

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І  
СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ЩОДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ  
**«ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОМИСЛОВОСТІ  
І КОМУНАЛЬНИХ ОБ'ЄКТАХ»**

ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ  
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ

141 – «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНИМИ ПРОГРАМАМИ:

«ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ  
ТА ЕЛЕКТРОПРИВОД»,

«ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОСМНИХ ВИРОБНИЦТВ»,

«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ»,

«ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ»,

«ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ»

ЧАСТИНА 1

КРЕМЕНЧУК 2018

Методичні вказівки щодо практичних занять з навчальної дисципліни «Енергоефективні технології в промисловості і комунальних об'єктах» для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами: «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв», «Електричні машини і апарати», «Електротехнічні системи електроспоживання», «Енергетичний менеджмент». Частина 1

Укладачі: к. т. н., доц. С. А. Сергієнко,  
асист. В. Ю. Ноженко

Рецензент к. т. н., доц. В. О. Огарь

Кафедра систем автоматичного управління та електропривода

Затверджено методичною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Протокол № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2018 р.

Голова методичної ради \_\_\_\_\_ проф. В. В. Костін

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Перелік практичних занять.....	6
Практичне заняття № 1 Економія енергії унаслідок обмеження часу холостого ходу двигунів .....	6
Практичне заняття № 2 Економія енергії у разі заміни малозавантажених двигунів .....	9
Практичне заняття № 3 Економія енергії у разі перемикання обмоток статора за схемою «трикутник–зірка».....	16
Практичне заняття № 4 Енергозбереження в режимі частих пусків .....	23
Практичне заняття № 5 Економія енергії вантажопідйомним машин завдяки регулюванню їх швидкості .....	28
Практичне заняття № 6 Економія енергії насосних установок завдяки керуванню їх продуктивністю.....	34
Критерії оцінювання знань студентів .....	41
Список літератури .....	42
Додаток А.....	43
Додаток Б.....	44
Додаток В.....	45
Додаток Г.....	46

## ВСТУП

Навчальна дисципліна «Енергоефективні технології в промисловості і комунальних об'єктах» є підґрунтям для вивчення навчальних дисциплін, що вивчають енергетичне господарство об'єктів промисловості, методи оцінювання їх енергоефективності, підходи до розробки заходів з енергоресурсозбереження засобами промислового електроприводу. Навчальні дисципліни, що забезпечують її вивчення: «Теоретичні основи електротехніки», «Промислове енергозбереження», «Системи енергозбереження в електроприводі», «Електропостачання промислових підприємств».

Метою навчальної дисципліни є отримання знань у галузі енергозбереження, визначення раціональних режимів роботи та експлуатації електроприводу, розробка заходів з енергозбереження засобами електроприводу.

Основною метою методичних вказівок з навчальної дисципліни «Енергоефективні технології в промисловості і комунальних об'єктах» є набуття практичних навичок, які надають змогу самостійно виконувати аналіз сучасних об'єктів промисловості в енергетичному аспекті та розробку заходів з енергозбереження засобами електроприводу.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

**знати:**

- основні підходи та методи з енергозбереження;
- багаторівневу структуру сучасного електроприводу;
- методи реалізації енергозбереження засобами промислового електроприводу;
- структуру та критерії оцінювання енергетичних каналів сучасного електроприводу;
- методи розрахунку потужностей і теплових режимів електроприводу;

- методи визначення раціональних режимів роботи та експлуатації електроприводів;

- підходи до побудови систем енергозбереження промислового електроприводу;

**уміти:**

- розраховувати баланси потужностей потоків енергії силового каналу електроприводів;

- аналізувати енергетичні характеристики регульованих електроприводів;

- виконувати розрахунок потужності електроприводів та оцінювання їх теплових режимів;

- виконувати вибір раціонального типу електроприводу;

- виконувати вибір раціональних режимів роботи та експлуатації технологічних установок та електроприводів;

- аналізувати заходи з енергозбереження засобами промислового електроприводу.

# ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

## Практичне заняття № 1

**Тема.** Економія енергії унаслідок обмеження часу холостого ходу двигунів

**Мета:** набуття навичок визначення енергетичної ефективності за допомогою відключення двигуна від мережі на час його холостого ходу.

### Короткі теоретичні відомості

У разі відсутності корисного механічного навантаження асинхронний двигун споживає з мережі реактивну потужність і в двигуні, і елементах системи електропостачання існують втрати енергії. Тому для енергозбереження виконується відключення двигуна від мережі на час його холостого ходу.

Підставою для прийняття такого рішення є порівняння втрат енергії за час роботи двигуна на холостому ходу з втратами енергії, які існуватимуть у разі нового включення двигуна в роботу. Якщо втрати енергії під час пуску двигуна менші за втрати енергії за час його холостого ходу, то відключення забезпечить енергозбереження в електроприводі, і навпаки.

Рівність втрат енергії під час роботи в режимі холостого ходу і під час пуску може бути записано в такому вигляді:

$$\Delta P_c t_{XX} = \Delta P_c t_{pusk} + J_{pryv} \omega_0^2 \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \frac{k_n}{2}, \quad (1.1)$$

де  $\Delta P_c$  – постійні втрати потужності в двигуні;  $t_{XX}$  – граничний час роботи двигуна у режимі холостого ходу;  $t_{pusk}$  – час пуску двигуна під час холостого ходу;  $J_{pryv}$  – приведений до вала двигуна сумарний момент інерції електроприводу,  $J_{pryv} = J_{\Sigma}$ ;  $\omega_0$  – швидкість під час холостого ходу;  $R_1$  – активний опір статора;  $R'_2$  – приведений опір ротора;  $k_n$  – коефіцієнт, який ураховує навантаження двигуна під час розрахунку втрат енергії під час пуску,

$$k_n = \frac{M_{sr}}{M_{sr} - M_{XX}}.$$

Постійні втрати потужності:

$$\Delta P_c = \Delta P_{nom} - \Delta P_v, \quad (1.2)$$

де  $\Delta P_{nom}$  – повні втрати потужності;  $\Delta P_v$  – змінні втрати потужності.

Повні втрати потужності визначаються за виразом:

$$\Delta P_{nom} = \frac{P_{nom}(1 - \eta_{nom})}{\eta_{nom}}, \quad (1.3)$$

де  $P_{nom}$  – номінальна потужність двигуна;  $\eta_{nom}$  – ККД двигуна.

Змінні втрати потужності

$$\Delta P_v = M_{nom} \omega_0 s_{nom} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right), \quad (1.4)$$

де  $M_{nom}$  – номінальний момент двигуна;  $s_{nom}$  – номінальне ковзання.

Час пуску двигуна під час холостого ходу визначається за формулою:

$$t_{pusk} = \frac{J_{pryv} \omega_0}{M_{sr} - M_{XX}}, \quad (1.5)$$

де  $M_{sr}$  – середній момент двигуна під час пуску;  $M_{XX}$  – момент навантаження під час холостого ходу двигуна.

Середній момент двигуна під час пуску визначається за формулою:

$$M_{sr} = \frac{M_{pusk} + M_k}{2}, \quad (1.6)$$

де  $M_{pusk}$ ,  $M_k$  – відповідно пусковий і критичний моменти двигуна.

З виразу (1.1) отримуємо формулу для визначення граничного часу роботи двигуна у режимі холостого ходу:

$$t_{XX} = \frac{J_{pryv} \omega_0}{M_{sr} - M_{XX}} + J_{pryv} \omega_0^2 \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \frac{M_{sr}}{2 \Delta P_c (M_{sr} - M_{XX})}. \quad (1.7)$$

У разі нехтування моментом навантаження  $M_{XX}$ , зважаючи на те, що він малий, порівняно з  $M_{sr}$ , формула (1.7) спрощується і набуває вигляду:

$$t_{XX} = \frac{J_{pryv} \omega_0}{M_{sr}} + \frac{J_{pryv} \omega_0^2 \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right)}{2 \Delta P_c}. \quad (1.8)$$

### Приклад розв'язання завдання

Визначити граничний час роботи асинхронного двигуна 4A180S4 на холостому ході. Двигун 4A180S4 має такі номінальні дані: потужність  $P_{nom} = 22$  кВт; синхронну частоту обертання  $n_0 = 1500$  об/хв; напругу 380/220 В; ковзання  $s_{nom} = 0,02$ ; струм статора  $I_{1nom} = 41,2$  А; ККД  $\eta_{nom} = 90\%$ ;  $\cos\varphi_{nom} = 0,87$ ; активний опір статора  $R_1 = 0,219$  Ом; приведений опір ротора  $R'_2 = 0,112$  Ом; момент інерції ротора  $J_{rot} = 0,19$  кг·м<sup>2</sup>; кратності критичного  $\lambda_k = 2,3$  і пускового  $\lambda_{pusk} = 1,4$  моментів.

Умови виконання завдання:

– приведений момент інерції  $J_{pryv} = 1,2 \cdot 0,19 = 0,23$  кг·м<sup>2</sup>;

– моментом навантаження двигуна у режимі холостого ходу  $M_{XX}$  нехтуємо.

1. Визначаємо швидкість холостого ходу, номінальну швидкість і момент двигуна 4A180S4:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{nom} = \omega_0(1 - s_{nom}) = 157 \cdot (1 - 0,02) = 154 \text{ рад/с};$$

$$M_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} = \frac{22000}{157} = 143 \text{ Нм}.$$

2. Знайдемо для номінального режиму повні, змінні та постійні втрати потужності, використовуючи формули (1.2), (1.3) і (1.4):

$$\Delta P_{nom} = \frac{P_{nom}(1 - \eta_{nom})}{\eta_{nom}} = \frac{22000(1 - 0,9)}{0,9} = 2444 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_v = M_{nom} \omega_0 s_{nom} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) = 143 \cdot 157 \cdot 0,02 \left( 1 + \frac{0,219}{0,112} \right) = 1327 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_c = \Delta P_{nom} - \Delta P_v = 2444 - 1327 = 1117 \text{ Вт}.$$

3. Розраховуємо середній момент двигуна під час пуску:

$$M_{sr} = \frac{M_{pusk} + M_k}{2} = \frac{M_{nom} \lambda_{pusk} + M_{nom} \lambda_k}{2} = \frac{143 \cdot 1,4 + 143 \cdot 2,3}{2} = 264,5 \text{ Нм}.$$

4. Визначаємо за формулою (1.8) граничний час холостого ходу:



$$t_{XX} = \frac{J_{\text{прыв}} \omega_0}{M_{sr}} + \frac{J_{\text{прыв}} \omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right)}{2\Delta P_c} = \frac{0,23 \cdot 157}{267,5} + \frac{0,23 \cdot 157^2 \left(1 + \frac{0,219}{0,112}\right)}{2 \cdot 1117} = 7,6 \text{ с.}$$

Отже, якщо час роботи електроприводу на холостому ході перевищує 7,6 с, то відключення двигуна призведе до економії електроенергії в електроприводі та системі електропостачання.

Відключення завжди доцільно під час роботи двигуна у режимі холостого ходу більше 10 с.

### Завдання до теми

Визначити повні, змінні та постійні втрати потужності номінального режиму, середній момент двигуна під час пуску та граничний час роботи асинхронного двигуна. Паспортні дані двигуна вибрати згідно з варіантом (додаток А).

Умови виконання завдання:

– приведений момент інерції  $J_{\text{прыв}} = 1,2 J_{\text{rot}}$ ;

– моментом навантаження двигуна у режимі холостого ходу  $M_{XX}$  нехтувати.

### Контрольні питання

1. За яких умов доцільно відключати асинхронний двигун від мережі на час його холостого ходу?
2. Як визначаються номінальні змінні втрати в асинхронному двигуні?
3. Надати визначення граничного часу холостого ходу?

**Література:** [1, с. 70–72; 2, с. 108–112; 3, с. 28–29, 67–68; 4, с. 230].

### Практичне заняття № 2

**Тема.** Економія енергії у разі заміни малозавантажених двигунів

**Мета:** набуття навичок визначення економічної доцільності заміни малозавантажених електродвигунів двигунами меншої потужності.

### Короткі теоретичні відомості

Аналіз роботи електроприводів показує, що більшість приводних двигунів мають завищену номінальну потужність, порівняно з тією, яка

необхідна для реалізації технологічного процесу. У європейській практиці прийнято вважати, що коефіцієнт навантаження (коефіцієнт використання) двигунів  $k_n$  визначається відношенням потужності навантаження двигуна  $P_c$  до його номінальної потужності  $P_{nom}$ , становить величину близько 0,6. У нашій країні цей коефіцієнт ще нижчий і лежить у межах (0,3 ... 0,5).

Окрім цього, електроприводи деяких робочих машин і виробничих механізмів частину свого циклу працюють з малим механічним навантаженням або у режимі холостого ходу. До них відносяться, наприклад, електроприводи обробних верстатів, ковальсько-пресового устаткування, підйомно-транспортних механізмів.

В обох розглянутих випадках двигуни при недовантаженні працюють з невисокими ККД, а асинхронні двигуни – і зі зниженим  $\cos\phi$ . Підвищення цих показників призводить до зниження втрат енергії в електроприводі та системі електропостачання і може бути досягнуто, наприклад, заміною малозавантажених двигунів двигунами меншої потужності.

Заміна малозавантажених двигунів доцільна у разі, коли відбудеться зниження втрат енергії в замінному двигуні та системі електропостачання, що дозволить окупити капітальні витрати за такої модернізації за прийнятний термін. Розрахунки показують, що з коефіцієнтом навантаження  $k_n < 0,4$  у більшості випадків заміна малозавантажених двигунів є економічно доцільною, з  $k_n > 0,7$  – недоцільною, а з  $0,4 < k_n < 0,7$  слід дотримуватися техніко-економічних розрахунків.

Існує умова, за якої двигун працюватиме з максимальним ККД з даним коефіцієнтом навантаження двигуна  $k_n$ . ККД двигуна  $\eta$  можна розрахувати так:

$$\eta = \frac{k_n P_{nom}}{k_n P_{nom} + \Delta P_c + k_n^2 \Delta P_v}, \quad (2.1)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт навантаження двигуна;  $P_{nom}$  – номінальна потужність двигуна;  $\Delta P_c$  – постійні втрати потужності в двигуні;  $\Delta P_v$  – номінальні змінні втрати потужності.

Максимальне значення ККД існуватиме за оптимального навантаження, яке визначається співвідношенням постійних  $\Delta P_c$  і номінальних змінних  $\Delta P_v$  втрат потужності:

$$k_{n.opt}^2 = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_v}. \quad (2.2)$$

З формули (2.2) випливає, що за  $\Delta P_c > \Delta P_v$  максимальний ККД може бути отриманий з навантаженням двигуна, яке перевищує номінальне, що неприйнятно. Значення  $k_{n.opt}$  за  $\Delta P_c < \Delta P_v$  наведені в табл. 2.1. Аналізуючи роботу електроприводу з конкретним двигуном, можна за допомогою формули (2.2) визначити навантаження двигуна, за якого він працюватиме з найменшими втратами потужності, тобто з таким навантаженням з максимальним ККД.

Таблиця 2.1 – Значення  $k_{n.opt}$  з різними відношеннями  $\Delta P_c / \Delta P_v$

$\Delta P_c / \Delta P_v$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
$k_{n.opt}$	0,32	0,55	0,71	0,84	0,95

### Приклад розв'язання завдання

Визначити оптимальне навантаження двигуна типу 4A180S4 і навантаження, за якого економічно доцільна його заміна на двигун меншої потужності.

Двигун 4A180S4 має такі номінальні дані: потужність  $P_{nom} = 22$  кВт; синхронну частоту обертання  $n_0 = 1500$  об/хв; напругу 380/220 В; ковзання  $s_{nom} = 0,02$ ; критичне ковзання  $s_k = 0,14$ ; струм статора  $I_{1nom} = 41,2$  А; ККД  $\eta_{nom} = 90$  %;  $\cos\varphi_{nom} = 0,87$ ; активний опір статора  $R_1 = 0,219$  Ом; приведений опір ротора  $R'_2 = 0,112$  Ом; кратність критичного моменту  $\lambda_k = 2,3$ . Вартість двигуна 4A180S4 станом на 2018 р. складає  $C_{ust} = 15\,947$  грн; нормативний

термін служби (термін амортизації)  $T_{sl} = 20$  років; термін служби до модернізації  $T_r = 15$  років; норма амортизації  $p_a = 6,4$  % на рік.

Умови виконання завдання:

- двигуни меншої потужності вибирають із серії АІР;
- як тариф на електроенергію беруть одноставковий тариф для Полтавської області на 2018 рік, який дорівнює 265,316 коп./кВт·год;
- заробітна плата допоміжного персоналу після модернізації не змінюється;
- витрати на демонтаж двигуна не враховуються;
- витрати на транспортування, монтаж і пусконаладжувальні роботи нового двигуна приймаються 35 % його вартості;
- замінний двигун є резервним на підприємстві, і його ліквідаційна вартість дорівнює нуль.

1. Визначаємо швидкість холостого ходу, номінальну швидкість і момент двигуна 4А180S4:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{nom} = \omega_0(1 - s_{nom}) = 157 \cdot (1 - 0,02) = 154 \text{ рад/с};$$

$$M_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} = \frac{22000}{154} = 143 \text{ Нм}.$$

2. Знайдемо для номінального режиму повні, змінні та постійні втрати потужності, використовуючи формули (1.2), (1.3) і (1.4):

$$\Delta P_{nom} = \frac{P_{nom}(1 - \eta_{nom})}{\eta_{nom}} = \frac{22000(1 - 0,9)}{0,9} = 2444 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_v = M_{nom} \omega_0 s_{nom} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) = 143 \cdot 157 \cdot 0,02 \left( 1 + \frac{0,219}{0,112} \right) = 1327 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_c = \Delta P_{nom} - \Delta P_v = 2444 - 1327 = 1117 \text{ Вт}.$$

3. Оптимальне навантаження двигуна визначається за формулою (2.2):

$$k_{n.opt} = \sqrt{\frac{\Delta P_c}{\Delta P_v}} = \sqrt{\frac{1117}{1392}} = 0,92.$$

4. ККД двигуна із цим навантаженням відповідно до формули (2.1) складає:

$$\eta = \frac{k_n P_{nom}}{k_n P_{nom} + \Delta P_c + k_n^2 \Delta P_v} = \frac{0,92 \cdot 22000}{0,92 \cdot 22000 + 1117 + 0,92^2 \cdot 1327} = 0,903.$$

5. Визначаємо залишкову вартість устанавленого двигуна:

$$U_{ost} = U_{ust} \left( 1 - \frac{T_r}{T_{sl}} \right) = 15947 \cdot \left( 1 - \frac{15}{20} \right) = 3986,75 \text{ грн.} \quad (2.3)$$

6. Визначаємо терміни окупності у разі заміни цього двигуна для коефіцієнтів навантаження  $k_n = 0,25; 0,5; 0,75$  і часу роботи двигуна за рік  $T_r = 1\,500, 3\,000, 4\,500, 6\,000$  годин. Термін окупності розраховуємо за формулою:

$$T_{ok} = \frac{KZ_{nov} + KZ_{ost} - KZ_{likv}}{(c_e T_r \Delta P_{ekon} + (U_{ust} - U_{nov}) p_a)}, \quad (2.4)$$

де  $KZ_{nov}$  – капітальні витрати у новому двигуні,  $KZ_{nov} = U_{nov} + Z_{dem} + Z_{tr} + Z_{mont} + Z_{nal}$ ;  $U_{nov}$  – вартість нового двигуна;  $Z_{dem}$ ,  $Z_{tr}$ ,  $Z_{mont}$ ,  $Z_{nal}$  – витрати відповідно на демонтаж замінного двигуна, транспортування, монтаж і пусконаладжувальні роботи нового двигуна;  $c_e$  – тариф на електроенергію;  $(U_{ust} - U_{nov}) p_a$  – різниця в амортизаційних відрахуваннях до і після модернізації.

Відповідно до умов розв'язання задачі  $Z_{dem} = Z_{tr} + Z_{mont} + Z_{nal} = 1,35 U_{nov}$ .

Тоді формула (2.4) набуває вигляду:

$$T_{ok} = \frac{1,35 U_{nov} + 3986,75}{2,7 T_r \Delta P_{ekon} + 0,064 (15947 - U_{nov}^*)}. \quad (2.5)$$

Результати розрахунку за формулою (2.2) наведені в табл. 2.2.

Отримані дані показують, що відносно прийнятний термін окупності – з  $k_n = 0,25$  і  $T_r = 6\,000$  год, що відповідає наявним у технічній літературі рекомендаціям.

Уточнення розрахунку терміну окупності може бути виконано внаслідок обліку втрат потужності в системі електропостачання та ліквідаційної вартості замінного двигуна. Облік цих чинників призведе до деякого зниження терміну окупності.

Таблиця 2.2 – Дані розрахунку терміну окупності у разі заміни двигуна

Показник	Розрахункова формула	$k_n = 0,25$	$k_n = 0,5$	$k_n = 0,75$
Потужність навантаження з таким $k_n$ , кВт	$P_c = k_n P_{nom}$	5,5	11	16,5
Втрати потужності в замінному двигуні, кВт	$\Delta P = \Delta P_c + M_c \omega_0 s_c \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right),$ де $M_c = M_{nom} k_n$ ; $s_c$ визначається із виразу $M_c = \frac{2M_k}{\frac{s_c}{s_k} + \frac{s_k}{s_c}}$ , де $M_k$ – момент критичний; $s_k$ – критичне ковзання	1,25	1,65	2,31
Двигун для заміни	Серія AIP	112M4	132M4	160M4
Втрати потужності в новому двигуні в номінальному режимі, кВт	$\Delta P_{n.nom} = \frac{P_{n.nom} (1 - \eta_{n.nom})}{\eta_{n.nom}}$	0,918	1,443	2,056
Вартість нового двигуна (з урахуванням ПДВ, 2018 р.), грн.	–	4 860	7 347	12 014
Зниження втрат потужності у разі заміни, кВт	$\Delta P_{ekon} = \Delta P - \Delta P_{n.nom}$	0,332	0,205	0,25
Термін окупності з $T_r = 1\ 500$ год на рік	$T_{ok} = (1,35 C_{nov} + 3986,75) /$ $/ (2,7 \cdot T_r \Delta P_{ekon} +$ $+ 0,064 (15947 - C_{nov}^*))$	5,135	10,09	15,69
Термін окупності з $T_r = 3\ 000$ год на рік		3,1	6,304	8,7
Термін окупності з $T_r = 4\ 500$ год на рік		2,22	4,58	6,015
Термін окупності з $T_r = 6\ 000$ год на рік		1,733	3,6	4,59

### Завдання до теми

Визначити оптимальне навантаження асинхронного двигуна та навантаження, за якого економічно доцільна його заміна на двигун меншої потужності. Паспортні дані двигуна серії 4А вибирати згідно з варіантом (додаток А). Вартість двигуна  $C_{ust}$  визначити як 670 грн за 1 кВт.

Двигуни меншої потужності вибирати із серії АІР. У табл. 2.3 наведено вартість асинхронних двигунів серії АІР станом на 2018 р. Визначити терміни окупності у разі заміни двигуна для коефіцієнтів навантаження  $k_n = 0,25; 0,5; 0,75$  і часу роботи двигуна на рік  $T_r = 1\,500, 3\,000, 4\,500, 6\,000$  годин. Нормативний термін служби (термін амортизації)  $T_{sl} = 20$  років; термін служби до модернізації  $T_r = 15$  років; норма амортизації  $p_a = 6,4\%$  на рік.

Таблиця 2.3 – Вартість асинхронних двигунів серії АІР станом на 2018 р.

№ варіанта	Тип двигуна	Потужність, кВт	ККД, %	Вартість двигуна ( $C_{nov}$ ), грн
1	AIP80B4	1,5	78,5	2205
2	AIP100S4	3	82,5	3575
3	AIP100L4	4	84,2	4147
4	AIP112M4	5,5	85,7	4860
5	AIP132S4	7,5	87	6340
6	AIP132M4	11	88,4	7348
7	AIP160S4	15	89,4	11535
8	AIP160M4	18,5	90	12014
9	AIP180S4	22	90,5	15947
10	AIP180M4	30	91,4	18757
11	AIP200M4	37	92	24450
12	AIP200L4	45	92,5	24545
13	AIP225M4	55	93	34655
14	AIP250S4	75	93,6	40934
15	AIP250M4	90	93,9	45943

Умови виконання завдання:

- як тариф на електроенергію узяти одноставковий тариф для Полтавської області на 2018 рік, який дорівнює 265,316 коп./кВт·год;
- заробітна плата допоміжного персоналу після модернізації не змінюється;

- витрати на демонтаж двигуна не враховувати;
- витрати на транспортування, монтаж і пусконаладжувальні роботи нового двигуна брати 35 % його вартості;
- замінний двигун є резервним на підприємстві, і його ліквідаційна вартість дорівнює нуль.

### **Контрольні питання**

1. У яких випадках доцільна заміна малозавантажених двигунів?
2. За якої умови двигун може працювати з максимальним ККД?
3. У яких межах знаходиться значення коефіцієнта навантаження двигунів у європейських країнах і у нашій?

**Література:** [1, с. 60–64; 2, с. 131–140; 3, с. 28–29, 67–68; 4, с. 230; 5].

### **Практичне заняття № 3**

**Тема. Економія енергії у разі перемикання обмоток статора за схемою «трикутник–зірка»**

**Мета:** набуття навичок визначення економічної доцільності перемикання обмоток статора асинхронного двигуна за схемою «трикутник–зірка».

#### **Короткі теоретичні відомості**

Ефективним засобом енергозбереження в асинхронних електроприводах є зниження напруги, яка підводиться до двигуна під час його роботи з малими навантаженнями або в режимі холостого ходу. При цьому відбувається зниження споживаної реактивної потужності і також втрат в елементах системи електропостачання електроприводу, а з певними коефіцієнтами навантаження – і втрат потужності в двигуні.

Унаслідок зниження підведеної до двигуна напруги можна впливати на рівень споживаної двигуном реактивної потужності і на значення  $\cos\varphi$ .

На практиці застосовують два способи зниження напруги: унаслідок переключення обмотки статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка» і за допомогою тиристорних регуляторів напруги.



Перший спосіб зниження напруги можливий у разі рівності номінальної фазної напруги обмотки статора двигуна і лінійної напруги мережі. З навантаженнями двигуна, наближеними до номінального рівня, обмотки статора включені за схемою «трикутник» ( $\Delta$ ) і двигун працює з номінальною напругою з повним магнітним потоком.

Зі зниженням навантаження обмотки двигуна переключаються на схему «зірка» (Y), до обмоток підводиться знижена в  $\sqrt{3} = 1,73$  раза напруга, унаслідок чого знижуються струм намагнічування, реактивна потужність і сумарні втрати в двигуні і системі електропостачання. Важливо зазначити, що при цьому втрати потужності в двигуні, залежно від коефіцієнта його навантаження, можуть як зменшуватися, так і збільшуватися.

Залежність реактивної потужності асинхронного двигуна від напруги, що подається на статор, може бути виражена формулою:

$$Q \approx k_U^2 Q_0 + \frac{k_n^2 \Delta Q_{nom}}{k_U^2}, \quad (3.1)$$

де  $k_U$  – коефіцієнт зниження напруги, що дорівнює одиниці із з'єднанням обмоток статора у схему «трикутник» і  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  із з'єднанням обмоток статора у схему «зірка».

Залежність втрат активної потужності асинхронного двигуна від напруги, яка подається на статор, може бути виражена аналогічною формулою:

$$\Delta P \approx k_U^2 \Delta P_0 + \frac{k_n^2 \Delta P_{nom}}{k_U^2}, \quad (3.2)$$

де  $\Delta P_0$  – втрати потужності в двигуні під час холостого ходу, прийняті в подальшому як постійні втрати  $\Delta P_c$ .

Підставляючи у формули (3.1) і (3.2) значення  $k_U$  для обох схем, можна визначити зниження реактивної потужності  $\Delta Q_{\Delta-Y}$  у разі перемикання обмоток:

$$\Delta Q_{\Delta-Y} = Q_{\Delta} - \Delta Q_Y = \frac{2Q_0}{3} - 2k_n^2 \Delta Q_{nom}, \quad (3.3)$$

а також зниження втрат потужності  $\Delta(\Delta P_{\Delta-Y})$  у разі такого перемикавання:

$$\Delta(\Delta P_{\Delta-Y}) = \Delta P_{\Delta} - \Delta P_Y = \frac{2\Delta P_0}{3} - 2k_n^2 \Delta P_{nom}. \quad (3.4)$$

Аналіз співвідношення (3.3) за найбільш імовірних значень  $Q_0 = (0,60 \dots 0,75)Q_{nom}$  показує, що з коефіцієнтом навантаження  $k_n < 0,7$  реактивна потужність у схемі «зірка» завжди менша, ніж у схемі «трикутник». Аналіз формули (3.4) за найбільш вірогідного співвідношення  $\Delta P_0 = (0,30 \dots 0,35)\Delta P_{nom}$  показує, що зниження втрат потужності у двигуні з переходом на схему «зірка» спостерігається починаючи із значень коефіцієнта навантаження двигуна  $k_n < 0,4$ .

У табл. 3.1 і табл. 3.2 наведені дані, що дозволяють оцінити зміну ККД і  $\cos\phi$  у разі перемикавання обмоток для різних коефіцієнтів навантаження двигуна  $k_n$ .

Таблиця 3.1 – Співвідношення ККД для двох схем включення обмоток статора

$k_n$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$\eta_Y/\eta_{\Delta}$	1,27	1,1	1,04	1,01	1,0

Таблиця 3.2 – Відношення  $\cos\phi_Y/\cos\phi_{\Delta}$  для двох схем включення обмоток статора з різними значеннями  $k_n$  до  $\cos\phi_{nom}$

$\cos\phi_{nom}$	$k_n$				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,78	1,94	1,80	1,64	1,49	1,35
0,80	1,86	1,73	1,58	1,43	1,30
0,82	1,78	1,67	1,52	1,37	1,26
0,84	1,72	1,61	1,46	1,32	1,22
0,86	1,66	1,55	1,41	1,27	1,18
0,88	1,60	1,49	1,35	1,22	1,14
0,90	1,57	1,43	1,29	1,17	1,10
0,92	1,50	1,36	1,23	1,11	1,06

Аналіз даних табл. 3.1 і 3.2 показує, що з  $k_n < 0,5$  ККД і  $\cos\varphi$  у схемі «зірка» вище, ніж у схемі «трикутник». Отже, перемикання за таких навантажень обмотки статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка» забезпечує ефект енергозбереження.

### Приклади розв'язання завдання

Визначити доцільність способу енергозбереження в електроприводі перемиканням обмоток двигуна АОЗ-315М-6УЗ, який працює з коефіцієнтом навантаження  $k_n = 0,3$ , зі схеми «трикутник» на схему «зірка». Номінальні дані двигуна:  $P_{nom} = 132$  кВт;  $U_{nom} = 380/660$  В;  $s_{nom} = 0,017$ ;  $I_{1nom} = 138$  А;  $\cos\varphi_{nom} = 0,9$ ;  $\sin\varphi_{nom} = 0,44$ ;  $\eta_{nom} = 93,5$  %;  $\lambda_k = 2,6$ ;  $p = 3$ ;  $f_{1nom} = 50$  Гц.

Умови виконання завдання:

– час роботи двигуна із зазначеним коефіцієнтом навантаження на рік становить  $T_r = 1\,500$  год;

– розглянутий спосіб енергозбереження реалізується створенням релейно-контакторної схеми перемикання обмоток з використанням чотирьох контакторів. Для схеми вибираються контактори змінного струму типу КТ6022 на номінальний струм 160 А вартістю 1860 грн за штуку (з урахуванням ПДВ станом на 2018 г.);

– витрати на транспорт, монтажні та пусконаладжувальні роботи приймаються 60 % від вартості контакторів;

– коефіцієнт амортизаційних відрахувань беруть в розмірі 10 %;

– чисельність і зарплата допоміжного персоналу після модернізації не змінюються;

– тариф на електроенергію дорівнює 2,7 грн/кВт·год (Полтавська область, 2018 р.).

1. Визначаємо швидкість холостого ходу, номінальні швидкість і момент двигуна:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{nom} = \omega_0(1 - s_{nom}) = 104,7 \cdot (1 - 0,017) = 103 \text{ рад/с};$$

$$M_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} = \frac{132000}{103} = 1282 \text{ Нм.}$$

2. Визначаємо номінальний приведений струм ротора:

$$I'_{2nom} = I_{1nom} s_{nom} = 138 \cdot 0,9 = 124 \text{ А.}$$

3. Знаходимо струм намагнічування двигуна:

$$I_{\mu} \approx I_{1nom} \left( \frac{\sin \varphi_{nom} + \cos \varphi_{nom}}{\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}} \right) = 138 \cdot \left( \frac{0,44 + 0,9}{2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1}} \right) = 36 \text{ А.}$$

4. Використовуючи вираз для втрат потужності в роторі  $\Delta P_{v2} = 3I_2'^2 R_2' = M\omega_0 s$ , записаний для номінального режиму, знаходимо приведений активний опір ротора:

$$R_2' = \frac{M_{nom} \omega_0 s_{nom}}{3I_{2nom}'^2} = \frac{1282 \cdot 104,7 \cdot 0,017}{3 \cdot 124^2} = 0,05 \text{ Ом.}$$

5. Розраховуємо реактивну потужність у номінальному режимі:

$$Q_{nom} = 3U_f I_{1nom} \sin \varphi_{nom} = 3 \cdot 380 \cdot 138 \cdot 0,44 = 69221 \text{ ВА.}$$

6. Розраховуємо реактивну потужність холостого ходу:

$$Q_0 = \frac{mP_{nom}}{\eta_{nom}} = \frac{0,31 \cdot 132000}{0,935} = 43764 \text{ ВА,}$$

де  $m = 2,2 - 2,1 \cos \varphi_{nom} = 2,2 - 2,1 \cdot 0,9 = 0,31$ .

7. З виразу для номінальної реактивної потужності

$$Q_{nom} = 3U_f I_{\mu} + \frac{M_{nom} \omega_0 s_{nom} X_{k.z}}{R_2'} = Q_0 + \Delta Q_{nom}$$

знаходимо  $X_{k.z}$ :

$$X_{k.z} = \frac{R_2' (Q_{nom} - Q_0)}{M_{nom} \omega_0 s_{nom}} = \frac{0,05 \cdot (69221 - 43764)}{1282 \cdot 104,7 \cdot 0,017} = 0,55 \text{ Ом.}$$

8. Визначаємо активний опір кола статора, використовуючи формулу для критичного моменту асинхронного двигуна:

$$M_k = \frac{3U_f^2}{2\omega_0 \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{k.z}^2} \right)}$$

Визначаючи з неї  $R_1$  як шукану величину, знаходимо:

$$R_1 = \frac{\left(\frac{3U_f^2}{2\omega_0 M_k}\right)^2 - X_{k.z}^2}{2\left(\frac{3U_f^2}{2\omega_0 M_k}\right)} = \frac{\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 104,7 \cdot 2,6 \cdot 1282}\right)^2 - 0,55^2}{2 \cdot \left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 104,7 \cdot 2,6 \cdot 1282}\right)} = 0,07 \text{ Ом.}$$

9. Визначаємо повні номінальні втрати:

$$\Delta P_{nom} = \frac{P_{nom}(1 - \eta_{nom})}{\eta_{nom}} = \frac{132000 \cdot (1 - 0,935)}{0,935} = 9176 \text{ Вт.}$$

10. Знаходимо змінні номінальні втрати:

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= \Delta P_{v1} + \Delta P_{v2} = \\ &= 3I_{1nom}R_1 + 3I_{2nom}'^2 R_2' = 3 \cdot 138^2 \cdot 0,07 + 3 \cdot 124^2 \cdot 0,05 = 6306 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

11. Знаходимо постійні втрати потужності:

$$\Delta P_c = \Delta P_{nom} - \Delta P_v = 9176 - 6306 = 2870 \text{ Вт.}$$

12. Розраховуємо за формулою (3.3) зниження реактивної потужності  $\Delta Q_{\Delta-Y}$  у разі перемикання обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка»:

$$\Delta Q_{\Delta-Y} = Q_{\Delta} - \Delta Q_Y = \frac{2Q_0}{3} - 2k_n^2 \Delta Q_{nom} = \frac{2 \cdot 43764}{3} - 2 \cdot 0,3^2 \cdot 25456 = 24594 \text{ ВА.}$$

13. Розраховуємо за формулою (3.4) зниження активної потужності  $\Delta(\Delta P_{\Delta-Y})$  у разі перемикання обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка»:

$$\Delta(\Delta P_{\Delta-Y}) = \Delta P_{\Delta} - \Delta P_Y = \frac{2\Delta P_0}{3} - 2k_n^2 \Delta P_{nom} = \frac{2 \cdot 3859}{3} - 2 \cdot 0,3^2 \cdot 9176 = 921 \text{ Вт.}$$

14. Сумарне зниження втрат потужності складе:

$$\Delta P_{ek} = k_p \Delta Q_{\Delta-Y} + \Delta(\Delta P_{\Delta-Y}) = 0,1 \cdot 24594 + 921 = 3381 \text{ Вт,}$$

де  $k_p$  – коефіцієнт зниження втрат потужності, одержуваного від зниження реактивної потужності  $Q$ , кВт/квар.

15. Термін окупності  $T_{ok}$  визначаємо за формулою:

$$T_{ok} = \frac{I_{kont}}{(c_e T_r \Delta P_{ek} - p_a I_{kont})} = \frac{1,6 \cdot 4 \cdot 1860}{2,7 \cdot 1500 \cdot 3,381 - 0,1 \cdot 4 \cdot 1860} = 0,919 \text{ роки.}$$

### Завдання до теми

Визначити доцільність способу енергозбереження в електроприводі перемиканням обмоток асинхронного двигуна, який працює з коефіцієнтом навантаження  $k_n = 0,3$ , зі схеми «трикутник» на схему «зірка». Паспортні дані двигуна наведено у додатку Б.

Умови виконання завдання:

– час роботи двигуна із зазначеним коефіцієнтом навантаження на рік становить  $T_r = 1\,500$  год;

– розглянутий спосіб енергозбереження реалізується створенням релейно-контакторної схеми перемикання обмоток з використанням чотирьох контакторів. Для схеми вибираються контактори змінного струму типу КТ6022 на номінальний струм 160 А вартістю 1860 грн за штуку (з урахуванням ПДВ станом на 2018 р.);

– витрати на транспорт, монтажні та пусконаладжувальні роботи приймають 60 % від вартості контакторів;

– коефіцієнт амортизаційних відрахувань приймають 10 %;

– чисельність і зарплата допоміжного персоналу після модернізації не змінюються;

– тариф на електроенергію дорівнює 2,7 грн/кВт · год (Полтавська область, 2018 р.).

### Контрольні питання

1. Які існують способи зниження напруги, що підводиться до двигуна під час його роботи з малими навантаженнями, що застосовуються на практиці?

2. Унаслідок чого перемикання обмоток статора асинхронного двигуна зі схеми «трикутник» на схему «зірка» за малого навантаження може призвести до підвищення енергетичних показників його роботи?

3. Як залежить ККД і коефіцієнт потужності асинхронного двигуна від навантаження на валу?

**Література:** [1, с. 70–72; 6, с. 48–55; 7, с. 293–294].

## Практичне заняття № 4

### Тема. Економія енергії в режимі частих пусків

**Мета:** набуття навичок визначення доцільності способу енергозбереження в електроприводі в режимі частих пусків.

### Короткі теоретичні відомості

Багато робочих машин і виробничих механізмів працюють у повторно-короткочасному режимі S3 або його різновидах. Для електроприводу таких машин і механізмів важливим елементом аналізу їх роботи є визначення допустимої частоти включень, яка лімітується переважно нагріванням двигунів. Знижуючи тим чи іншим способом втрати енергії в двигуні у сталому або перехідних режимах, можна розв'язувати як завдання енергозбереження, так і завдання підвищення допустимої частоти включення двигунів.

На рис. 4.1 зображена тахограмма (графік швидкості)  $\omega(t)$ , що відображає цикл роботи двигуна. Рух у цьому циклі складається з ділянок пуску тривалістю  $t_{push}$ , усталеної роботи із часом  $t_{ust}$ , гальмування із часом  $t_t$  і паузи із часом  $t_o$  (відключення). Інтервали  $t_{push}$ ,  $t_{ust}$ , і  $t_t$  складають час включення (роботи) двигуна  $t_r$ , яке разом із часом паузи  $t_o$  складають час циклу  $t_{ts}$ .

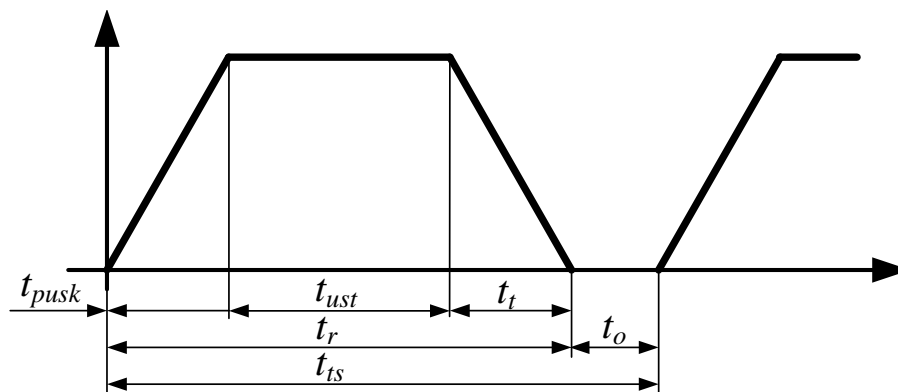


Рисунок 4.1 – Тахограми в режимі коротких циклів

Для віддаленого циклу роботи електроприводу настає квазіусталений тепловий режим двигуна, коли кількість теплоти, що виділяється в двигуні, дорівнює кількості теплоти, яка віддається в навколишнє середовище. Це

дозволяє скласти рівняння теплового балансу для двигуна, вихідні дані для якого наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для рівняння теплового балансу

Ділянка циклу, його тривалість	Теплова енергія, що виділилася в двигуні	Теплова енергія, що віддається в навколишнє середовище
Пуск, $t_{pusk}$	$\Delta W_{pusk}$	$(1 + \beta)\Delta P_{nom}t_{pusk} / 2$
Усталений режим, $t_{ust}$	$\Delta P t_{ust}$	$\Delta P_{nom}t_{ust}$
Гальмування, $t_t$	$\Delta W_t$	$(1 + \beta)\Delta P_{nom}t_t / 2$
Пауза, $t_o$	0	$\beta\Delta P_{nom}t_o$

У табл. 4.1 прийняті такі позначення:  $\Delta W_{pusk}$ ,  $\Delta W_t$  – відповідно втрати енергії під час пуску та гальмування;  $\Delta P_{nom}$ ,  $\Delta P$  – відповідно втрати потужності в номінальному режимі і в режимі усталеного руху;  $\beta$  – коефіцієнт погіршення тепловіддачі.

У табл. 4.2 наведені значення коефіцієнта  $\beta$  для двигунів з різними способами охолодження.

Таблиця 4.2 – Значення коефіцієнта погіршення тепловіддачі

Виконання двигуна	$\beta$
Закритий з незалежною вентиляцією	1
Закритий без примусового охолодження	0,95...0,98
Закритий самовентильований	0,45...0,55
Захищений самовентильований	0,25 ...0,35

Рівняння теплового балансу отримуємо прирівнюванням кількостей виділеної та відданої теплоти:

$$\Delta W_{pusk} + \Delta P t_{ust} + \Delta W_t = (1 + \beta)\Delta P_{nom}(t_{pusk} + t_t)/2 + \Delta P_{nom}(t_{ust} + \beta t_o).$$

Увівши позначення для кількості включень за годину  $h = \frac{3600}{t_{ts}}$  і відносної

тривалості включення  $\varepsilon = \frac{t_r}{t_{ts}}$ , отримуємо після спрощень вираз для допустимої частоти включення двигуна у режимі цього циклу:



$$h = 3600 \frac{(\Delta P_{nom} - \Delta P)\varepsilon + \Delta P_{nom}\beta(1 - \varepsilon)}{W_{pusk} + \Delta W_t}. \quad (4.1)$$

З виразу (4.1) випливає, що підвищення частоти включення двигунів може здійснюватися унаслідок зниження втрат потужності  $\Delta P$  у сталому режимі і втрат енергії під час пуску і гальмування  $\Delta W_{pusk}$  і  $\Delta W_t$ , а також застосування більш інтенсивного охолодження (вентиляції) двигунів.

### Приклади розв'язання завдання

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу АІР132S4 має номінальну потужність  $P_{nom} = 7,5$  кВт; ковзання  $s_{nom} = 0,04$ ; ККД  $\eta_{nom} = 87,5$  %;

$$\frac{M_{pusk}}{M_{nom}} = 2; \quad \frac{M_{max}}{M_{nom}} = 2,5; \quad J_d = 0,028 \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \text{ Розрахувати допустиму частоту}$$

включення.

Умови виконання завдання:

– двигун працює з відносною тривалістю включення  $\varepsilon = 0,42$  з номінальним навантаженням;

$$\text{– відношення } \frac{R_1}{R'_2} = 1,5;$$

– коефіцієнт погіршення тепловіддачі  $\beta = 0,3$ ;

– сумарний приведений до валу двигуна момент інерції електроприводу  $J_{\Sigma}$  становить  $1,2J_d$ ;

– гальмування двигуна здійснюється вибігом (відключенням).

1. Визначаємо швидкість двигуна в режимі холостого ходу і в номінальному режимі:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{nom} = \omega_0(1 - s_{nom}) = 157 \cdot (1 - 0,04) = 150,7 \text{ рад/с}.$$

2. Визначаємо номінальний момент двигуна:

$$M_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} = \frac{7500}{150,4} = 50 \text{ Нм}.$$

3. Знаходимо повні втрати потужності в двигуні в номінальному режимі:

$$\Delta P_{nom} = \frac{P_{nom}(1 - \eta_{nom})}{\eta_{nom}} = \frac{7500(1 - 0,875)}{0,875} = 1071 \text{ Вт.}$$

4. Визначаємо змінні втрати потужності в обмотках статора і ротора в номінальному режимі:

$$\Delta P_v = M_{nom} \omega_0 s_{nom} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = 20 \cdot 157 \cdot 0,04(1 + 1,5) = 785 \text{ Вт.}$$

5. Знаходимо постійні втрати потужності:

$$\Delta P_c = \Delta P_{nom} - \Delta P_v = 1071 - 785 = 286 \text{ Вт.}$$

6. Розраховуємо середній момент двигуна під час пуску, беручи його таким, що дорівнює напівсумі пускового та максимального (критичного) моментів:

$$M_{sr} = \frac{M_{pusk} + M_k}{2} = \frac{2M_{nom} + 2,5M_{nom}}{2} = \frac{2 \cdot 50 + 2,5 \cdot 50}{2} = 113 \text{ Нм.}$$

7. Знаходимо час пуску двигуна:

$$t_{pusk} = \frac{J_{\Sigma} \omega_{nom}}{M_{sr} - M_c} = \frac{1,2 \cdot 0,028 \cdot 150,7}{113 - 50} = 0,08 \text{ с.}$$

8. Знаходимо втрати енергії під час пуску  $\Delta W_v$ , обумовлені змінними втратами потужності  $\Delta P_v$ :

$$\begin{aligned} \Delta W_v &= \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2 \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) (s_{nach}^2 - s_{kon}^2) M_{sr}}{2(M_{sr} - M_c)} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 0,028 \cdot 157^2 \cdot (1 + 1,5) \cdot (1^2 - 0,04^2) \cdot 113}{2 \cdot (113 - 50)} = 2547 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

9. Визначаємо втрати енергії, обумовлені постійними втратами потужності  $\Delta P_c$ , і сумарні втрати енергії за час пуску:

$$\Delta W_K = \Delta P_c t_{pusk} = 286 \cdot 0,08 = 23 \text{ Дж;}$$

$$\Delta W_{pusk} = \Delta W_K + \Delta W_v = 23 + 2547 = 2570 \text{ Дж.}$$

10. Розраховуємо допустиму частоту включення двигуна за формулою (4.1), ураховуючи, що двигун працює з номінальним навантаженням і без втрат енергії під час гальмування:

$$h = 3600 \frac{\Delta P_{nom} \beta (1 - \varepsilon)}{\Delta W_{pusk}} = 3600 \frac{1071 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,42)}{2570} = 261 \text{ вкл./год.}$$

Підвищення допустимої частоти включення двигунів однозначно пов'язане зі зниженням втрат потужності і енергії в двигуні.

По-перше, зниження втрат енергії під час пуску  $\Delta W_{pusk}$  можливо за рахунок частотно-керованого пуску з використанням перетворювача частоти. Втрати енергії під час такого пуску, порівняно з розглянутим у прикладі прямим пуском, менші в  $\frac{2T_m}{t_{pch}}$  раз, де  $t_{pch}$  – час частотно-керованого пуску

(ЧП);  $T_m = \frac{J_{\Sigma} \omega_0}{M_{pusk}}$ . Якщо виконанні умови  $t_{pch} > 2T_m$ , зменшаться втрати енергії

під час пуску і збільшиться допустима частота включення двигуна.

Для розглянутого прикладу  $T_m = \frac{1,2 \cdot 0,028 \cdot 157}{2 \cdot 50} = 0,05$  с, тому зниження

втрат енергії в двигуні відбуватиметься із часом наростання частоти під час пуску більше 0,1 с.

Наявність перетворювача частоти дозволяє також реалізовувати частотно-кероване гальмування двигуна, у тому числі з можливістю рекуперації енергії в мережу.

По-друге, зменшення втрат під час пуску може бути забезпечено унаслідок оптимального вибору передавального числа (радіуса приведення) механічної передачі і номінальної швидкості двигуна.

### **Завдання до теми**

Розрахувати допустиму частоту включення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, паспортні дані якого наведені у додатку А.

Умови виконання завдання:

– двигун працює з відносною тривалістю включення  $\varepsilon = 0,42$  з номінальним навантаженням;

- коефіцієнт погіршення тепловіддачі  $\beta = 0,3$ ;
- сумарний приведений до валу двигуна момент інерції електроприводу  $J_{\Sigma}$  становить  $1,2J_d$ ;
- гальмування двигуна здійснюється вибігом (відключенням).

### **Контрольні питання**

1. Для яких режимів роботи асинхронних двигунів необхідно визначати допустима частота включень?
2. Як визначається допустима частота включення асинхронного двигуна?
3. Унаслідок чого може бути збільшена допустима кількість включень асинхронного двигуна?

**Література:** [1, с. 72–75; 3, с. 28–29, 67–68; 4, с. 230; 6, с. 58–60].

### **Практичне заняття № 5**

**Тема. Економія енергії вантажопідйомних машин завдяки регулюванню їх швидкості**

**Мета:** набуття навичок визначення економічної доцільності регулювання швидкості вантажопідйомних машин завдяки використанню частотно-регульованого електроприводу.

#### **Короткі теоретичні відомості**

Для механізмів вантажопідйомних машин (кранів, ліфтів) застосовуються різні системи асинхронного приводу, які розділяють на дві групи. Перша реалізується на основі релейно-контакторної апаратури з використанням реостатного регулювання, динамічного гальмування, багатошвидкісних двигунів тощо. Друга група виконується з напівпровідниковими пристроями: з перетворювачами напруги, частоти, імпульсними регуляторами. Для кранів і ліфтів масового призначення дотепер в основному застосовуються системи електроприводів першої групи, у яких відсутні керовані напівпровідникові перетворювачі. Однак релейно-контакторні системи керування часто не забезпечують бажаних енергетичних показників і якості регулювання координат в електроприводах розглянутого класу.

Вибір системи електроприводу для цих механізмів залежить від вартості, масогабаритних, енергетичних показників, надійності обладнання й істотно визначається умовами та рівнем експлуатації. Оскільки вантажопідйомні машини мають масове застосування, то для них часто потрібні максимально прості й дешеві електроприводи, які мали б за можливості просте схемне виконання і водночас необхідні технічні показники. Однією з таких систем є система перетворювач напруги–асинхронний двигун.

Приводні двигуни кранових і ліфтових механізмів працюють у повторно-короткочасному режимі. При цьому основну частину робочого часу (60–70 % і більше) приводний двигун обертається з високою частотою, близькою до номінальної, і приблизно до 15 % – зі зниженою частотою. У процесі роботи на високій частоті асинхронні двигуни найкраще підключати безпосередньо до мережі. Отже, протягом більшої частини робочого часу між мережею живлення і статором асинхронного двигуна ніякий перетворювач не потрібний. Проте протягом невеликої частини робочого часу керований перетворювач електричної енергії необхідний як для забезпечення зниженої частоти обертання ротора, так і для належного формування перехідних процесів пуску і гальмування.

Як керований перетворювача найкраще підходить перетворювач частоти, оскільки він забезпечує вищу якість регулювання координат асинхронного двигуна (швидкості, моменту, струму).

### **Приклади розв'язання завдань**

Розрахувати економію електричної енергії кранової установки та втрати енергії у разі заміни релейно-контакторної системи керування на частотно-регульований електропривод. Асинхронний двигун типу МТК-31-6 кранової установки має такі номінальні дані: потужність  $P_{nom} = 11$  кВт; синхронна частота обертання  $n_0 = 1000$  об/хв; напруга 380 В; струм статора  $I_{1nom} = 26,4$  А; активний опір статора  $R_1 = 0,415$  Ом; приведений активний опір ротора  $R'_2 = 0,824$  Ом; ККД  $\eta_{nom} = 87$  %; номінальне ковзання  $s_{nom} = 0,08$ ;

$\cos\varphi_{nom} = 0,78$ ; момент інерції ротора  $J_{rot} = 0,25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; кратності критичного  $\lambda_k = 3,4$  і пускового  $\lambda_{пуск} = 3,2$  моментів; кратність пускового струму  $k_i = 5,1$ . Під час використання частотно-регульованого електроприводу прийняти пропорційний закон керування ( $\frac{U}{f} = const$ ).

Робота крана відбувається циклічно. Під час виконання технологічного процесу кран працює на зменшеній і номінальній швидкостях відповідно до тахограми, яка зображена на рис. 5.1.

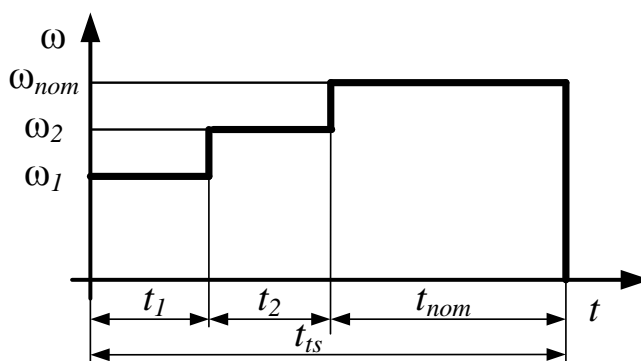


Рисунок 5.1 – Тахограма роботи кранової установки у технологічному режимі

Під час реостатного керування регулювання швидкості досягається завдяки введенню додаткового опору в роторне коло двигуна. Напруга статора при цьому залишається незмінною.

Під час частотного регулювання до статора підводиться напруга, яка змінюється залежно від вибраного закону керування і необхідної швидкості.

Для спрощення подальших розрахунків уведемо такі припущення:

- загальний час циклу –  $t_{ts} = 20 \text{ с}$ ;
- робота на першій швидкості  $\omega_1$  (60 % від номінальної) з додатковим опором  $R_{p1} = 0,74R'_2$  (для релейно-контакторної системи керування) –  $t_1 = 5 \text{ с}$ ;
- робота на другій швидкості  $\omega_2$  (80 % від номінальної) з додатковим опором  $R_{p2} = 0,175R'_2$  (для релейно-контакторної системи керування) –  $t_2 = 5 \text{ с}$ ;
- робота в номінальному режимі –  $t_{nom} = 10 \text{ с}$ ;

– кількість циклів на добу  $n = 300$  шт.

1. Визначаємо швидкість двигуна в режимі холостого ходу і в номінальному режимі:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,6 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{nom} = \omega_0(1 - s_{nom}) = 104,6 \cdot (1 - 0,08) = 96,3 \text{ рад/с}.$$

2. Знаходимо значення приведенного струму ротора:

$$I'_{2nom} \approx I_{1nom} \cos \varphi_{nom} \sqrt{\frac{2\lambda_k}{\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1}}} = 26,4 \cdot 0,78 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 3,4}{3,4 + \sqrt{3,4^2 - 1}}} = 20,82 \text{ А}.$$

3. Визначаємо повні втрати потужності в двигуні в номінальному режимі:

$$\Delta P_{nom} = \frac{P_{nom}(1 - \eta_{nom})}{\eta_{nom}} = \frac{11000 \cdot (1 - 0,87)}{0,87} = 1643,7 \text{ Вт}.$$

4. Розрахуємо змінні та постійні втрати потужності в номінальному режимі для асинхронного двигуна:

$$\Delta P_v = 3I_2'^2(R_1 + R_2') = 3 \cdot 20,82^2 \cdot (0,415 + 0,824) = 1611 \text{ Вт}.$$

$$\Delta P_c = \Delta P_{nom} - \Delta P_v = 1643,7 - 1611 = 32,7 \text{ Вт}.$$

Постійні втрати потужності включають в себе втрати у сталі  $\Delta P_{st}$ , механічні  $\Delta P_{meh}$  та від струму збудження  $\Delta P_{zb}$ .

5. Визначаємо втрати в роторі:

$$\Delta P_{2nom} = \frac{P_{nom}s_{nom}}{1 - s_{nom}} = \frac{11000 \cdot 0,08}{1 - 0,08} = 956,5 \text{ Вт}.$$

З наведених вище формул випливає, що, залежно від вибору способу керування, змінюватиметься тільки величина змінних втрат.

6. Визначаємо додатковий опір для роботи на першій і другій зменшеній швидкості:

$$R_{p1} = 0,74R_2' = 0,74 \cdot 0,824 = 0,61 \text{ Ом};$$

$$R_{p2} = 0,175R_2' = 0,175 \cdot 0,824 = 0,144 \text{ Ом}.$$

7. Знаходимо значення зменшених швидкостей:

$$\omega_1 = 0,6\omega_{nom} = 0,6 \cdot 96,3 = 57,78 \text{ рад/с};$$

$$\omega_2 = 0,8\omega_{nom} = 0,8 \cdot 96,3 = 77,04 \text{ рад/с}.$$

8. Тоді під час реостатного керування середні змінні втрати можна визначити за формулою:

$$\begin{aligned}\Delta P_{v.sr.r} &= \frac{3I_2'^2(R_1 + R_2' + R_{p1})t_1 + 3I_2'^2(R_1 + R_2' + R_{p2})t_2 + 3I_2'^2(R_1 + R_2')t_{nom}}{t_{ts}} = \\ &= \frac{3 \cdot 20,82^2 \cdot (0,415 + 0,824 + 0,61) \cdot 5 + 3 \cdot 20,82^2 \cdot (0,415 + 0,824 + 0,114) \cdot 5}{20} + \\ &\quad + \frac{3 \cdot 20,82^2 \cdot (0,415 + 0,824) \cdot 10}{20} = 1847 \text{ Вт.}\end{aligned}$$

9. Визначаємо середні змінні втрати під час частотного керування:

$$\begin{aligned}\Delta P_{v.sr.ch} &= \frac{3I_2'^2(R_1 + R_2')(t_1 + t_2 + t_{nom})}{t_{ts}} = \\ &= \frac{3 \cdot 20,82^2 (0,415 + 0,824) \cdot (5 + 5 + 10)}{20} = 1611 \text{ Вт.}\end{aligned}$$

Як видно з розрахунків, під час частотного керування та заданого режиму роботи середні змінні втрати в 1,1 раза нижчі, ніж під час реостатного керування.

10. Загальне споживання електроенергії за рік з урахуванням кількості прийнятих робочих днів у році  $D = 256$  визначаємо за формулами:

– для реостатного керування:

$$\begin{aligned}E_r &= \frac{(t_1 + t_2 + t_{nom})\sqrt{3}U_{nom}I_{1nom}nD}{3600} = \\ &= \frac{(5 + 5 + 10) \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 26,4 \cdot 300 \cdot 256}{3600} = 7417000 \text{ Вт} \cdot \text{год};\end{aligned}$$

– для частотного керування

$$\begin{aligned}E_{ch} &= \frac{\sqrt{3}U_1I_{1nom}t_1 + \sqrt{3}U_2I_{1nom}t_2 + \sqrt{3}U_{nom}I_{1nom}t_{nom}}{3600\eta_{ch}} nD = \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 0,6U_{nom}I_{1nom}t_1 + \sqrt{3} \cdot 0,6U_{nom}I_{1nom}t_2 + \sqrt{3}U_{nom}I_{1nom}t_{nom}}{3600\eta_{ch}} nD = \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 0,6 \cdot 380 \cdot 26,4 \cdot 5 + \sqrt{3} \cdot 0,8 \cdot 380 \cdot 26,4 \cdot 5 + \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 26,4 \cdot 10}{3600 \cdot 0,96} \times \\ &\quad \times 300 \cdot 256 = 6564000 \text{ Вт} \cdot \text{год},\end{aligned}$$

де  $\eta_{ch}$  – ККД перетворювача частоти.



Економія електроенергії за рік становить:

$$C_e = E_r - E_{ch} = 7417000 - 6564000 = 850000 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 850 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

З урахуванням того, що одноставковий тариф на споживану електроенергію становить 2,7 грн/кВт · год, у разі заміни релейно-контакторної системи керування на частотно-регульований електропривод складе 2295 грн на рік.

### Завдання до теми

Розрахувати економію електричної енергії кранової установки та втрати енергії у разі заміни релейно-контакторної системи керування на частотно-регульований електропривод. Паспортні дані асинхронних двигунів кранової установки наведено у додатку В. Використовуючи частотно-регульований електропривод, узяти пропорційний закон керування ( $\frac{U}{f} = const$ ).

Робота крана відбувається циклічно. Під час виконання технологічного процесу кран працює на зменшеній і номінальній швидкостях відповідно до тахограми, яка зображена на рис. 5.1.

Під час реостатного керування регулювання швидкості досягається завдяки введенню додаткового опору в роторне коло двигуна. Напруга статора при цьому залишається незмінною.

Під час частотного регулювання до статора підводиться напруга, яка змінюється залежно від вибраного закону керування і необхідної швидкості.

Для подальших розрахунків приймають

– загальний час циклу –  $t_{ts}$  с;

– робота на першій швидкості  $\omega_1$  (60 % від номінальної) з додатковим опором  $R_{p1} = 0,74R'_2$  (для релейно-контакторної системи керування) –  $t_1$ ;

– робота на другій швидкості  $\omega_2$  (80 % від номінальної) з додатковим опором  $R_{p2} = 0,175R'_2$  (релейно-контакторної системи керування) –  $t_2$ ;

– робота в номінальному режимі –  $t_{nom}$ ;

– кількість циклів на добу  $n$  шт.

## Контрольні питання

1. Які системи асинхронного електроприводу застосовуються у вантажопідійомних машинах?
2. Від чого залежить вибір електроприводу для вантажопідійомних машин?
3. Чому для керування швидкістю вантажопідійомних машин найкраще підходить перетворювач частоти?

**Література:** [1, с.92–96; 2, с. 184–188; 8].

## Практичне заняття № 6

**Тема. Економія енергії насосних установок завдяки керуванню їх продуктивністю**

**Мета:** набуття навичок визначення економічної доцільності керування продуктивності насосних установок завдяки використанню частотно-регульованого електроприводу.

### Короткі теоретичні відомості

Насосні установки – основні споживачі електроенергії в системах міського водопостачання та водовідведення. У загальній вартості енергоресурсів, що споживаються водопровідно-каналізаційними підприємствами, 95 % складає електроенергія, решта 5 % – споживання інших енергоносіїв. У собівартості продукції (подача води і водовідведення) витрати на енергоносії складають 50–60 %. Тому навіть невелике підвищення енергоефективності насосної установки може дати помітний результат, що дозволить знизити енергоспоживання насосних агрегатів, заощадити кошти на ремонт і обслуговування електромеханічних та гідравлічних вузлів технологічного обладнання.

Насосні агрегати умовно розділяють на три великі групи: потужні (понад 500 кВт) агрегати енергетичних об'єктів; промислові агрегати та насосні станції централізованого водопостачання (50–300 кВт); масові установки (2–50 кВт), до яких відносяться насоси з подачею 12–100 м<sup>3</sup>/год і напором 20–80 мм вод. ст.

У першій групі через її специфіку застосовуються прогресивні види електроприводу. У другій і особливо в третій, найбільш масовій, дотепер переважає нерегульований електропривод з асинхронними короткозамкненими двигунами, а управління продуктивністю здійснюється вкрай неефективним способом – дроселюванням. Це не дозволяє забезпечити режим раціонального енергоспоживання і витрати води, пари, повітря і т. д. у разі зміни технологічних потреб у широких межах.

Характерним прикладом таких механізмів є насосні станції холодного та гарячого водопостачання і систем опалення житлових і промислових будівель. Вибрані з урахуванням максимальної продуктивності, ці механізми значну частину часу працюють з меншою продуктивністю, що визначається зміною потреби в різні періоди часу. За деякими даними середньодобове завантаження насосів холодного водопостачання складає всього 50–55 % максимального. Сучасні системи водопостачання не забезпечують помітного зниження споживаної потужності зі зменшенням втрат, а також обумовлюють істотне зростання тиску (напору) в системі, що призводить до витоків води і несприятливо позначається на роботі технологічного обладнання та мереж водопостачання.

Насос має квадратичну залежність моменту опору від швидкості, а потужність на валу двигуна турбомеханізма зменшується в кубічній залежності зі зменшенням частоти обертання. Це зумовлює великі можливості енергозбереження.

Традиційні способи регулювання подачі насосних установок полягають у дроселюванні напірних ліній насосів і зміні загальної чисельності агрегатів, що працюють, за одним з технологічних параметрів – тиском на колекторі або в точці мережі, рівнем у приймальному чи регульовальному резервуарі тощо. Ці способи регулювання спрямовані на вирішення технологічних задач і практично не враховують енергетичних аспектів транспорту води. За такого регулювання від 5 до 15 %, а в окремих випадках до 25–30 % споживаної електроенергії витрачається нераціонально.

Тому з появою надійного регульованого електроприводу створилися передумови для розробки принципово нової технології транспорту води з плавним регулюванням робочих параметрів насосної установки без непродуктивних витрат електроенергії з широкими можливостями підвищення точності і ефективності технологічних критеріїв роботи систем водоподачі.

На рис. 6.1 наведено порівняння кривих необхідної потужності насосних приводів трьох принципів керування.

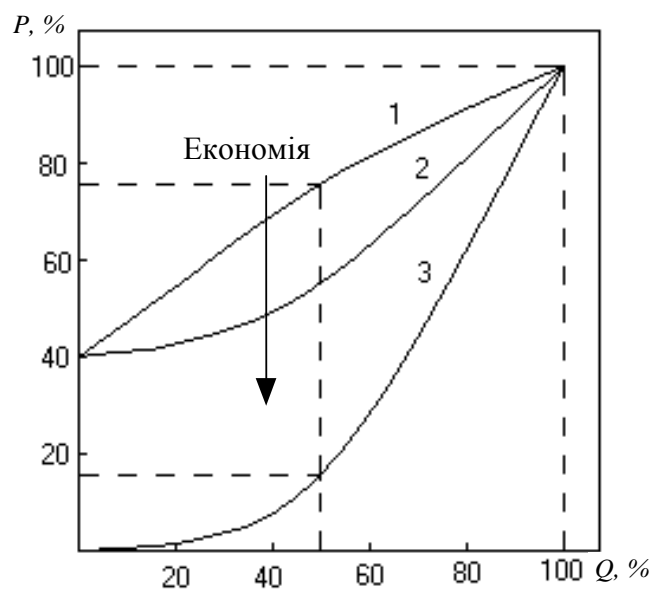


Рисунок 6.1 – Криві необхідної потужності насосних приводів трьох принципів керування

Як видно з рис. 6.1 у разі подачі в обсязі 50 % розрахункового максимуму необхідна потужність під час дроселювання (крива 1) становить 73 %, з використанням запірно-регульовальної арматури (крива 2) – тільки 50 % номінальної, під час регулювання частоти обертання електродвигуна (крива 3) – усього 14 % номінальної потужності.

Отже, поява регульованого електроприводу в насосних установках систем водопостачання та водовідведення дозволяє створити принципово нову технологію енергозбереження транспортування води, із застосуванням якої заощаджується не тільки електроенергія, але і зберігається тепла енергія, і скорочується витрата води завдяки витоків її з перевищенням тиску в

магістралі, коли витрата мала. Під час частотного регулювання насосів можна значною мірою уникнути аварійних ситуацій завдяки запобіганню гідравлічних ударів, що виникають у разі зміни режимів роботи і пуску системи з нерегульованим електроприводом.

### Приклади розв'язання завдань

Холодне водопостачання будівлі здійснюється від насоса типу K90/55 з номінальними напором 55 м, продуктивністю (подачею) 90 м<sup>3</sup>/год (0,025 м<sup>3</sup>/с) і ККД  $\eta_{nom} = 0,63$ . У насосній установці використовується двигун типу АІР18052УЗ з номінальними потужністю 20 кВт і ККД  $\eta_d = 0,88$ . Проводиться модернізація електроприводу насоса за рахунок використання перетворювача частоти (ПЧ) типу Lenze потужністю 22 кВт і вартістю  $C_{pch} = 46848$  грн (станом на 2018 р.). Потрібно оцінити термін окупності виробленої модернізації унаслідок економії електроенергії.

Режим роботи насосної установки цілодобовий. Час роботи насоса становить 8000 год. на рік, з них насос працює з номінальними витратами  $Q_{nom} = 0,025$  м<sup>3</sup>/с і напором  $H_{nom} = 55$  м вод. ст. протягом часу  $T_{r1} = 2600$  год, з витратами  $Q_1 = 0,015$  м<sup>3</sup>/с протягом часу  $T_{r2} = 3000$  год і з витратами  $Q_2 = 0,0025$  м<sup>3</sup>/с протягом часу  $T_{r3} = 2400$  год.

Напір для знижених витрат відповідно до характеристики насоса  $H - Q$  з номінальною швидкістю обертання становить  $H_1 = 59$  м вод. ст. і  $H_2 = 62$  м вод. ст.

Умови розрахунку:

- одноставковий тариф на споживану електроенергію становить 2,7 грн/кВт · год.;
- втрати на пусконаладжувальні роботи складають 8 % від вартості перетворювача частоти;
- втрати на монтаж перетворювача частоти – 10 % від його вартості;
- річні амортизаційні відрахування з перетворювача частоти становлять 6,4 %;

– транспортні витрати приймаються в розмірі 1 % від вартості перетворювача частоти;

– ККД насоса і двигуна для розрахунку незмінні і дорівнюють номінальним;

– чисельність і заробітна плата допоміжного персоналу насосної станції після модернізації не змінилися.

Економію електроенергії знаходимо, зіставляючи споживання електроенергії нерегульованого та регульованого за швидкістю електроприводів.

*Нерегульований за швидкістю електропривод.* Для кожного рівня витрати  $Q$  і напору  $H$  знаходимо споживані потужності за виразом:

$$P_{sp} = \frac{\rho g H Q}{\eta_{nom} \eta_d},$$

де  $\rho$  – густина води,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Споживану енергію знаходимо за формулою:

$$W_{sp} = P_{sp} T_r.$$

Результати розрахунку подані у табл. 6.1.

Споживання електроенергії за рік роботи насосної установки складе 123405 кВт · год.

Таблиця 6.1 – Дані розрахунку нерегульованого електроприводу

$Q$ , м <sup>3</sup> /с	0,025	0,015	0,005
$H$ , м	55	59	62
$T_r$ , год	2600	3000	2400
$P_{sp}$ , кВт	24,33	15,66	5,49
$W_{sp}$ , кВт · год	63260	46980	13165

*Регульований електропривод.* Після модернізації електроприводу унаслідок зниження швидкості двигуна зменшуються з тими же витратами напір  $a$ , отже, споживані потужність і електроенергія.

Перерахунок рівнів напору і потужності для двох швидкостей  $\omega_1$  і  $\omega_2$

здійснюється за допомогою формул подібності:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2; \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3.$$

Дані розрахунку за умови модернізації електроприводу подані в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Дані розрахунку електроприводу для його модернізації

$Q$ , м <sup>3</sup> /с	0,025	0,015	0,005
$H$ , м	55	21,2	2,5
$T_r$ , год	2600	3000	2400
$P_{sp}$ , кВт	24,33	5,64	0,22
$W_{sp}$ , кВт · год	63260	16913	527

Споживання електроенергії в цьому випадку складе 80700 кВт · год, а шукана економія  $W_{ek} = 42705$  кВт · год.

Визначаємо строк окупності, беручи як капітальних витрати вартість перетворювача частоти і всі супровідні витрати під час модернізації:

$$T_{ok} = \frac{KZ}{\Delta E_z} = \frac{46848 \cdot (1 + 0,08 + 0,1 + 0,01)}{(42705 - 46848 \cdot 0,064)} = 1,4 \text{ роки,}$$

де  $KZ$  – капітальні витрати під час модернізації;  $\Delta E_z = E_{z1} - E_{z2}$  – зменшення експлуатаційних витрат, що отримується завдяки виконуваним капітальним витратам,  $E_{z1}$ ,  $E_{z2}$  – відповідно експлуатаційні витрати до і після модернізації.

### Завдання до теми

Оцінити термін окупності модернізації електроприводу насосної установки, яка використовується для холодного водопостачання будівлі.

Холодне водопостачання будівлі здійснюється від насосної установки з консольним насосом типу К і двигуном серії АІР, з паспортними даними, які наведено у додатку Г. Проводиться модернізація електроприводу насоса завдяки використанню перетворювача частоти. Вартість перетворювача частоти  $C_{pch}$  визначається як 2130 грн за 1 кВт.

Режим роботи насосної установки цілодобовий. Час роботи насоса становить 8000 год на рік, з них насос працює з номінальними витратами

$Q_{nom}$  (м<sup>3</sup>/с) і напором  $H_{nom}$  (м вод. ст.) протягом часу  $T_{r1} = 2600$  год, з витратами  $Q_1$  (м<sup>3</sup>/с) протягом часу  $T_{r2} = 3000$  год і з витратами  $Q_2$  (м<sup>3</sup>/с) протягом часу  $T_{r3} = 2400$  год.

Напір для знижених витрат відповідно до характеристики насоса  $H - Q$  з номінальною швидкістю обертання складає  $H_1$  і  $H_2$ .

Умови розрахунку:

- одноставковий тариф на споживану електроенергію складає 2,7 грн/кВт · год.;
- витрати на пусконаладжувальні роботи складають 8 % від вартості перетворювача частоти;
- витрати на монтаж перетворювача частоти – 10 % від його вартості;
- річні амортизаційні відрахування з перетворювача частоти становлять 6,4 %;
- транспортні витрати – 1 % від вартості перетворювача частоти;
- ККД насоса і двигуна для розрахунку незмінні і дорівнюють номінальним;
- чисельність і заробітна плата допоміжного персоналу насосної станції після модернізації не змінилися.

### **Контрольні питання**

1. Чому насоси та вентилятори визнані основними об'єктами енергозбереження засобами електропривода?
2. Які існують способи регулювання подачі насосних установок?
3. Які можливості дозволяє забезпечити використання регульованого електроприводу до насосних установок?

**Література:** [1, с. 35–41; 2, с. 173–181; 5; 9].



## КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

Кількість практичних занять – 12 годин (6 практичних робіт).

*Поточний контроль на практичних заняттях протягом змістових модулів:*

- відвідування практичних занять – 0,5 бала за заняття (максимум 3 бали за умови відвідування всіх практичних занять);
- виконання практичних робіт згідно з методичними вказівками – 1,5 бала за практичну роботу (максимум 9 балів за всі практичні роботи);
- захист практичної роботи – 0,8 бала за практичну роботу (максимум 5 балів за всі практичні роботи);
- опитування під час проведення практичних занять – максимум 0,5 бала за аудиторне заняття (максимум 3 бали за семестр).

Тобто за виконання всіх практичних занять студент може отримати максимальну кількість балів – 20.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ильинский Н. Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.
2. Закладний О. М. Энергоэкономия средствами промышленного электропривода : навчальний посібник / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. – К. Кондор, 2005. – 408 с.
3. Кравчик А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
4. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2001. – 327 с.
5. Асинхронные трехфазные электродвигатели АИР [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://systemax.ua/elektrodvigateli/trehfaznye-obshepromyshlennye-elektrodvigateli/air/>
6. Энергосбережение на промышленных предприятиях : учебное пособие / под ред. проф. М. И. Яворского. – Томск : Изд. ТПУ, 2000. – 134 с.
7. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.
8. Двигатели асинхронные крановые серии МТК и 4МТК для работы в составе частотно-регулируемых приводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.sibelektromotor.ru/news/pdf/SibMotor-instr-Pch.pdf>
9. Насосы консольные типа К, 1К, 2К [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.esbk.ru/products\\_info/nasos/202\\_nasos\\_kons\\_K/202\\_nasos\\_kons\\_K.html](http://www.esbk.ru/products_info/nasos/202_nasos_kons_K/202_nasos_kons_K.html)

## Паспортні дані асинхронних двигунів серії 4А

Варіант	Тип двигуна	Параметр											
		$P_{nom}$ , кВт	$J_{rot.}$ , кг·м <sup>2</sup>	$n_0$ , об/хв	$I_{1nom}$ , А	$s_{nom}$	$s_k$	$\eta_{nom}$	$\cos\varphi_{nom}$	$R_1$ , Ом	$R'_2$ , Ом	$\lambda_k$	$\lambda_{pusk}$
1	4A112M4Y3	5,5	0,0206	1500	11,1	0,035	0,25	0,855	0,882	1,32	0,922	2,2	2
2	4A132M4Y3	11	0,0463	1500	21,53	0,027	0,195	0,875	0,876	0,462	0,312	3	2,2
3	4A160S4Y3	15	0,1	1500	29,263	0,023	0,16	0,885	0,88	0,273	0,179	2,3	1,4
4	4A160M4Y3	18,5	0,13	1500	35,688	0,022	0,16	0,895	0,88	0,215	0,141	2,3	1,4
5	4A180M4Y3	30	0,2245	1500	54,97	0,019	0,14	0,91	0,910	0,16	0,078	2,3	1,4
6	4A200L4Y3	45	0,434	1500	81,36	0,015	0,1	0,92	0,911	0,091	0,045	2,5	1,4
7	4A225M4Y3	55	0,621	1500	99,31	0,014	0,1	0,925	0,908	0,067	0,032	2,5	1,3
8	4A250S4Y3	75	1,0	1500	136,14	0,012	0,095	0,93	0,9	0,0304	0,0199	2,3	1,2
9	4A250M4Y3	90	1,142	1500	158,5	0,013	0,095	0,93	0,921	0,032	0,019	2,3	1,2
10	4A280S4Y3	110	2,3	1500	200,754	0,013	0,085	0,925	0,9	0,0216	0,0143	2	1,2

## Паспортні дані асинхронних двигунів серії АОЗ

Варіант	Тип двигуна	Параметр										
		$P_{nom}$ , кВт	$U_{nom}$ , В	$n_0$ , об/хв	$s_{nom}$ , %	$I_{1nom}$ , А	$\eta_{nom}$ , %	$\cos\varphi_{nom}$	$\sin\varphi_{nom}$	$\lambda_k$	$\lambda_{пуск}$	$p$
1	АОЗ-315S-2УЗ	160	380/660	3000	1,5	169,5	92	0,9	0,44	2	1	1
2	АОЗ-315М-2УЗ	200	380/660	3000	1,2	210,7	92,5	0,9	0,44	2	1	1
3	АОЗ-315S-4УЗ	160	380/660	1500	1,4	163,16	93,5	0,92	0,39	2,3	1,3	2
4	АОЗ-315М-4УЗ	200	380/660	1500	1,4	202,87	94	0,92	0,39	2,3	1,3	2
5	АОЗ-355S-4УЗ	250	380/660	1500	1,3	252,24	94,5	0,92	0,39	2	1	2
6	АОЗ-355М-4УЗ	315	380/660	1500	1,3	314,4	94,5	0,93	0,37	2	1	1
7	АОЗ-355S-6УЗ	160	380/660	1000	1,5	166,78	93,5	0,9	0,44	2,4	1,2	3
8	АОЗ-355М-6УЗ	200	380/660	1000	1,5	207,37	94	0,9	0,44	2,4	1,2	3
9	АОЗ-355S-8УЗ	132	380/660	750	1,5	145,69	93,5	0,85	0,53	2,2	1,2	4
10	АОЗ-355М-8УЗ	160	380/660	750	1,5	174,54	93,5	0,86	0,51	2,2	1,2	4

## Параметри кранових асинхронних двигунів серії МТК

Варіант	Параметри двигуна											Умови розрахунку				
	Тип двигуна	$P_{nom}$ , кВт	$U_{nom}$ , В	$n_0$ , об/хв	$s_{nom}$	$I_{1nom}$ , А	$R_1$ , Ом	$R'_2$ , Ом	$\cos\varphi_{nom}$	$\eta_{nom}$	$\lambda_k$	$t_{ts}$ , с	$t_{nom}$ , с	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$n$ , шт
1	МТК-11-6	2,2	380	1000	0,117	6,4	3,67	5,02	0,76	0,7	2,6	20	10	6	4	300
2	МТК-12-6	3,5	380	1000	0,125	9,6	2,09	3,36	0,78	0,72	2,6	24	12	8	4	370
3	МТК-21-6	5,0	380	1000	0,09	13,4	1,11	1,862	0,75	0,75	3,1	18	8	5	5	350
4	МТК-22-6	7,5	380	1000	0,095	19,3	0,685	1,33	0,76	0,775	3,1	18	10	5	3	320
5	МТКВ312-6	16,0	380	1000	0,095	37,8	0,33	0,52	0,78	0,81	3,1	22	12	4	6	280
6	МТК-31-8	7,5	380	750	0,091	19,1	0,788	1,296	0,76	0,735	3,0	28	16	5	7	290
7	МТК-41-8	11,0	380	750	0,087	28,8	0,43	0,84	0,73	0,78	3,2	30	14	10	6	180
8	МТК-42-8	16,0	380	750	0,087	39,6	0,271	0,598	0,76	0,8	3,3	26	18	4	4	250
9	МТК-51-8	22,0	380	750	0,077	52,6	0,179	0,383	0,77	0,805	3,1	32	16	6	10	270
10	МТК-52-8	28,0	380	750	0,073	64,4	0,137	0,297	0,79	0,82	3,2	22	10	6	6	300

### Параметри насосів типу К і асинхронних двигунів серії АІР

Варіант	Параметри насоса								Параметри двигуна			
	Тип насоса	$Q_{nom}$ , м <sup>3</sup> /ГОД	$H_{nom}$ , м. вод.ст.	$\eta_{nom}$	$Q_1$ , м <sup>3</sup> /ГОД	$H_1$ , м. вод.ст.	$Q_2$ , м <sup>3</sup> /ГОД	$H_2$ , м. вод.ст.	Марка двигуна	$P_{nom}$ , кВт	$n_0$ , об/хв	$\eta_d$
1	K90/35	90	35	0,70	54	37	12	40	AIP 160S2	15	3000	0,894
2	K90/35a	85	29	0,68	53	33	10	36	AIP 132M2	11	3000	0,884
3	K100-80-160	100	32	0,78	65	35	15	38	AIP 160S2	15	3000	0,894
4	K100-65-200	100	50	0,76	65	53	15	56	AIP 180M2	30	3000	0,914
5	K100-65-200a	90	40	0,74	54	43	12	47	AIP 160M2	18,5	3000	0,90
6	K100-65-250	100	50	0,72	65	53	15	56	AIP 200L2	45	3000	0,925
7	K100-65-250a	90	67	0,70	54	70	12	72	AIP 200M2	37	3000	0,92
8	K100-65-250б	80	60	0,68	48	63	10	65	AIP 180M2	30	3000	0,914
9	K160/30	160	30	0,72	90	32	40	35	AIP 180M4	30	1500	0,91
10	K160/30a	140	29	0,70	80	32	35	34	AIP 180S4	22	1500	0,90

Методичні вказівки щодо практичних занять з навчальної дисципліни «Енергоефективні технології в промисловості і комунальних об'єктах» для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами: «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв», «Електричні машини і апарати», «Електротехнічні системи електроспоживання», «Енергетичний менеджмент». Частина 1

Укладачі: к. т. н., доц. С. А. Сергієнко,  
асист. В. Ю. Ноженко

Відповідальний за випуск зав. кафедри САУЕ Д. Й. Родькін

Підп. до др. \_\_\_\_\_. Формат 60×84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.  
Ум. друк. арк. \_\_\_\_\_. Наклад \_\_\_\_\_ прим. Зам № \_\_\_\_\_. Безкоштовно.

Видавничий відділ  
Кременчуцького національного університету  
імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600