

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-282-2-58-65>

УДК 62-83

## ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ В УСТАЛЕНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ, ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЇХ ПІДВИЩЕННЯ

Руднєв Є.С., Романченко Ю.А., Рибалка Є.Л.

## ENERGY LOSSES IN STEADY-STATE OPERATING MODES OF ELECTRIC DRIVES, ENERGY CHARACTERISTICS AND THEIR IMPROVEMENT

Rudniev Y.S., Romanchenko J.A., Rybalka Y.L.

*В статті представлений аналіз втрат енергії в усталених режимах роботи електроприводів та підвищення енергетичних характеристик. Показано, що задача правильного визначення/розрахунку необхідної потужності електроприводу та вибору двигунів, які володіють достатньою потужністю та переважувальною здатністю, має виключно важливе практичне значення. Від правильності вибору двигунів при проектуванні істотно залежить продуктивність, надійність та економічність машин, що приводяться в рух. Авторами зазначено, що проходження потоку енергії від мережі до робочого органу механізму супроводжується втратами енергії у всіх елементах електроприводу. Необхідність розрахунку втрат енергії при проектуванні та експлуатації обумовлена тим, що визначення непродуктивних витрат енергії є найважливішою характеристикою економічності роботи механізму та їх аналіз – основа пошуку шляхів енергозбереження. Зазначено, що втрати в електричних машинах поділяються на постійні та змінні. Змінні втрати двигуна обумовлені протіканням струмів по опорам силового ланцюга, отже, безпосередньо пов'язані з навантаженням двигуна. Проаналізовано втрати у трьох видах двигунів. Показано, що для перевірки двигуна по нагріванню, необхідно враховувати тільки втрати, що гріють, які виділяються безпосередньо у двигуні. Наведено співвідношення, які дають можливість розраховувати втрати енергії у двигуні для перевірки його умов роботи. Розглянуто приклад розрахунку та наведено ряд рекомендацій, які дають змогу додатково спростити визначення втрат для конкретних умов. В статті зазначено, що економічність роботи електромеханічної системи визначає ККД електроприводу, а також коефіцієнт потужності, що враховує ефективність використання активної енергії. Розглянуто основні заходи щодо підвищення коефіцієнту потужності*

*асинхронних двигунів. Швидкодія асинхронних електроприводів з реостатним регулюванням швидкості може бути досягнута вибором оптимального ковзання під час пуску та гальмування. Оскільки механічні характеристики асинхронного двигуна нелінійні, є оптимальне значення критичного моменту, що забезпечує мінімум часу розгону і гальмування приводу.*

**Ключові слова:** *потужність, втрати енергії, усталений режим роботи, електропривод, асинхронний двигун, коефіцієнт потужності, ковзання.*

**Вступ.** В інженерній діяльності фахівця-електромеханіка задача правильного визначення/розрахунку необхідної потужності електроприводу та вибору двигунів, які володіють достатньою потужністю та переважувальною здатністю, має виключно важливе практичне значення. Обмеження, що накладаються на процеси електромеханічного перетворення енергії за умовами нагрівання, умовами комутації струму на колекторах машин постійного струму, за максимальним моментом двигунів змінного струму [1] при виборі двигунів повинні враховуватися ретельно, достовірно, з розумним запасом, обґрунтованим аналізом вірогідних факторів, які визначають нагрівання та переважувальну здатність двигунів, а також оцінкою точності використовуваних методів розрахунку.

Помилки у бік заниження необхідної потужності електроприводу знижують надійність його роботи і за несприятливих умов викликають прискорене зношування ізоляції і

вихід двигунів з ладу. Однак помилки у бік запасу також спричиняють витрати, пов'язані з нераціональним використанням дорогого обладнання, погіршенням енергетичних показників недовантажених двигунів та збільшенням динамічних навантажень механізмів. Тому від правильності вибору двигунів при проектуванні істотно залежить продуктивність, надійність та економічність машин, що приводяться в рух.

Необхідні відомості про переважувальну здатність різних двигунів, достатні для правильного вибору двигунів за переважувальною здатністю викладені у [1, 2]. У статті приділяється увага вибору двигунів по нагріванню/нагріву, який при роботі електроприводу визначається тепловиділенням, обумовленим втратами енергії в елементах конструкції двигунів – обмотках, магнітопроводах, колекторах тощо. Визначимо втрати енергії не тільки в усталеному, а й у перехідних процесах роботи електроприводу. Даний матеріал необхідний/корисний для методу розрахунку навантажувальних діаграм електроприводу та обґрунтування загальних методів перевірки двигуна на нагрівання, які використовуються при проектуванні електроприводів.

**Мета статті.** Вивчення втрат енергії в усталених режимах роботи електроприводів, для подальшої побудови навантажувальних діаграм роботи електроприводу, розрахунку процесів нагрівання та охолодження двигунів та дослідження і підвищення енергетичних характеристик.

#### Результати дослідження.

*Втрати енергії в усталених режимах роботи електроприводу.*

Енергія, яка необхідна для здійснення робочим органом механізму корисної роботи, електропривод у загальному випадку споживає з мережі. Проходження потоку енергії від мережі до робочого органу механізму супроводжується втратами енергії у всіх елементах електроприводу. Протікання струмів у силовому ланцюзі та ланцюзі збудження двигуна викликає втрати електричної енергії в активних опорах; зміни магнітного потоку є причиною втрат у магнітному ланцюгу двигуна, обумовлених вихровими струмами та гістерезисом. Сили тертя, і навіть опір руху, які створюються самовентилляцією двигуна, викликають механічні втрати двигуна, а сили тертя у передачах – механічні втрати у кінематичному ланцюзі [3]. Необхідність розрахунку втрат

енергії при проектуванні та експлуатації обумовлена тим, що визначення непродуктивних витрат енергії є найважливішою характеристикою економічності роботи механізму та їх аналіз – основа пошуку шляхів енергозбереження. Інша, не менш важлива для практики, задача достовірної оцінки втрат енергії при роботі двигуна пов'язана з вибором двигунів за потужністю при проектуванні, визначенням їх завантаження по нагріванню в процесі експлуатації.

Для керування електроприводом у його силові ланцюги та ланцюги збудження можуть вводитися активні зовнішні опори або інші елементи, наприклад, реактори, що володіють активним опором. Це враховано у типових схемах приводу виробничого механізму, для кожного з яких необхідно проаналізувати втрати енергії в усталених режимах роботи на основі відповідних розрахункових співвідношень. Сумарну потужність втрат в аналізованому електроприводі з урахуванням вище сказаного можна в загальному вигляді записати так [1]:

$$\Delta P_{\text{сп}\Sigma} = \Delta P_{\text{дв}\Sigma} + \Delta P_{\text{мех}\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 R_i + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех.дв}} + \sum_{j=1}^{j=k} \Delta P_{\text{мех.}j}, \quad (1)$$

де  $\Delta P_{\text{дв}\Sigma}$  – потужність втрат енергії у двигуні та його електричних ланцюгах;  $\Delta P_{\text{мех}\Sigma}$  – потужність втрат у механізмі;  $I_i$ ,  $R_i$  – відповідно струм та опір  $i$ -го елемента;  $\Delta P_{\text{ст}}$  – втрати у сталі двигуна;  $\Delta P_{\text{мех.дв}}$  – механічні втрати двигуна;  $\Delta P_{\text{мех.}j}$  – потужність втрат в  $j$ -му механічному елементі.

Проаналізуємо втрати у трьох видах двигунів. При цьому нагадаємо, що втрати в електричних машинах прийнято ділити на постійні  $\Delta P_c$  та змінні  $\Delta P_v$ :

$$\Delta P_{\text{дв}\Sigma} = \Delta P_c + \Delta P_v. \quad (2)$$

Змінні втрати двигуна обумовлені протіканням струмів по опорам силового ланцюга, отже, безпосередньо пов'язані з навантаженням двигуна. Інші втрати також можуть змінюватися при роботі двигуна, однак або повністю не залежать від навантаження, або ця залежність не є явно вираженою, тому їх умовно відносять до постійних втрат. Розглянемо ці складові втрат для двигуна постійного струму із незалежним збудженням.

Постійні втрати двигуна:

$$\Delta P_c = \Delta P_B + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех.дв}. \quad (3)$$

де  $\Delta P_B = I_B^2 (r_B + r_{в.д}) = U_B I_B$  – потужність втрат на збудження двигуна;  $U_B, I_B$  – відповідно напруга та струм ланцюга збудження.

Потужність втрат на збудження максимальна під час роботи на природній характеристиці при  $\Phi = \Phi_{ном}$ . У режимах роботи з ослабленим полем вона знижується при  $U_B = U_{в.ном} = \text{const}$  пропорційно струму  $I_B$ , причому потужність втрат у міді обмотки знижується пропорційно квадрату струму збудження.

Втрати в сталі електричної машини залежать від квадрата індукції та від частоти перемагнічування магнітопроводу у ступені 1,3. В усталених режимах потік  $\Phi$  постійний, тому втрати мають місце тільки в якорі, що обертається

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст.ном} \left( \frac{\Phi}{\Phi_{ном}} \right)^2 \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^{1,3}, \quad (4)$$

частота перемагнічування сталі якого пропорційна кутової швидкості двигуна. При  $\Phi = \Phi_{ном} = \text{const}$  втрати в сталі залежать тільки від швидкості, в режимах ослаблення поля змінюються меншою мірою, оскільки збільшення швидкості відбувається за рахунок зниження потоку двигуна. Вочевидь, що зміни навантаження двигуна впливають на втрати сталі внаслідок змін швидкості двигуна і впливу реакції якоря.

Відомо, що момент механічних втрат двигуна  $\Delta M_{мех.дв}$  містить складові сухого тертя в підшипниках та вентиляторного моменту (рис. 1, а) [1]. Якщо прийняти його постійним та рівним середньому значенню, тоді отримаємо:

$$\Delta P_{мех.дв} = \Delta P_{мех.дв.ном} \frac{\omega}{\omega_{ном}}. \quad (5)$$

Змінні втрати двигуна:

$$\Delta P_v = I_\alpha^2 (r_{я\Sigma} + r_{я.д}). \quad (6)$$

Підсумовуючи (4) – (6), отримуємо повні втрати у двигуні та його електричних ланцюгах:

$$\begin{aligned} \Delta P_{дв\Sigma} = I_B^2 (r_B + r_{в.д}) + \Delta P_{ст.ном} \left( \frac{\Phi}{\Phi_{ном}} \right)^2 \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^{1,3} + \\ + \Delta P_{мех.дв.ном} \frac{\omega}{\omega_{ном}} + I_\alpha^2 (r_{я\Sigma} + r_{я.д}). \end{aligned} \quad (7)$$

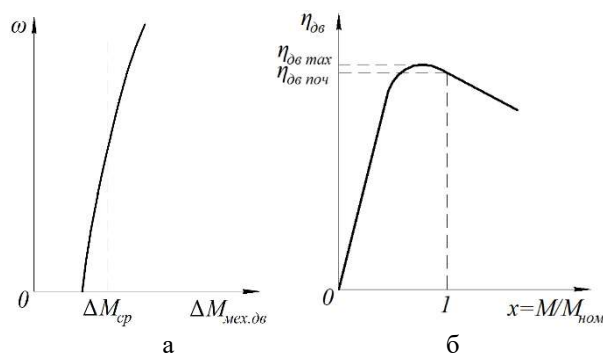


Рис. 1. Характеристика моменту втрат (а) та ККД двигуна (б)

При розрахунках для перевірки двигуна на нагрівання, необхідно враховувати тільки втрати, що гріють  $\Delta P_{дв.гр}$ , які виділяються безпосередньо у двигуні, тобто за вирахуванням втрат у зовнішніх додаткових опорах. У цьому випадку перший та четвертий доданки рівняння (7) будуть відповідно складати  $I_B^2 r_B$  та  $\Delta P_{в.ном} = (I_\alpha / I_{ном})^2$  замість  $I_B^2 (r_B + r_{в.д})$  та  $I_\alpha^2 (r_{я\Sigma} + r_{я.д})$ , де  $\Delta P_{в.ном}$  – змінні втрати двигуна при роботі у номінальному режимі.

Співвідношення (6) справедливе й для двигуна зі змішаним збудженням, якщо  $I_B$  – струм обмотки незалежного збудження. Для двигуна з послідовним збудженням у цьому виразі слід приймати  $I_B = 0$ , тому що  $r_{я\Sigma}$  включає в себе опір послідовної обмотки збудження, і при розрахунках мати на увазі, що потік двигуна в цьому випадку визначається струмом якоря  $\Phi(I_\alpha)$ .

Для асинхронного двигуна частота перемагнічування сталі статора є частота прикладеної до статора напруги, а для ротора пропорційна ковзанню [4, 5]. Тому постійні втрати асинхронного двигуна можна розрахувати:

$$\begin{aligned} \Delta P_c = 3I_{10}^2 \left( \frac{\Phi_\mu}{\Phi_{\mu ном}} \right)^2 (r_1 + r_{1.д}) + \\ + \Delta P_{1ст.ном} \left( \frac{\Phi_\mu}{\Phi_{\mu ном}} \right)^2 \left( \frac{f_1}{f_{1ном}} \right)^{1,3} (1 + s^{1,3}) + \\ + \Delta P_{мех.дв.ном} \frac{\omega}{\omega_{ном}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тут  $I_{10}$  – струм холостого ходу двигуна. Перший доданок наближено враховує втрати від протікання струму намагнічування по ланцюгу статора, умовно виділені із загальних втрат, пропорційних квадрату струму статора. Втрати  $\Delta P_{1\text{ст.ном}}$  представляють собою втрати в сталі статора у номінальному режимі, причому виходячи з приблизної рівності обсягів сталі статора і ротора, при  $s=1$  прийнято  $\Delta P_{2\text{ст.ном}} = \Delta P_{1\text{ст.ном}}$ .

Змінні втрати асинхронного двигуна:

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= 3I_1^2 (r_1 + r_{1д}) + 3I_2^2 (r_2' + r_{2д}') = \\ &= 3I_2^2 (r_2' + r_{2д}') \left( 1 + \frac{r_1 + r_{1д}}{r_2' + r_{2д}'} \right) = M \omega_0 s \left( 1 + \frac{r_1 + r_{1д}}{r_2' + r_{2д}'} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

У виразі (9) прийнято  $I_1 = I_2'$ , тому що втрати від струму холостого ходу вже умовно враховані у постійних втратах. Повні втрати асинхронного двигуна отримуємо просумувавши (8) та (9):

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{дв}\Sigma} &= 3I_{10}^2 \left( \frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu\text{ном}}} \right)^2 (r_1 + r_{1д}) + \\ &+ \Delta P_{1\text{ст.ном}} \left( \frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu\text{ном}}} \right)^2 \left( \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \right)^{1,3} (1 + s^{1,3}) + \\ &+ \Delta P_{\text{мех.дв.ном}} \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} + M \omega_0 s \left( 1 + \frac{r_1 + r_{1д}}{r_2' + r_{2д}'} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Гріючи втрати асинхронного двигуна:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{дв.гр}} &= 3I_{10}^2 r_1^2 \left( \frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu\text{ном}}} \right)^2 + \Delta P_{1\text{ст.ном}} \left( \frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu\text{ном}}} \right)^2 \times \\ &\times \left( \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \right)^{1,3} (1 + s^{1,3}) + \Delta P_{\text{мех.дв.ном}} \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} + \\ &+ M \omega_0 s \left( 1 + \frac{r_1}{r_2'} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Для синхронного двигуна за аналогією с асинхронним двигуном, при  $s = 1$ :

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{дв}\Sigma} &= I_B^2 (r_B + r_{Bд}) + \Delta P_{1\text{ст.ном}} \left( \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ном}}} \right)^2 \times \\ &\times \left( \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \right)^{1,3} + \Delta P_{\text{мех.дв.ном}} \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} + 3I_1^2 (r_1 + r_{1д}). \end{aligned} \quad (12)$$

При перевірці двигуна на нагрівання гріючі втрати визначаються (12) при  $r_{Bд} = r_{1д} = 0$ .

Наведені співвідношення дають можливість розраховувати втрати енергії у двигуні для перевірки його умов роботи по нагріванню. Зазначимо, що на практиці розрахунки втрат навіть у поданому спрощеному вигляді можуть викликати труднощі у зв'язку з відсутністю всіх даних та характеристик. Розглянемо далі приклад розрахунку та ряд рекомендацій, які дають змогу додатково спростити визначення втрат для конкретних умов.

При необхідності визначення енергетичних показників електроприводу повні втрати потужності у двигуні та його ланцюгах дозволяють розрахувати ККД двигуна  $\eta_{\text{дв}} = P_2 / P_1$ . Враховуючи що електромагнітний момент пропорційний струму силового ланцюга, залежність ККД від коефіцієнта завантаження двигуна  $x = M / M_{\text{ном}}$  можна представити більш наглядно ( $\omega = \omega_{\text{ном}}$ , додаткові опори відсутні):

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M \omega}{M \omega + \Delta P_{\text{дв}\Sigma}} = \frac{P_{\text{ном}} x}{P_{\text{ном}} x + \Delta P_c + \Delta P_{\text{вном}} x^2}. \quad (13)$$

Залежність  $\eta_{\text{дв}} = f(x)$  нелінійна та має максимум при  $x_{\text{опт}} = \sqrt{\Delta P_c / \Delta P_{\text{вном}}}$ . Визначивши екстремум цієї функції, отримуємо максимальне значення ККД:

$$\eta_{\text{дв max}} = \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}} + 2\sqrt{\Delta P_c \Delta P_{\text{вном}}}}. \quad (14)$$

При  $\Delta P_c = \Delta P_{\text{вном}}$  максимум ККД відповідає номінальному навантаженню двигуна. Зазвичай постійні втрати відносно менші,  $x_{\text{опт}} < 1$ , завдяки чому забезпечується збереження високого ККД у широкому діапазоні зміни завантаження двигуна (див. рис. 1, б).

Повні втрати енергії в електроприводі відповідно до (2) включають в себе сумарні втрати в передавальному пристрої та рухомих елементах механізму. Відомо, що момент тертя у передачах та механізмі залежить від корисного навантаження передач  $M_{\text{кор}}$ , як показано на рис. 2, а, де  $\Delta M_{\text{мех}0}$  є момент тертя спокою. З урахуванням цієї залежності потужність втрат у механізмі можна представити:

$$\Delta P_{\text{мех}\Sigma} = \Delta P_{\text{мех}0} \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} + (\Delta P_{\text{мех.ном}} - \Delta P_{\text{мех}0}) \frac{M_{\text{кор}}}{M_{\text{мех.ном}}} \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (15)$$

де  $\Delta P_{\text{мех}0} = \Delta M_{\text{мех}0} \omega_{\text{ном}}$ ;  $\Delta P_{\text{мех.ном}} = \Delta M_{\text{мех.ном}} \omega_{\text{ном}}$ .

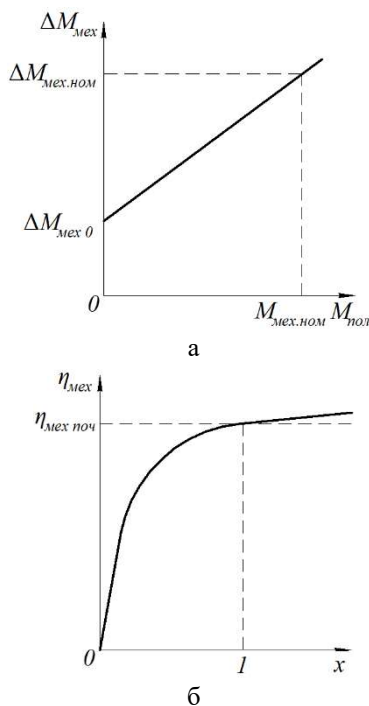


Рис. 2. Характеристика моменту втрат (а) та ККД (б) механічної частини електропривода

Таким чином, і в механічній частині втрати можна розділити на постійні та змінні, й визначити ККД механізму так (при  $\omega = \omega_{\text{ном}}$ ):

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{P'_{\text{ном}} x}{P'_{\text{ном}} x + \Delta P_{\text{мех}0} + (\Delta P_{\text{мех.ном}} - \Delta P_{\text{мех}0}) x}, \quad (16)$$

де  $P'_{\text{ном}} = M_{\text{мех.ном}} \omega_{\text{ном}}$ .

Ця залежність також нелінійна, проте пропорційність змінних втрат коефіцієнту завантаження визначає монотонне зростання ККД при зростанні корисного навантаження. І тут відносно зменшення постійних втрат розширює межі зміни навантаження, у яких ККД близький до номінального (рис. 2, б).

#### Енергетичні характеристики

Економічність роботи електромеханічної системи визначає ККД електроприводу:

$$\eta_{\text{еп}} = \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{мех}}. \quad (17)$$

Розглянуті залежності  $\eta_{\text{дв}}$  та  $\eta_{\text{мех}}$  від завантаження електроприводу дозволяють переконатися в тому, що значний запас при виборі двигуна за потужністю та недовикористання його в експлуатації погіршує енергетичні показники приводу та механізму.

На рис. 3 наведено залежність  $\eta = f(P_2)$ , яка побудована під час роботи двигуна на природній характеристиці. ККД у номінальному режимі дорівнює  $\eta_{\text{ном}} = 0,75 \div 0,95$ , зі збільшенням номінальної потужності  $P_{\text{ном}}$  двигуна ККД зростає. При наростанні навантаження  $P_2$  на валу двигуна ККД зростає у зв'язку з ростом корисної потужності, при  $P_2 \approx P_{\text{ном}}$  ККД досягає максимуму, при подальшому зростанні  $P_2$  ККД знижується у зв'язку зі збільшенням втрат потужності всередині машини.

Іншим показником, що характеризує машину змінного струму як приймач електричної енергії є коефіцієнт потужності, що враховує ефективність використання активної енергії. При синусоїдальній формі напруги і струму коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  є відношенням активної потужності ( $P$ ) до повної потужності ( $S$ ). На рис. 3, б наведена енергетична характеристика асинхронного двигуна  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ . При роботі в режимах, близьких до номінального, коефіцієнт потужності досягає значень  $\cos \varphi_1 = 0,7 \div 0,85$ . У режимі холостого ходу двигун споживає переважно реактивну енергію,  $\cos \varphi_{10} = 0,05 \div 0,15$  враховує споживання активної енергії на покриття втрат енергії в двигуні. При  $P_2 > P_{\text{ном}}$  коефіцієнт потужності знижується за рахунок зростання реактивної складової струму ротора.

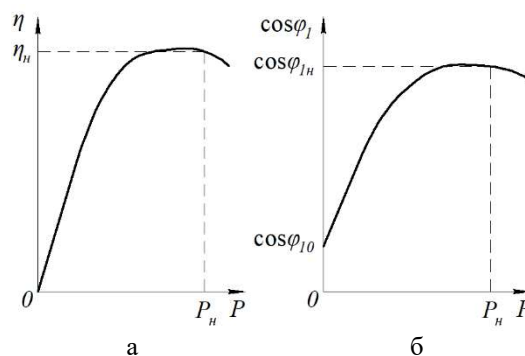


Рис. 3. Енергетичні характеристики АД

*Підвищення енергетичних показників асинхронних двигунів.*

Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна при синусоїдальних напругах і струмах визначається виразом

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (18)$$

де  $P = M\omega_0 + 3I_1^2 R_1$  – активна потужність;  
 $Q = 3I_0^2 x_0 + 3I_1^2 x_1 + 3I_2^2 x_2'$  – реактивна потужність;  
 $S$  – повна потужність [2].

Для більшості двигунів номінальний  $\cos \varphi \approx 0,8 \div 0,9$ , при цьому  $Q \approx (0,5 \div 0,7)P$ , тобто асинхронний двигун споживає значну реактивну потужність. Чим нижче  $\cos \varphi$ , тим більше споживається з мережі реактивної потужності, завантажуючи її реактивним струмом та викликаючи додаткові втрати. При цьому зменшується пропускна спроможність лінії.

Коефіцієнт потужності залежить від завантаження асинхронного двигуна. При холостому ході коефіцієнт потужності невеликий, внаслідок значного за величиною струму намагнічування по відношенню до активної складової. По мірі зростання навантаження зростає  $\cos \varphi$ , досягаючи свого максимального значення приблизно при номінальному навантаженні.

Асинхронні двигуни є основним споживачем реактивної потужності у системах енергопостачання. Тому підвищення  $\cos \varphi$  асинхронних двигунів дозволяє суттєво знизити втрати енергії в мережі, що дуже актуально в умовах дефіциту та великої вартості електроенергії.

Основними заходами щодо підвищення  $\cos \varphi$  асинхронних двигунів є:

- заміна малозавантажених двигунів двигунами меншої потужності, що збільшить ступінь завантаження, а отже, і  $\cos \varphi$ ;
- обмеження невиробничої роботи асинхронних двигунів на холостому ході;
- зниження напруги живлення двигунів, які працюють з малим навантаженням, шляхом застосування системи регулятор напруги-АД. При зниженні напруги до оптимального значення зменшується магнітний потік двигуна, струм намагнічування та втрати у сталі. В результаті цього підвищується  $\cos \varphi$  й зменшується сумарні втрати двигуна. Зменшення напруги живлення дуже ефективно

для асинхронних електроприводів з вентиляторним навантаженням;

- використання конденсаторів потужності: додавання банків конденсаторів до системи може допомогти знизити вплив індуктивного опору і підвищити  $\cos \varphi$ ;

- використання реактивного потужного компенсатора: це пристрій, який компенсує реактивну потужність, полегшуючи роботу асинхронного двигуна та підвищуючи його  $\cos \varphi$ ;

- використання високоефективних обмоток також може допомогти зменшити енергетичні втрати та покращити коефіцієнт потужності.

- заміна асинхронних приводів з реостатним регулюванням швидкості частотно-регульованим, що допоможе оптимізувати роботу асинхронних двигунів, знижуючи вплив реактивної потужності на їх ефективність.

Швидкодія асинхронних електроприводів з реостатним регулюванням швидкості може бути досягнута вибором оптимального ковзання під час пуску та гальмування. Оскільки механічні характеристики асинхронного двигуна нелінійні, є оптимальне значення критичного моменту, що забезпечує мінімум часу розгону і гальмування приводу.

**Висновки.** Необхідність розрахунку втрат енергії при проектуванні та експлуатації обумовлена тим, що визначення непродуктивних витрат енергії є найважливішою характеристикою економічності роботи механізму та їх аналіз – основа пошуку шляхів енергозбереження. Змінні втрати двигуна обумовлені протіканням струмів по опорам силового ланцюга, отже, безпосередньо пов'язані з навантаженням двигуна. Наведено приклад розрахунку та ряд рекомендацій, які дають змогу додатково спростити визначення втрат для конкретних умов.

Пропорційність змінних втрат коефіцієнту завантаження визначає монотонне зростання ККД при зростанні корисного навантаження. І тут відносно зменшення постійних втрат розширює межі зміни навантаження, у яких ККД близький до номінального.

Для зменшення втрат можна вжити різні заходи, такі як покращення ефективності електродвигунів, використання оптимізованих приводних механізмів та енергоефективних кабелів, а також оптимізація систем керування та моніторингу.

Асинхронні двигуни є основним споживачем реактивної потужності у системах енергопостачання. Тому підвищення  $\cos\varphi$  асинхронних двигунів дозволяє суттєво знизити втрати енергії в мережі, що дуже актуально в умовах дефіциту та великої вартості електроенергії.

#### Л і т е р а т у р а

1. Зеленов А.Б. Теорія електропривода. Методика проектування електроприводів: Підручник. Луганськ: Ноулідж, 2010. 670 с.
2. Колб Ант. А, Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. 2-е вид. перероб. і доп. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2011. 540 с.
3. Rudnjev, Y., Romanchenko, J., Romanchenko, O. Study of Impact Phenomenon in Mechatronic Systems Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, 2022, p. 1-6.
4. Шевченко І.С., Морозов Д.І. Електромеханічні процеси в асинхронному електроприводі: навчальний посібник. Алчевськ: ДонДТУ. 2009. 349 с.
5. Rudnjev J., Shevchenko I., Romanchenko J. Mathematical model of an asynchronous machine in real coordinates of state. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 5 (269). С. 24-28.

#### R e f e r e n c e s

1. Zelenov A.B. Teorija elektroprivoda. Metodyka proektuvannja elektroprivodiv: Pidruchnyk. Lugansk: Noulidzh, 2010. 670 s.
2. Kolb Ant. A, Kolb A.A. Teorija elektroprivodu: Navchal'nyj posibnyk. 2-e vyd. pererob. i dop. Dnipropetrovs'k: Nacional'nyj girnychyj universytet, 2011. 540 s.
3. Rudnjev, Y., Romanchenko, J., Romanchenko, O. Study of Impact Phenomenon in Mechatronic Systems Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, 2022, p. 1-6.
4. Shevchenko I.S., Morozov D.I. Elektromehanični procesy v asynhronnomu elektroprivodi: navchal'nyj posibnyk. Alchevs'k: DonDTU. 2009. 349 s.
5. Rudnjev J., Shevchenko I., Romanchenko J. Mathematical model of an asynchronous machine in

real coordinates of state. Visnyk Shidnoukrai'ns'kogo nacional'nogo universytetu imeni Volodymyra Dalja. 5 (269). S. 24-28.

#### **Rudnjev Y.S., Romanchenko J.A., Rybalka Y.L. Energy losses in steady-state operating modes of electric drives, energy characteristics and their improvement.**

*The article presents an analysis of energy losses in steady-state operating modes of electric drives and an increase in energy performance. It is shown that the task of correctly determining/calculating the required electric drive power and selecting motors with sufficient power and overload capacity is of extremely important practical importance. The performance, reliability and efficiency of driven machines significantly depend on the correct choice of engines during design. The authors indicated that the passage of energy flow from the network to the working body of the mechanism is accompanied by energy losses in all elements of the electric drive. The need to calculate energy losses during design and operation is due to the fact that the determination of unproductive energy costs is the most important characteristic of the efficiency of the mechanism, and their analysis is the basis for finding ways to save energy. It is indicated that losses in electric machines are divided into constant and variable. Variable motor losses are caused by the flow of currents through the resistances of the power circuit, and therefore are directly related to the motor load. Losses in three types of engines are analyzed. It is shown that to check the engine for heating, it is necessary to take into account only the heating losses that are generated directly in the engine. Relationships are given that allow you to calculate energy losses in the engine to check its operating conditions. An example of a calculation is considered and a number of recommendations are given to further simplify the determination of losses for specific conditions. The article notes that the efficiency of the electromechanical system determines the efficiency of the electric drive, as well as the power factor, which takes into account the efficiency of active energy use. The main measures to increase the power factor of asynchronous motors are considered. The performance of asynchronous electric drives with rheostatic speed control can be achieved by choosing optimal sliding during starting and braking. Since the mechanical characteristics of an asynchronous motor are nonlinear, there is an optimal value of the critical torque that provides a minimum of acceleration and deceleration time for the drive.*

**Key words:** power, energy losses, steady state operation, electric drive, asynchronous motor, power factor, slip.

---

**Руднев Євген Сергійович** – д.т.н., доц., завідувач кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), [rudnev\\_es@snu.edu.ua](mailto:rudnev_es@snu.edu.ua)

**Романченко Юлія Андріївна** – к.т.н., доц., доцент кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), [romanchenko\\_ja@snu.edu.ua](mailto:romanchenko_ja@snu.edu.ua)

**Рибалка Євген Львович** – магістрант кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), [ee-23dm-436@snu.edu.ua](mailto:ee-23dm-436@snu.edu.ua)

Стаття подана 04.03.2024.