуляторах), змінення магнітного поля (в електромагнітних генераторах), завдяки дії світла (у фотоелементах) тощо.

Приєднання провідника до джерела струму створює провідний замкнений контур, який називають *замкнене електричне коло*. Якщо на полюсах джерела струму існує постійна різниця потенціалів, то й на кінцях провідника (споживача струму), який разом із джерелом складає замкнене коло, створюється постійна різниця потенціалів. У результаті починається «коловорот» зарядів у колі, тобто в ньому йде постійний струм (рис. 10.1).

2 Що називають електрорушійною силою

Ми дійшли висновку, що для підтримки в замкненому колі постійного струму в коло необхідно включити джерело струму.

✎ Коли до кола підключають джерело струму, всередині провідника виникає електричне поле. Механізм створення цього поля є доволі складним. Дещо спрощено можна сказати, що на поверхні провідника з'являються некомпенсовані заряди, які

створюють усередині провідника таке електричне поле, що підтримує постійний у всьому колі електричний струм.★

Основна характеристика джерела струму — *електрорушійна сила** (ЕРС).

Електрорушійна сила \mathcal{E} — це скалярна фізична величина, яка характеризує енергетичні властивості джерела струму та дорівнює відношенню роботи сторонніх сил ($A_{\text{ст}}$) з переміщення позитивного заряду всередині джерела струму від негативного полюса до позитивного до значення q цього заряду:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} \quad (1)$$

Одиниця ЕРС у СІ — **вольт (В)**.

ЕРС джерела струму дорівнює 1 В, якщо сторонні сили, які діють у джерелі, виконують роботу 1 Дж, переміщуючи одиничний позитивний заряд від негативного полюса до позитивного.

Електрорушійна сила того самого джерела струму може мати як негативне, так і позитивне значення залежно від довільно обраного напрямку *обходу* ділянки електричного кола, на якій розміщене джерело струму. Так, якщо обхід відбувається від негативного полюса до позитивного, то ЕРС додатна, бо в цьому випадку сторонні сили всередині джерела виконують додатну роботу (рис. 10.2).

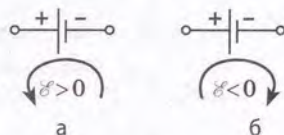


Рис. 10.2. Визначення знака ЕРС джерела струму: а — ЕРС джерела додатна, оскільки обхід відбувається від негативного до позитивного полюса джерела; б — ЕРС джерела від'ємна, оскільки обхід відбувається від позитивного до негативного полюса джерела. Стрілками показано напрямки обходу

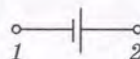


Рис. 10.3. Схема неоднорідної ділянки 1-2 електричного кола, яка містить джерело струму

3 Що називають напругою на ділянці кола

Спочатку зазначимо, що ділянки електричного кола бувають неоднорідними та однорідними. Якщо під час проходження в ділянці електричного струму на вільні заряджені частинки діють кулонівські та сторонні сили, ділянку називають *неоднорідною*, якщо діють тільки кулонівські сили, — *однорідною*.

Розглянемо *неоднорідну* ділянку 1-2 електричного кола, зображену на рис. 10.3.

Ділянка є неоднорідною, тому робота $A_{1 \rightarrow 2}$ з переміщення вільних заряджених частинок, яка виконується під час проходження електричного струму в цій ділянці, дорівнює: $A_{1 \rightarrow 2} = A_{1 \rightarrow 2}^{\text{кул}} + A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}$, де $A_{1 \rightarrow 2}^{\text{кул}}$ і $A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}$ — робота з переміщення заряду з точки 1 в точку 2 ділянки, яка виконується кулонівськими та сторонніми силами відповідно.

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

Тоді робота з переміщення *одиночного* позитивного заряду в ділянці 1–2 електричного кола, в якому тече постійний струм, становить: $\frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q} = \frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{кул}}}{q} + \frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}}{q}$, де q — значення позитивного заряду, який переноситься на ділянці 1–2. Однак відношення $\frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}}{q}$ за ви- значенням дорівнює різниці потенціалів між точками 1 і 2 ділян- ки 1–2 кола, тобто $\frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{кул}}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2$, а відношення $\frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}}{q}$ згідно з форму- лою (1) дорівнює ЕРС \mathcal{E} джерела струму. Отже, $\frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}$, або $U_{1 \rightarrow 2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}$, де $U_{1 \rightarrow 2}$ — *напруга (падіння напруги)* на ділян- ці 1–2 кола.

Таким чином, *напруга (падіння напруги)* на ділянці 1–2 ко- ла — це скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює повній роботі $A_{1 \rightarrow 2}$ кулонівських і сторонніх сил з переміщення одиночного позитивного заряду в ділянці кола з точки 1 в точку 2: $U_{1 \rightarrow 2} = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}$.
Отже:

$$U_{1 \rightarrow 2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E} \quad (2)$$

Зверніть увагу: у загальному випадку напруга на даній ділянці кола дорівнює алгебраїчній сумі різниці потенціалів і ЕРС на цій ділянці. Якщо ж на ділянці діють тільки кулонівські сили, а сто- ронні сили відсутні (саме з такими ділянками ви до цього параграфу мали справу), то напруга на ділянці дорівнює різниці потенціалів: $U_{1 \rightarrow 2} = \varphi_1 - \varphi_2$ за $\mathcal{E} = 0$.

4

Чому дорівнює сила струму в повному колі



Рис. 10.4. Схема неоднорідної ді- лянки 1–2 електричного кола, яка містить джерело струму та резистор

Визначимо силу струму в *неоднорідній* ділянці електричного кола, зображеній на рис. 10.4.

Відповідно до закону Ома для ділянки кола сила струму $I = \frac{U}{R}$, де U — напруга на ділянці; R — опір ділянки. Отже, з ураху- ванням (2) маємо:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}}{R}, \quad (3)$$

де $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — різниця потенціалів між точка- ми 1 і 2 ділянки; \mathcal{E} — ЕРС джерела струму, яке містить ділянка.

Якщо з'єднати кінці даної ділянки, отримаємо найпростіше повне (замкнене) електричне коло (рис. 10.5), що складається

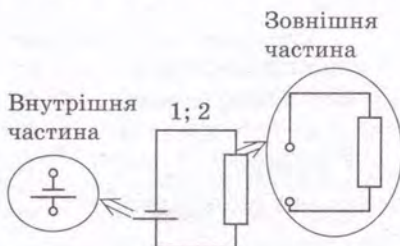


Рис. 10.5. Повне (замкнене) коло складається з двох частин (діля- нок) — внутрішньої та зовнішньої

з двох частин (ділянок) — *внутрішньої* та *зовнішньої*. Внутрішня частина являє собою джерело струму, яке має ЕРС \mathcal{E} і внутрішній опір r^* ; зовнішня — з'єднувальні проводи та резистор, загальний опір яких R . Зрозуміло, що для повного кола $\Phi_1 = \Phi_2$, а загальний опір кола дорівнює сумі опорів зовнішньої та внутрішньої частин кола $(R+r)$. Тоді формула (3) набуває вигляду: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$. (4)

Отже, маємо **закон Ома для повного кола**:

Сила струму I у повному електричному колі дорівнює відношенню ЕРС джерела струму (\mathcal{E}) до суми опорів зовнішньої частини кола (R) і внутрішньої його частини (r):

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

Фактично цей закон можна розглядати як закон збереження енергії для системи рухомих зарядів. (Спробуйте довести це твердження самостійно.)

Уже зазначалося, що для вирішення різних електротехнічних завдань джерела струму з'єднують у батареї. У разі *послідовного з'єднання n однакових джерел струму* (рис. 10.6), кожне з яких має ЕРС \mathcal{E}' і внутрішній опір r' , закон Ома для повного кола має вигляд:

$$I = \frac{n\mathcal{E}'}{R + nr'}$$

Послідовне з'єднання джерел струму застосовують у тому випадку, коли $R \gg nr'$ і батарея може забезпечити силу струму $I = \frac{n\mathcal{E}'}{R}$ у n разів більшу, ніж сила струму від одного джерела.

У разі *паралельного з'єднання n однакових джерел струму* (рис. 10.7), кожне з яких має ЕРС \mathcal{E}' і внутрішній опір r' , закон Ома для повного кола має вигляд:

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

Паралельне з'єднання джерел струму застосовують, наприклад, у тому випадку, коли для нормальної роботи споживача необхідна сила струму, значення якої перевищує максимальну силу струму одного джерела. Паралельне з'єднання є доцільним, коли $R < r'$.

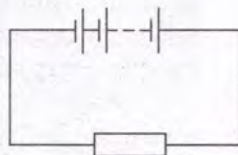


Рис. 10.6. Коло з послідовним з'єднанням джерел струму

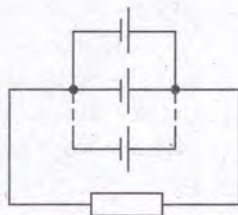


Рис. 10.7. Коло з паралельним з'єднанням джерел струму

* Якщо джерелом струму є генератор, його внутрішній опір — це опір обмоток; якщо джерелом є гальванічний елемент або акумулятор, їх внутрішній опір — це опір електроліту та електродів.

★ **5** Що називають коротким замиканням

Формулу, що виражає закон Ома для повного кола, можна записати у вигляді: $\mathcal{E} = I(R+r)$, або $\mathcal{E} = IR + Ir$, де $IR = U$ — падіння напруги на зовнішній частині кола; Ir — падіння напруги на внутрішній частині кола (всередині джерела струму).

Таким чином, $\mathcal{E} = U + Ir$, звідки:

$$U = \mathcal{E} - Ir. \quad (5)$$

Аналізуючи формулу (5), доходимо висновку, що при $\mathcal{E} = \text{const}$ напруга на зовнішній частині кола зменшується зі збільшенням сили струму в колі.

Після підставлення у формулу (5) виразу для сили струму (4) одержимо:

$$U = \mathcal{E} \left(1 - \frac{r}{R+r} \right).$$

Проаналізуємо останню формулу для деяких граничних режимів роботи кола.

Якщо коло розімкнене ($R \rightarrow \infty$), то $U = \mathcal{E}$, тобто напруга на полюсах джерела струму дорівнює його ЕРС. Цим користуються у вимірюванні ЕРС джерела струму за допомогою вольтметра, який підключають до клем джерела струму. Зрозуміло, що для вимірювання необхідно взяти вольтметр, опір R_v якого набагато більший, аніж внутрішній опір r джерела струму ($R_v \gg r$), оскільки тільки за такої умови покази вольтметра будуть близькими до значення ЕРС джерела струму.

Якщо до клем джерела струму підключений провідник, опір R якого набагато менший, аніж внутрішній опір r джерела струму ($R \ll r$), то $R+r \approx r$ і тоді $U = \mathcal{E} \left(1 - \frac{r}{r} \right) = 0$, тобто напруга на полюсах джерела струму дорівнює нулю, а сила струму сягає максимального значення.

Підключення до полюсів джерела струму провідника з мізерно малим опором називають **коротким замиканням**, а струм, який при цьому виникає, — **струмом короткого замикання**. Значення сили струму короткого замикання ($I_{к.з}$) є максимальним для даного джерела струму:

$$I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

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

Сила струму короткого замикання нового 1,5-вольтового гальванічного елемента дорівнює приблизно 15 А. Тому коротке замикання

гальванічного елемента призведе до значного нагріву пристрою. Дуже небезпечними є можливі наслідки короткого замикання, наприклад, в електричній проводці житлового будинку. Так, струм короткого замикання побутових розеток (значення $I_{к.з}$ може сягати понад 40 А) може викликати перегрів проводів та пожежу в будівлі. Саме тому електрична проводка повинна містити запобіжники.★

6 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Коли батарею гальванічних елементів замикають на опір R_1 , напруга на затискачах батареї становить 5 В. Коли зовнішній опір збільшують у 6 разів, напруга на затискачах зростає вдвічі. Чому дорівнює ЕРС батареї?

§ — ?

Дано:

$$U_1 = 5 \text{ В}$$

$$R_2 = 6R_1$$

$$U_2 = 2U_1$$

Аналіз фізичної проблеми. У задачі йдеться про повне коло, в якому джерело залишається тим самим, а зовнішній опір змінюється. Тому, записавши для двох випадків закон Ома для повного кола та застосувавши його для ділянки кола, можемо скласти систему рівнянь; розв'язавши її, знайдемо шукану величину.

Пошук математичної моделі, розв'язання. Позначимо через I_1 та I_2 силу струму в колі в першому та другому випадках відповідно.

Зважаючи на закон Ома для повного кола, маємо:
$$\begin{cases} \mathcal{E} = I_1(R_1 + r), \\ \mathcal{E} = I_2(R_2 + r). \end{cases}$$

Сили струмів I_1 та I_2 знайдемо із закону Ома для ділянки кола, враховуючи, що $U_1 = R_1 I_1$ і $2U_1 = 6R_1 I_2$. Отже, $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$ і $I_2 = \frac{2U_1}{6R_1}$.

Після підставлення значень I_1 і I_2 у формули системи маємо:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = \frac{U_1}{R_1}(R_1 + r), & \mathcal{E} = U_1 \left(1 + \frac{r}{R_1} \right), \\ \mathcal{E} = \frac{2U_1}{6R_1}(6R_1 + r); & \mathcal{E} = 2U_1 \left(1 + \frac{r}{6R_1} \right). \end{cases}$$

З першого рівняння знайдемо: $\frac{r}{R_1} = \frac{\mathcal{E} - U_1}{U_1}$ і підставимо в друге.

$$\text{Тоді } \mathcal{E} = 2U_1 \left(1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{\mathcal{E} - U_1}{U_1} \right). \text{ Звідси } \mathcal{E} = \frac{5U_1}{2}.$$

Обчислимо значення шуканої величини: $\mathcal{E} = \frac{5 \cdot 5}{2} = 12,5 \text{ (В)}.$

Відповідь: ЕРС батареї $\mathcal{E} = 12,5 \text{ В}.$

! Підбиваємо підсумки

Основна енергетична характеристика джерела струму — електрорушійна сила (ЕРС). Електрорушійна сила — це скалярна фізична величина, знак якої залежить від довільно обраного напрямку об-

Електрорушійна сила \mathcal{E} дорівнює відношенню роботи сторонніх сил ($A_{\text{ст}}$) із переміщення позитивного заряду всередині джерела струму від негативного полюса до позитивного до значення q цього заряду: $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$. Одиниця ЕРС у СІ — вольт.

Сила струму I в повному колі дорівнює відношенню ЕРС \mathcal{E} джерела струму до повного опору кола: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, де R і r — опір зовнішньої та внутрішньої частин кола відповідно. Це твердження називають законом Ома для повного кола.

★ Підключення до полюсів джерела струму провідника з мізерно малим опором називають коротким замиканням. Силу струму короткого замикання ($I_{\text{к.з}}$) джерела струму з ЕРС \mathcal{E} і внутрішнім опором r розраховують за формулою: $I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$. ★



Контрольні запитання

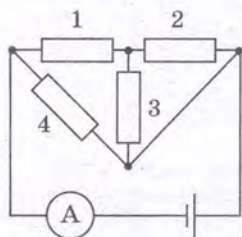
1. Що називають сторонніми силами? 2. Сформулюйте умови існування постійного струму в провіднику. 3. Що таке ЕРС? 4. Покажіть на прикладі, як визначити знак ЕРС. 5. Що називають електричною напругою на ділянці електричного кола? 6. У якому випадку електрична напруга між двома точками електричного кола дорівнює різниці потенціалів між цими точками? 7. Сформулюйте закон Ома для повного кола. ★ 8. Що називають коротким замиканням? ★ 9. Як розрахувати силу струму короткого замикання?



Вправа № 10

Якщо не зазначено інше, опором з'єднувальних проводів слід знехтувати.

1. До джерела струму з ЕРС 6 В і внутрішнім опором 2 Ом підключено резистор, опір якого 10 Ом. Визначте напругу на полюсах джерела струму.
2. До полюсів джерела струму з ЕРС 4 В підключили лампочку опором 8 Ом, у результаті чого в колі встановилася сила струму 0,4 А. Визначте внутрішній опір джерела.
3. Джерело струму, внутрішній опір якого 0,5 Ом, живить 5 однакових лампочок, з'єднаних паралельно. Кожна лампа має опір 15 Ом; опір з'єднувальних проводів дорівнює 1,5 Ом. Знайдіть напругу на полюсах джерела струму та його ЕРС, якщо напруга на кожній лампі 1,8 В.
4. Повне коло складається із джерела струму з ЕРС 3 В, амперметра та чотирьох резисторів, з'єднаних так, як показано на рисунку. Визначте показ амперметра, якщо внутрішній опір джерела струму 1 Ом, а опори резисторів дорівнюють: $R_1 = 6$ Ом; $R_2 = R_3 = 8$ Ом; $R_4 = 10$ Ом.



5. Напруга на полюсах джерела струму, замкненого на зовнішній опір, дорівнює 10 В. Якщо зовнішній опір збільшити у 5 разів, напруга на полюсах джерела зросте до 30 В. Знайдіть ЕРС джерела струму.
- ★ 6. Під час заряджання акумулятора напруга на його клеммах дорівнює U_1 , а сила струму в акумуляторі I_1 . Під час розряджання акумулятора напруга на його клеммах становить U_2 , а сила струму в акумуляторі I_2 . Знайдіть силу струму короткого замикання цього акумулятора.