

Тема 22. Робота та потужність постійного струму.

Електричну напругу на ділянці електричного кола можна визначити 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**. Таким чином, робота $A = Uq$. Враховуючи, що заряд $q = It$, де t – час проходження струму, можна отримати 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). $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Якщо на ділянці кола, в якій тече струм, не виконується механічна робота й не відбуваються хімічні реакції, то робота електричного струму призводить тільки до нагрівання провідника. Згідно із законом збереження енергії кількість виділеної теплоти Q дорівнюватиме роботі A струму. Враховуючи формулу $U = IR$, а також наведену вище формулу для роботи струму, можна отримати наступний вираз:

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

Ця формула є математичним записом закону, який незалежно один від одного дослідним шляхом встановили англійський фізик Дж. П. Джоуль і російський фізик Е. Х. Ленц. Пізніше цей закон отримав назву **закон Джоуля – Ленца**:

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

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 ось іншими модифікаціями цієї формули – $Q = \frac{U^2 t}{R}$ і $Q = UIt$ – можна користуватись *тільки в тому випадку, коли вся електрична енергія витрачається на нагрівання*.

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

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

Враховуючи, що $A = UIt$, можна отримати наступні вирази для потужності:

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

Одиниця потужності в СІ – **ват** (Вт). 1 Вт = 1 Дж/с. Із формули для розрахунку потужності електричного струму випливає: 1 Вт = 1 В·А.

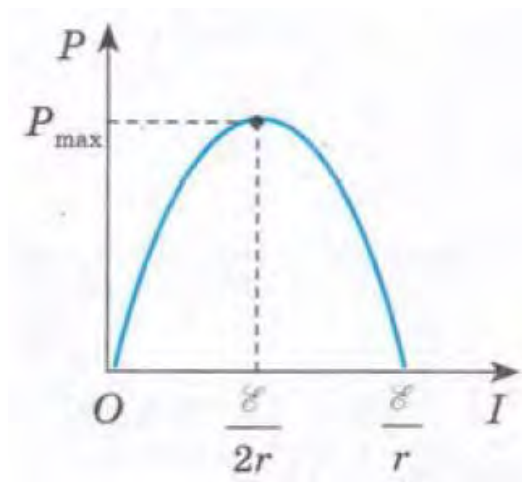
Потужність джерела ЕРС визначають за формулою:

$$P = \varepsilon I.$$

Для визначення залежності $P(I)$ – потужності, яка споживається зовнішньою частиною кола, від сили струму, можна розглянути електричне коло, яке складається із джерела струму із внутрішнім опором r і ЕРС ε , яке замкнене на зовнішнє навантаження з опором R . Якщо в колі є струм, то, враховуючи закон Ома для повного кола, ЕРС джерела можна виразити так: $\varepsilon = IR + Ir$. Таким чином, повна потужність, яку розвиває джерело струму, дорівнює:

$$P_{\text{п}} = \varepsilon I = I^2 R + I^2 r,$$

де $I^2 R = P$ – потужність, яку споживає зовнішня частина кола (зовнішнє навантаження), $I^2 r = P_{\text{в}}$ – потужність, яку споживає внутрішня частина кола. Отже, потужність, яку споживає зовнішня частина кола, дорівнює: $P(I) = \varepsilon I - I^2 r = I(\varepsilon - Ir)$.



$P(I)$ є квадратичною функцією відносно змінної I , графіком якої є параболою з гілками, напрямленими вниз (див. рисунок). Аналіз отриманої залежності показує, що потужність, яку споживає зовнішня частина кола, дорівнює нулю при $I_1 = 0$ та $I_2 = \frac{\varepsilon}{r}$, а за сили струму $I = \frac{\varepsilon}{2r}$ має максимальне значення $P_{\text{max}} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$.

Якщо підставити значення $I = \frac{\varepsilon}{2r}$ у формулу, яка виражає закон Ома для повного кола, отримаємо рівність: $\frac{\varepsilon}{2r} = \frac{\varepsilon}{R+r}$. 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.*

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 підстановки виразів $P_{\text{п}} = \varepsilon I$ та $P = UI$ в останню формулу, маємо такі вирази для ККД джерела струму:

$$\eta = \frac{UI}{\varepsilon I} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{R+r}.$$

Аналіз останнього виразу $\eta = \frac{R}{R+r}$ показує, що для збільшення ККД джерела необхідно, по можливості, зменшити його внутрішній опір. У випадку, коли r набагато менше R , ККД джерела наближається до одиниці.

Приклад 1. Яку потужність має електричний струм в автомобільній лампі, якщо напруга в бортовій мережі автомобіля – 14,4 В, а сила струму через лампу складає 7,5 А?

$$P = UI.$$

Відповідь: 108 В.

Приклад 2. Опір електричного нагрівника становить 11 Ом. До мережі якої напруги потрібно підключити нагрівник, щоб потужність електричного струму в ньому становила 4,4 кВт?

$$P = U^2/R, U^2 = PR = 4,4 \cdot 10^3 \cdot 11 = 48400, U = 220 \text{ В.}$$

Відповідь: 220 В.

Приклад 3. Яку роботу виконує струм 1,5 А в нагрівному елементі електричного чайника за 5 хв? Чайник підключено до мережі 220 В.

$$A = UIt = 220 \cdot 1,5 \cdot 300 = 99000 \text{ Дж.}$$

Відповідь: 99 кДж.

Приклад 4. Яким є питомий опір матеріалу, з якого виготовлена спіраль нагрівного елемента потужністю 2200 Вт? Довжина спіралі – 11 м, поперечний переріз – 0,21 мм², напруга в мережі – 220 В.

$$P = U^2/R, \quad R = U^2/P = 220^2/2200 = 22 \text{ Ом.}$$

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad \rho = \frac{RS}{l} = \frac{22 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6}}{11} = 0,42 \cdot 10^{-6}.$$

Відповідь: $4,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$

Приклад 5. На двох електричних лампах написано «220 В, 60 Вт» і «220 В, 40 Вт». Лампи з'єднали послідовно і підключили до мережі 220 В. Яка напруга на другій лампі?

$$P = U^2/R, \quad R = U^2/P,$$

$$R_1 = 220^2/60 \text{ Ом}, \quad R_2 = 220^2/40 = \text{Ом.}$$

$$I_1 = I_2, \quad U_1/R_1 = U_2/R_2, \quad U_1/(220^2/60) = U_2/(220^2/40), \quad U_1 = 2/3 U_2$$

$$U_1 + U_2 = U = 220 \text{ В.}$$

$$2/3 U_2 + U_2 = 220, \quad 5/3 U_2 = 220, \quad U_2 = 660/5 = 132 \text{ В.}$$

Відповідь: 132 В.

Приклад 6. У двох однакових послідовно з'єднаних резисторах, які ввімкнені в мережу, виділяється сумарна потужність 50 Вт. Яка потужність буде виділятися на кожному з резисторів, коли їх увімкнути в ту саму мережу паралельно?

R – опір кожного з резисторів.

- 1) Послідовно, $R_1 = R + R = 2R$. $P_1 = U^2/R_1 = U^2/(2R)$, $U^2 = 2P_1R = 100R$;
- 2) Паралельно, $R_2 = R/2$. $P_2 = U^2/R_2 = 100R/(R/2) = 200$ Вт – сумарна потужність при паралельному з'єднанні.
На кожному з двох резисторів виділяється $P_2/2 = 100$ Вт.

Відповідь: 100 Вт.

Приклад 7. В електричному чайнику за 10 хв можна нагріти 1 л води на 10 °С. Скільки води можна нагріти на ті самі 10 °С за ті самі 10 хв у двох таких електричних чайниках, які ввімкнено до мережі послідовно? Залежність опору нагрівачів чайників від температури не враховуйте, напруга в мережі в обох випадках однакова. Тепловими втратами знехтуйте.

Відповідь: 0,5 л.

Приклад 8. З якою швидкістю рухається трамвай масою 10 т по горизонтальній ділянці шляху, якщо сила струму в обмотках його двигуна 110 А? Коефіцієнт опору рухові дорівнює 0,1, напруга контактної мережі 600 В, ККД двигуна 60%.

$$m = 10^4 \text{ кг}, I = 110 \text{ А}, U = 600 \text{ В}, \mu = 0,1, \eta = 0,6.$$

$$F = F_{\text{оп}} = \mu mg, \quad P_{\text{кор}} = Fv, \quad P_{\text{заг}} = UI, \eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{заг}}} = \frac{Fv}{UI}$$

$$v = \frac{UI\eta}{F} = \frac{UI\eta}{\mu mg} = \frac{600 \cdot 110 \cdot 0,6}{0,1 \cdot 10^4 \cdot 9,8} \approx 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Відповідь: 4 м/с.

Приклад 9. ККД джерела струму – це:

- А) відношення напруги на клеммах джерела до його ЕРС;
- Б) відношення сили струму в зовнішньому колі до сили струму через джерело;
- В) відношення падіння напруги на внутрішньому опорі джерела до його ЕРС;
- Г) відношення падіння напруги на внутрішньому опорі джерела до напруги на його клеммах.

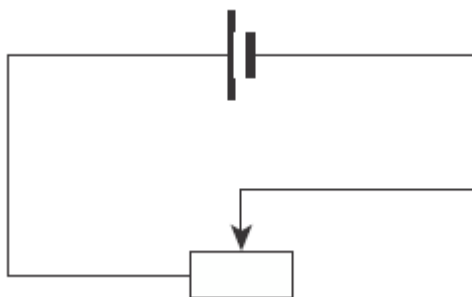
Відповідь: А.

Відношення напруги на клеммах джерела до його ЕРС. За визначенням ККД — це

$\eta = \frac{A_{\text{зовн.колі}}}{A_{\text{джерела}}} \cdot 100\%$. Робота струму в зовнішньому колі можна обчислити за формулою $A_{\text{зовн.колі}} = IU_{\text{зовн.колі}}$, роботу джерела струму — за формулою $A_{\text{джерела}} = \mathcal{E}I$. Напруга на зовнішньому колі U є напругою на клеммах джерела струму. Тому ККД джерела буде $\eta = \frac{U_{\text{зовн.колі}}}{\mathcal{E}} \cdot 100\%$.

Приклад 10. Джерело струму та реостат складають електричне коло (див. рисунок), силу струму в якому можна регулювати за допомогою пересування повзунка реостата. Повзунок починають рухати вправо.

Оберіть правильне твердження.



- А) сила струму через джерело зростає;
- Б) напруга на клеммах джерела зростає;
- В) корисна потужність струму не змінюється;
- Г) ЕРС джерела зменшується.

Відповідь: Б.

Напруга на клеммах джерела зростає. Під час руху повзунка реостата вправо опір реостата зростає, зменшується сила струму в колі, зменшується падіння напруги на внутрішньому опорі джерела струму, збільшується напруга на клеммах джерела.

Приклад 11. Визначте довжину ніхромового дроту з площею перерізу $0,25 \text{ мм}^2$, з якого виготовлено нагрівник електричного чайника. Чайник живиться від мережі з напругою 220 В і нагріває $1,5 \text{ л}$ води від 25°C до 100°C за 5 хв . ККД чайника становить 50% .

$$S = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2, \quad U = 220 \text{ В}, \quad \text{ККД} = 50\%, \quad \rho = 1,1 \cdot 10^{-6}, \quad t = 300 \text{ с}.$$

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad l = \frac{RS}{\rho}.$$

$$Q = cm\Delta t = A_{\text{кор}}, \quad P_{\text{кор}} = \frac{A_{\text{кор}}}{t} = \frac{cm\Delta t}{t}$$

$$P_{\text{заг}} = \frac{U^2}{R}, \quad R = \frac{U^2}{P_{\text{заг}}}, \quad \text{ККД} = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{заг}}} = \frac{cm\Delta t}{t \cdot P_{\text{заг}}}, \quad P_{\text{заг}} = \frac{cm\Delta t}{t \cdot \text{ККД}},$$

$$l = \frac{U^2 St \cdot \text{ККД}}{\rho cm\Delta t} = \frac{220 \cdot 220 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7} \cdot 300 \cdot 0,5}{1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 4200 \cdot 1,5 \cdot 75} = 3,5 \text{ м}.$$

Відповідь: $3,5 \text{ м}$.

Приклад 12. Двигун ліфта працює від мережі напругою 220 В . Його ККД становить 80% . Визначте силу струму, який споживає двигун ліфта під час рівномірного підйому кабіни масою 500 кг зі швидкістю 2 м/с . Вважайте, що $g = 10 \text{ м/с}^2$.

$$U = 220 \text{ В}, \quad \text{ККД} = 0,8, \quad m = 500 \text{ кг}, \quad v = 2 \text{ м/с}.$$

$$P_{\text{кор}} = Fv = mgv, \quad P_{\text{заг}} = UI, \quad \text{ККД} = P_{\text{кор}}/P_{\text{заг}}, \quad \text{ККД} = mgv/UI,$$

$$I = mgv/(U \cdot \text{ККД}) = 500 \cdot 10 \cdot 2 / (220 \cdot 0,8) = 56,8 \text{ А}.$$

Відповідь: $56,8 \text{ А}$.

Домашнє завдання:

основне: 3.108, 3.110, 3.111, 3.113, 3.115, 3.116, 3.117, 3.118, 3.120

додаткове: 3.109, 3.112, 3.119, 3.121