

§ 12. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ



Поняття роботи електричного струму та його потужності вам відомі з курсу фізики 9-го класу. А от у якому випадку потужність, що виділяється в споживачі струму, буде максимальною і від чого залежить коефіцієнт корисної дії джерела струму, ви дізнаєтесь із цього параграфу.



Як розрахувати роботу електричного струму

Ви вже знаєте, що електрична напруга U на ділянці електричного кола визначається за формулою $U = \frac{A}{q}$, де A — повна робота кулонівських і сторонніх сил з переміщення на цій ділянці позитивного заряду q . Цю роботу часто називають *роботою струму*. Отже, роботу A постійного електричного струму можна знайти за формулою $A = Uq$. Подавши заряд q через силу струму I та час t проходження струму ($q = It$), отримаємо формулу для розрахунку роботи електричного струму на даній ділянці кола:

$$A = UIt$$

Одиниця роботи електричного струму в СІ — **джоуль** (Дж); $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$. В електротехніці використовують *позасистемну* одиницю роботи струму — **кіловат-годину** (кВт · год); $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$. Прилади для прямого вимірювання роботи струму називають *лічильниками електричної енергії* або *електролічильниками* (рис. 12.1).



Рис. 12.1. Електролічильник

Якщо на ділянці кола, в якій тече струм, не виконується механічна робота й не відбуваються хімічні реакції, то робота електричного струму приводить тільки до нагрівання провідника. Нагрітий провідник шляхом теплопередачі віддає отриману енергію навколишнім тілам. Отже, в цьому випадку згідно із законом збереження енергії кількість виділеної теплоти Q дорівнюватиме роботі A струму: $Q = A$. Оскільки $A = UI t$, а $U = IR$, маємо: $Q = I^2 R t$.

Остання формула є математичним записом закону, який незалежно один від одного дослідним шляхом встановили англійській фізик Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889) і російський фізик Емілій Християнович Ленц (Генріх Ленц) (1804–1865). Згодом зазначений 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:

$$Q = I^2 R t$$

Слід зазначити, що зараз математичний вираз закону Джоуля — Ленца ми одержали для окремого випадку, але дослідження довели, що кількість теплоти, яка виділяється в процесі проходження струму в ділянці кола, *завжди* можна обчислити за формулою $Q = I^2 R t$. А от іншими модифікаціями цієї формули — $Q = \frac{U^2 t}{R}$ і $Q = UI t$ — можна користуватися *тільки в тому випадку, коли вся електрична енергія витрачається на нагрівання*.

2

Як розрахувати потужність електричного струму

Потужність електричного струму P — фізична величина, яка характеризує швидкість виконання струмом роботи та дорівнює відношенню роботи A струму до часу t , за який цю роботу виконано:

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

Ураховуючи, що $A = UI t$:

$$P = UI,$$

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

Нагадаємо, що одиниця потужності в СІ — **ват**; $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$. Із формули для розрахунку потужності електричного струму випливає: $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Для вимірювання потужності струму існують спеціальні прилади — **ватметри**.

Якщо коло складається з кількох споживачів, то, розраховуючи їхню фактичну потужність, слід пам'ятати: *за будь-якого з'єднання*

споживачів загальна потужність струму в усьому колі дорівнює сумі потужностей окремих споживачів.

Звернемося знову до рис. 12.1. На електролічильнику подано значення двох фізичних величин: 220 В; 15 А. Перша з них показує, у коло з якою напругою слід вмикати електролічильник, друга — максимально допустиму силу струму в приладі. Перемноживши ці значення, одержимо максимально допустиму потужність споживачів, які можна підключити через цей електролічильник ($UI = P$). До речі, уважно роздивіться електролічильники у вашій оселі та визначте, скільки потужних споживачів ви можете підключити разом, щоб не зіпсувати прилад.

3 У якому випадку на зовнішній частині кола виділяється максимальна потужність

Для визначення залежності $P(I)$ — потужності, яка споживається зовнішньою частиною кола, від сили струму — розглянемо електричне коло, яке являє собою джерело струму із внутрішнім опором r і ЕРС \mathcal{E} , замкнене на зовнішнє навантаження з опором R . Якщо в колі є струм, то, зважаючи на закон Ома для повного кола, ЕРС джерела можемо визначити так: $\mathcal{E} = IR + Ir$, де I — сила струму в колі. Помноживши обидві частини рівності на I , отримаємо:

$$\mathcal{E}I = I^2R + I^2r,$$

де $\mathcal{E}I = P_{\text{п}}$ — повна потужність, яку розвиває джерело струму; $I^2R = P$ — потужність, яку споживає зовнішня частина кола (потужність, яку споживає зовнішнє навантаження); $I^2r = P_{\text{в}}$ — потужність, яку споживає внутрішня частина кола. Отже, потужність, яку споживає зовнішня частина кола, становить:

$$P = \mathcal{E}I - I^2r, \text{ або } P = I(\mathcal{E} - Ir).$$

Графік залежності $P(I)$ — парабола (рис. 12.2). Аналіз отриманої залежності показує, що потужність, яку споживає зовнішня

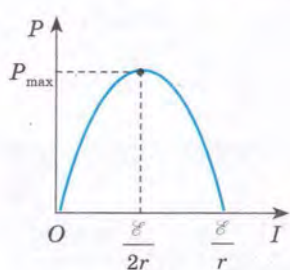


Рис. 12.2. Графік залежності $P(I)$ — потужності, яку споживає зовнішня частина кола, від сили струму

частина кола, за сил струму $I_1 = 0$ та $I_2 = \frac{\mathcal{E}}{r}$ дорівнює нулю: $P = 0$, а за сили струму $I = \frac{\mathcal{E}}{2r}$ має максимальне значення $P_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}$.

Після підставлення $I = \frac{\mathcal{E}}{2r}$ у формулу, що виражає закон Ома для повного кола, маємо:

$\frac{\mathcal{E}}{2r} = \frac{\mathcal{E}}{(R+r)}$. Звідси випливає, що максимальна потужність споживається зовнішнім навантаженням у випадку, коли $R = r$, тобто коли опір R зовнішнього навантаження дорівнює внутрішньому опору r джерела струму.

4

Як розраховують коефіцієнт корисної дії джерела струму

Коефіцієнт корисної дії (ККД) η джерела струму визначається як відношення потужності P , яку споживає зовнішня частина кола (корисна потужність), до повної потужності $P_{\text{п}}$, яку розвиває джерело струму: $\eta = \frac{P}{P_{\text{п}}}$.

Після підставлення $P_{\text{п}} = \mathcal{E}I$ і $P = UI$ в останню формулу маємо:

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}},$$

де U — напруга на зовнішньому колі; \mathcal{E} — ЕРС джерела струму.

Отримана формула справджується за будь-якого споживача електричного струму.

Якщо ж у зовнішній частині кола вся енергія джерела перетворюється тільки на внутрішню енергію провідників, то, замінивши: $U = IR$ і $\mathcal{E} = I(R+r)$, де R і r — опір зовнішньої частини кола та опір джерела струму відповідно, I — сила струму в колі, — отримав:

$$\eta = \frac{R}{R+r}.$$

Розділивши чисельник і знаменник останньої формули на R , маємо:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}. \quad (*)$$

Графік залежності $\eta(R)$ при $r = \text{const}$ наведено на рис. 12.3.

Аналіз формули (*) і графіка $\eta(R)$ показує, що $\eta \rightarrow 1$, коли $\frac{r}{R} \ll 1$. Тобто для збільшення ККД джерела необхідно по можливості зменшити його внутрішній опір.

У випадку короткого замикання ($R \rightarrow 0$) $\eta \rightarrow 0$, тобто вся потужність споживається всередині джерела струму. Це може призвести не тільки до перегріву внутрішніх частин джерела та виходу його з ладу, але й до пожежі. Саме тому короткі замикання є недопустимими.

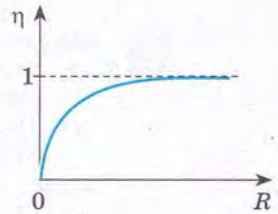


Рис 12.3. Графік $\eta(R)$ залежності ККД джерела струму від опору зовнішньої частини кола, $r = \text{const}$

5

Учимося розв'язувати задачі

Задача. У разі підключення електромотора до джерела електричного струму з ЕРС 120 В напруга на клеммах джерела становить 96 В. Загальний опір підвідних проводів і джерела струму дорівнює 14 Ом. Яку корисну потужність розвиває електромотор, якщо його ККД становить 0,65? Втратами потужності на обмотках електромотора знехтуйте.

$P_{\text{кор}} = ?$

Дано:

$\mathcal{E} = 120 \text{ В}$

$U = 96 \text{ В}$

$r = 14 \text{ Ом}$

$\eta = 0,65$

Розв'язання. Під час роботи електродвигуна електрична енергія перетворюється на механічну енергію, яка пов'язана з обертанням якоря електромотора, і на внутрішню енергію, про збільшення якої свідчить нагрівання провідників. Таким чином, згідно із законом збереження енергії повна потужність $P_{\text{н}}$, яку розвиває джерело струму, дорівнює сумі механічної потужності P та потужності $P_{\text{н}}$, яка витрачається на нагрівання провідників: $P_{\text{н}} = P + P_{\text{н}}$.

З урахуванням того що $P_{\text{н}} = \mathcal{E}I$ і $P_{\text{н}} = I^2 r$, маємо: $\mathcal{E}I = P + I^2 r$ (1).

Оскільки ККД двигуна дорівнює $\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P}$, де $P_{\text{кор}}$ — корисна потужність, яку розвиває електромотор, то $\frac{P_{\text{кор}}}{P} = \eta$ (2).

Згідно із законом Ома маємо: $U = \mathcal{E} - Ir$. Звідси: $I = \frac{\mathcal{E} - U}{r}$. Після підставлення виразу для сили струму в (1) з урахуванням (2) отримуємо: $P_{\text{кор}} = \eta U \frac{\mathcal{E} - U}{r}$.

Визначимо значення шуканої величини:

$$[P_{\text{кор}}] = \frac{\text{В}(\text{В} - \text{В})}{\text{Ом}} = \frac{\text{В} \cdot \text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = \text{Вт};$$

$$\{P_{\text{кор}}\} = \frac{0,65 \cdot 96 \cdot 24}{14} \approx 107, \quad P_{\text{кор}} \approx 107 \text{ Вт}.$$

Відповідь: корисна потужність електромотора $P_{\text{кор}} \approx 107 \text{ Вт}$.



Підбиваємо підсумки

На ділянці кола електричний струм виконує роботу, значення якої дорівнює добуткові напруги, сили струму і часу проходження струму: $A = UI t$.

Одиниця роботи електричного струму в СІ — джоуль (Дж): $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$.

Фізичну величину, яка характеризує швидкість виконання струмом роботи, називають потужністю електричного струму. Потужність електричного струму обчислюють за формулою $P = UI$. Одиниця потужності електричного струму в СІ — ват (Вт); $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Проходження струму в провіднику супроводжується виділенням теплоти, кількість якої прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника та часу проходження струму: $Q = I^2 R t$ (закон Джоуля — Ленца).

ККД η джерела струму розраховується за формулою $\eta = \frac{U}{\mathcal{E}}$, де U — напруга на зовнішній частині кола; \mathcal{E} — ЕРС джерела струму.



Контрольні запитання

1. За якою формулою обчислюють роботу електричного струму?
2. Назвіть відомі вам одиниці роботи електричного струму.
3. Доведіть, що $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.
4. Сформулюйте закон Джоуля — Ленца. Чому він має таку назву?
5. Які формули

для розрахунку кількості теплоти, що виділяється під час проходження струму в провіднику, ви знаєте? Чи завжди можна користуватися ними? **6.** Що називають потужністю електричного струму? За якою формулою її можна обчислити? **7.** За якою формулою визначають потужність, яку споживає зовнішня частина кола? За якої умови вона набуває максимального значення? **8.** Як розрахувати ККД джерела струму?



Вправа № 12

1. Дві лампи, які мають потужності 90 і 40 Вт, з'єднані паралельно і підключені до джерела струму, що має напругу 220 В. Визначте силу струму, який протікає через кожну лампу, та опір кожної лампи.
2. Визначте силу струму, який споживає електродвигун підйомального крана, якщо вантаж масою 1 т кран підіймає на висоту 19 м за 50 с. ККД електродвигуна становить 80 %, напруга на клеммах — 380 В.
3. Лампа, розрахована на напругу 127 В, споживає потужність 50 Вт. Який додатковий опір треба приєднати до лампи, щоб увімкнути її в мережу напругою 220 В?
4. Коли зовнішня ділянка кола споживає потужність 18 Вт, ККД джерела струму становить 64 %. Яка потужність споживається при цьому всередині джерела струму?
5. Скільки часу буде нагріватися 1,5 л води від 20 до 100 °С в електричному чайнику потужністю 600 Вт, якщо ККД чайника становить 80 %?
6. Від джерела струму необхідно передати споживачеві потужність 4 кВт. Яка напруга має бути на затискачах джерела, щоб втрати потужності в підвідних проводах становили 4 % споживаної потужності? Опір підвідних проводів 0,4 Ом.
7. Визначте потужність, яку споживає кожний із трьох резисторів, що складають електричне коло (див. рисунок), якщо ЕРС джерела струму 12 В, а його внутрішній опір — 6 Ом. Опори резисторів дорівнюють 18, 40 і 60 Ом відповідно.
8. Дві електроплити, спіралі яких мають однакові опори, спочатку увімкнули в мережу послідовно, а потім паралельно. У якому випадку електроплити споживали більшу потужність і в скільки разів?

