

## Тема 22. Робота та потужність постійного струму. ККД джерела. Електродвигуни та їх ККД.

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:

$$Q = I^2 Rt.$$

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  $Q = I^2 Rt$ . 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:

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

*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:

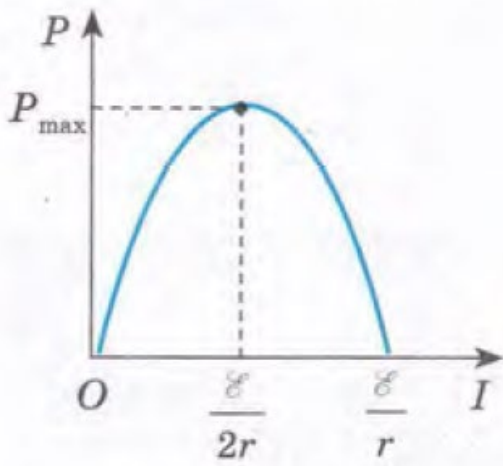
$$P = \varepsilon I.$$

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  $\varepsilon$ , 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:

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

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

$$P(I) = \varepsilon I - I^2r = I(\varepsilon - Ir).$$



$P(I)$  є квадратичною функцією відносно змінної  $I$ , графіком якої є парабола 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  $P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$ .

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 опорі  $r$  джерела струму.*

**Коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta$  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 мм<sup>2</sup>, напруга в мережі – 220 В.

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

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

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

**Приклад 5.** 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 фор-

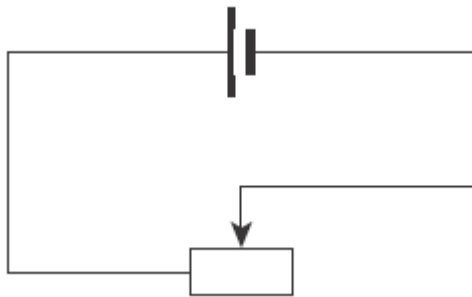
мулою  $A_{\text{зовн.колі}} = IU_{\text{зовн.колі}}$ , роботу джерела струму — за формулою  $A_{\text{джерела}} = \mathcal{E}I$ .

Напруга на зовнішньому колі і є напругою на клеммах джерела струму. Тому ККД

джерела буде  $\eta = \frac{U_{\text{зовн.колі}}}{\mathcal{E}} \cdot 100\%$ .

**Приклад 6.** 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 7.** 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%.

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

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

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

**Відповідь:** 4 м/с.

**Приклад 8.** 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 л води від  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  за 5 хв. ККД чайника становить 50%.

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

$$c = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = \rho \frac{l}{S}, \quad l = \frac{RS}{\rho}$$

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

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

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

**Відповідь:** 3,5 м.

**Приклад 9.** 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  $g = 10 \text{ м}/\text{с}^2$ .

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

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

$$I = mgv/(U \cdot \text{ККД}) = 500 \cdot 9,8 \cdot 2 / (220 \cdot 0,8) = 56,8 \text{ А.}$$

**Відповідь:** 56,8 А.

**Домашнє завдання:** № 614, 615, 617, 620, 621, 624, 627, 628.