

§ 3. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА



Зараз електричний струм використовується практично всюди. Різноманітні побутові електроприлади, електричне обладнання автомобілів, хімічна промисловість, медицина, засоби зв'язку... Кожен із вас може навести кілька десятків пристроїв, дія яких ґрунтується на використанні електричної енергії, яка в цих пристроях перетворюється на інші види енергії. Електричне поле при цьому виконує роботу, яку називають *роботою струму*. Згадаємо, як її визначити.

1 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 ($q = It$), отримаємо 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**: $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ ($1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$). Саме в таких одиницях подає роботу струму лічильник електричної енергії (рис. 3.1).

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 (див. § 19). За значеннями перших двох величин визначають максимально допустиму *потужність* споживачів, які можна підключити через електролічильник.

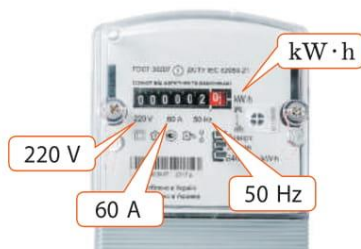


Рис. 3.1. Лічильник електричної енергії — прилад для прямого вимірювання роботи струму

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 .

Урахувавши, що $A = UIt$, маємо:

$$P = UI,$$

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

Одиниця потужності струму в СІ — ват:

$$[P] = 1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ А} \cdot \text{В} \left(1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ А} \cdot \text{В} \right).$$

Зверніть увагу! Наведені формули завжди справджуються для постійного струму і мають певні межі застосування в разі змінного струму (див. § 20).

❓ На яку максимальну потужність розрахований електролічильник на рис. 3.1?

2 Закон Джоуля — Ленца

Будь-який провідник під час проходження струму нагрівається (рис. 3.2). 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 *Еміль 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:

$$Q = I^2 R t$$

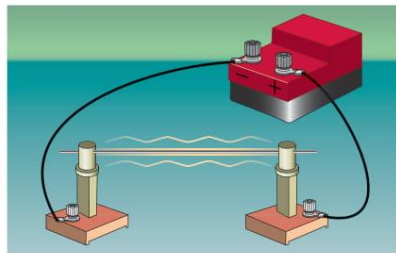


Рис. 3.2. Якщо в металевому дроті пропускати електричний струм, дріт нагріється; незначно нагріваються і підвідні проводи

Зверніть увагу!

■ Роботу постійного струму завжди можна визначити за формулою:

$$A = U I t.$$

■ Кількість теплоти, яка виділяється в провіднику, завжди можна визначити за формулою:

$$Q = I^2 R t.$$

■ Якщо ділянка кола містить тільки споживачі, в яких вся електрична енергія витрачається лише на нагрівання (резистори, нагрівальні елементи тощо), робота струму дорівнює кількості теплоти. У цьому випадку і роботу струму, і кількість теплоти можна визначити за будь-якою з таких формул:

$$A = U I t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t = Q,$$

а потужність струму — за будь-якою з таких формул:

$$P = U I = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Формули $A = I^2 R t = Q$, $P = I^2 R$ зручно використовувати, якщо провідники з'єднані *послідовно* (сила струму в провідниках однакова).

Формули $A = \frac{U^2}{R} t = Q$, $P = \frac{U^2}{R}$ зручно використовувати, якщо провідники з'єднані *паралельно* (напруга на провідниках однакова).



Рис. 3.3. Основна частина будь-якого нагрівального пристрою — нагрівальний елемент, який являє собою виготовлений із тугоплавкого матеріалу з великим питомим опором провідник, що має невелику (порівняно з підвідними проводами) площу поперечного перерізу

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 (рис. 3.3), *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.



Чому можна стверджувати, що сила струму в проводах під'єднувального шнура електронагрівального пристрою дорівнює силі струму в нагрівальному елементі?

3 Учимся розв'язувати задачі

Задача. 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 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 $Q = I^2 R t$ за законом Джоуля — Ленца, то $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}} = \frac{UIt - I^2 R t}{UIt}$. 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: $R = 0,4 \text{ Ом}$.



Підбиваємо підсумки

- Робота струму на ділянці кола дорівнює добутку напруги на ділянці, сили струму в ділянці та часу, за який визначається робота: $A = UIt$.
- Потужність струму чисельно дорівнює роботі струму за одиницю часу:

$$P = \frac{A}{t} = UI.$$
- Кількість теплоти Q , яка виділяється в провіднику зі струмом, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника та часу проходження струму: $Q = I^2 R t$ (закон Джоуля — Ленца).



Контрольні запитання

- За якою формулою обчислюють роботу струму? Якими є одиниці роботи струму?
- Доведіть, що $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.
- Сформулюйте закон Джоуля — Ленца. Чому він має таку назву?
- Які формули для розрахунку кількості теплоти, що виділяється в провіднику під час проходження струму, ви знаєте? Чи завжди можна ними користуватися?
- Дайте характеристику потужності струму як фізичної величини.



Вправа № 3

- Дві лампи з'єднані паралельно і підключені до джерела струму, напруга на виході якого становить 220 В. Фактична потужність ламп — 6 і 10 Вт. Визначте: а) опір кожної лампи; б) силу струму в лампах; в) енергію, яку разом споживають лампи за 2 години.
- Як зміниться яскравість світіння лампи розжарювання, якщо повзунок реостата пересунути ліворуч (рис. 1)? Обґрунтуйте свою відповідь.
- За даними рис. 2 визначте: а) опір нагрівального елемента бойлера; б) силу струму в нагрівальному елементі; в) час, за який бойлер нагріває 10 л води від 20 до 70 °С. ККД бойлера — 90 %; питома теплоємність води — 4200 Дж/(кг·°С).
- Якою є сила струму в обмотці двигуна електричного підйомника, якщо платформу з вантажем загальною масою 240 кг він підіймає на висоту 6 м за 50 с? ККД підйомника — 60 %, напруга на клеммах — 48 В.
- Дві електроплити, спіралі яких мають однакові опори, спочатку ввімкнули в мережу послідовно, а потім паралельно. У якому випадку електроплити споживали більшу потужність і в скільки разів?
- Дізнайтеся про будову одного із сучасних нагрівників води. Які особливості його конструкції дозволяють швидко нагрівати воду, зберігати її теплою, своєчасно вмикати і вимикати струм? Складіть 2–3 завдання про цей пристрій і виконайте їх.

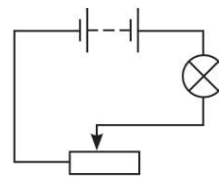


Рис. 1



Рис. 2



Експериментальне завдання

Визначте ККД електричного чайника, яким користуєтеся ви або ваші знайомі.