

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.869.2:629.46

О. Л. МАРЕНИЧ^{1*}, О. О. КАРЗОВА^{2*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ks.marenych@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

^{2*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта karzova@i.ua, ORCID 0000-0003-3607-1188

Збільшення коефіцієнта потужності електроприводів маневрових залізничних лебідок

Мета. Основною метою роботи є розробка рекомендацій зі збільшення коефіцієнта потужності електроприводів маневрових залізничних лебідок з урахуванням особливостей технологічного процесу на вантажно-розвантажувальних дільницях прирейкових складів підприємств із ремонту рухомого складу залізниць. Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання: обрати раціональний спосіб збільшення коефіцієнта потужності електропривода маневрової лебідки з урахуванням особливостей технологічного процесу, простоти та надійності електричної схеми; розробити методику (алгоритм розрахунку) для визначення елементів схеми, які призначені для збільшення коефіцієнта потужності; із використанням розробленої методики провести дослідження для визначення чисельних технічних характеристик вказаних елементів, оцінки збільшення коефіцієнта потужності для електропривода деяких моделей лебідок; сформулювати рекомендації щодо можливої модернізації електропривода маневрових лебідок. **Методика.** Розроблено алгоритм розрахунку реактивної потужності нерегульованого косинусного конденсатора, який потрібно на постійній основі приєднати до затискачів трифазного асинхронного двигуна приводу маневрової лебідки з метою підвищення коефіцієнта потужності. **Результати.** Дослідження показали, що запропонований спосіб збільшення коефіцієнта потужності дає суттєве його зростання за різних значень коефіцієнта завантаження електродвигуна маневрової лебідки, забезпечуючи при цьому простоту схеми та її надійність. **Наукова новизна.** Уперше з урахуванням особливостей технології розвантаження-завантаження вагонів розроблено методику розрахунку потрібної реактивної потужності нерегульованого косинусного конденсатора, який приєднують до затискачів електродвигуна приводу. Запропоновано формулу для визначення коефіцієнта завантаження електродвигуна залежно від співвідношення розвантажених та завантажених вагонів, які пересуваються за допомогою лебідки. **Практична значимість.** Результати роботи мають практичну цінність. Отримані чисельні значення збільшення коефіцієнтів потужності електроприводів маневрових лебідок та реактивні потужності потрібних для цього косинусних конденсаторів можуть бути використані як первинна інформація під час з'ясування питання доцільності модернізації електроприводів лебідок шляхом приєднання до затискачів трифазного асинхронного двигуна нерегульованих косинусних конденсаторів.

Ключові слова: коефіцієнт потужності; маневрова лебідка; коефіцієнт завантаження; косинусний конденсатор; розвантаження-завантаження вагонів; енергозбереження

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Вступ

Коефіцієнт потужності – важливий параметр кожного електропривода. Збільшення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ електроприводів є одним із напрямів збереження електроенергії в усіх галузях господарства країни. За наявних технологій виробничих процесів на підприємствах залізничного транспорту велика кількість електроприводів працює в умовах завантажень, що суттєво менші від номінальних.

Зі зменшенням навантаження на валу електродвигуна приводу зменшується його $\cos\phi$. Тому збільшення коефіцієнтів потужності недовантажених ТАД (трифазних асинхронних двигунів, які здебільшого застосовують в електроприводах) є актуальною задачею.

Оцінити $\cos\phi$ можна згідно з табл. 1 [8].

Таблиця 1

Оцінка коефіцієнта потужності

Table 1

Power factor estimation

Оцінка значення коефіцієнта потужності	Високе	Добре	Задовільне	Низьке	Незадовільне
$\cos\phi$	0,95...1	0,8...0,95	0,65...0,8	0,5...0,65	0...0,5

Питанням збільшення коефіцієнтів потужності електроприводів на підприємствах із ремонту рухомого складу залізниць присвячені роботи [1, 5, 12], в інших галузях – [18–19, 21].

Характерним прикладом технологій, за яких електропривод суттєвий час працює у недовантаженому режимі, є процес розвантаження та навантаження вагонів із використанням маневрових залізничних лебідок. Манєврова лебідка – це спеціальна тягова лебідка для пересування вагонів. Її використовують як альтернативу манєврового тепловоза для підтягування, обміну завантажених вагонів на порожні та для інших робіт на вантажно-розвантажувальних дільницях прирейкових залізничних складів, а також для проведення різного ремонту у вагонних депо.

Існує значна кількість моделей манєврових електричних лебідок (ТЛ–8Б, ЛМ6ДП, ЛМ–10ДП, ЛМ–8ДП–М, ЛМ–12ДП, ЛВ та ін.) з потужністю ТАД орієнтовно від 4 до 11 кВт та синхронною частотою обертання електродвигунів 1 500, 1 000, 750 об/хв [7, 11]. Завантаження та розвантаження вагонів – один з основних технологічних процесів на залізницях країни, який виконують у великих об'ємах. Літературних джерел із питання збільшення $\cos\phi$ електроприводів манєврових лебідок не знайдено.

Тому дослідження способів збільшення коефіцієнтів потужності електродвигунів манєврових лебідок буде сприяти суттєвому збереженню електроенергії під час вказаних робіт.

Мета

Основною метою нашої роботи є розробка рекомендацій зі збільшення коефіцієнта потужності електроприводів манєврових залізничних лебідок з урахуванням особливостей технологічного процесу на вантажно-розвантажувальних дільницях прирейкових залізничних складів.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- обрати раціональний спосіб збільшення коефіцієнта потужності електропривода манєврової лебідки з урахуванням особливостей технологічного процесу, простоти та надійності електричної схеми;
- розробити методіку (алгоритм розрахунку) для визначення елементів схеми, які призначені для збільшення коефіцієнта потужності;
- із використанням розробленої методіки провести дослідження для визначення чисельних технічних характеристик указаних елементів, оцінки збільшення коефіцієнта потужності для електропривода деяких моделей лебідок;
- сформулювати рекомендації щодо можливої модернізації електропривода манєврових лебідок.

Методика

Чисельні значення $\cos\phi_i$ за i -го коефіцієнта завантаження k_{zi} електродвигуна приводу визначають за залежністю $\cos\phi_i = f(k_{zi})$:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

$$k_{zi} = \frac{P_{2i}}{P_{2ном}}, \quad (1)$$

де P_{2i} – потужність на валу за i -го завантаження; $P_{2ном}$ – номінальна потужність електродвигуна.

Для нашого випадку з урахуванням особливостей технологічного процесу пропонуємо таку формулу:

$$k_{zi} = \frac{P_{2i}}{P_{2ном}} = \frac{N_{сер}m - N_{сер.з}k_{сер.в}n_i}{N_{сер}m}, \quad (2)$$

де $N_{сер}$ – середня вага одного завантаженого вагона, т; m – максимальна кількість завантажених вагонів, які можуть пересуватися з допомогою лебідки згідно з її технічною характеристикою; $N_{сер.з}$ – середнє завантаження одного вагона, т; $k_{сер.в}$ – середній коефіцієнт використання вантажопід'ємності одного вагона по мережі; n_i – кількість розвантажених вагонів.

Коефіцієнт використання вантажопід'ємності коливається залежно від щільності вантажу. У цілому за всіма вантажами середній коефіцієнт використання вантажопід'ємності по мережі складає $k_{сер.в} = 0,86$ [10].

У разі пересування вантажу ($N_{сер}m$), тобто за $n_i = 0$, ТАД приводу маневрової лебідки працює в номінальному режимі. При цьому $P_{2i} = P_{2ном}$, коефіцієнт $k_{z0} = 1$ та $\cos \varphi_0 = \cos \varphi_{ном}$.

Після розвантаження одного вагона ($n_i = 1$):

$$k_{z1} = \frac{N_{сер}m - N_{сер.з}k_{сер.в}}{N_{сер}m}. \quad (3)$$

Після розвантаження двох вагонів ($n_i = 2$):

$$k_{z2} = \frac{N_{сер}m - N_{сер.з}k_{сер.в} \cdot 2}{N_{сер}m}. \quad (4)$$

І так далі до $n_i = n_{i\max} = m$.

Перевантаження електродвигуна не допускають. Тому не розглядаємо $\cos \varphi_i$ за $k_{zi} > 1$.

До сукупності вагонів, що пересуваються маневровою лебідкою, найчастіше належать такі: критий (вага 26 т, завантаження 68 т), піввагон (вага 23 т, завантаження 71 т), платформа (вага 23,5 т, завантаження 71 т) [14]. Середня вага одного вагона вказаних типів:

$$\frac{26 + 23 + 23,5}{3} = 24,2 \text{ т.}$$

Середнє завантаження одного вагона вказаних типів:

$$N_{сер.з} = \frac{68 + 71 + 71}{3} = 70 \text{ т.}$$

Середня вага одного завантаженого вагона:

$$N_{сер} = 24,2 + k_{сер.в} \cdot 70 = 24,2 + 0,86 \cdot 70 = 84,4 \text{ т.}$$

Отримані значення $N_{сер.з}$ та $N_{сер}$ дозволяють визначити k_{zi} за формулою (2) для різних значень n_i та m .

У нашому випадку раціональним із точки зору простоти електричної схеми способом збільшення коефіцієнта потужності ТАД приводу маневрової лебідки вважаємо застосування статичного нерегульованого косинусного конденсатора, який установлюють біля електродвигуна та приєднують безпосередньо до його затисків. Це зумовлено також такими їх якостями: мала вага косинусних конденсаторів, відсутність частин, які обертаються, незначні втрати енергії в них, легкість обслуговування, безпека та надійність у роботі.

У літературі наведено ряд методик із розрахунку робочих характеристик трифазних асинхронних двигунів, наприклад, [2, 4, 13, 15, 17]. У цих методиках для проведення розрахунків характеристик, у тому числі потрібних нам залежностей $\cos \varphi_i = f(k_{zi})$ та $\eta = f(k_{zi})$ (де η – коефіцієнт корисної дії електродвигуна), застосовують схеми заміщення. Вихідними даними є параметри схеми заміщення: активний та індуктивний опори кола намагнічування, активний та індуктивний опори фазної обмотки статора, опори кола ротора. Ці параметри для сучасних ТАД (типу АІР та ін.) у каталогах та довідниках не наводять. Для їх визначення пот-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

рібні розрахунки значних обсягів та суттєві експериментальні дослідження.

Із метою усунення значних обсягів розрахунків потрібних характеристик ($\cos \varphi_i = f(k_{zi})$ та $\eta = f(k_{zi})$) пропонуємо як базовий ТАД узяти електродвигун серії 4А з потужністю та частотою обертання згідно з технічними характеристиками конкретної моделі маневрової лебідки.

Указані характеристики для ТАД серії 4А наведені в [3]. За необхідності двигун серії 4А на практиці можна замінити аналогом із серії АІР [16]. Ідея запропонованого способу розрахунку збільшення $\cos \varphi_i$ електродвигуна приводу лебідки така. Розраховують потрібну реактивну потужність косинусного конденсатора для збільшення $\cos \varphi_i$ при $k_{zi} = 1$ від $\cos \varphi_{\text{ном}}$ до максимального рекомендованого значення в межах 0,92...0,96 [6] за такою формулою:

$$Q_k = P_a (tg\varphi_1 - tg\varphi_2), \quad (5)$$

де Q_k – реактивна потужність, яка потрібна для збільшення коефіцієнта потужності від $\cos \varphi_{\text{ном}}$ до рекомендованого значення 0,91...0,96; P_a – активна потужність, яку споживає електродвигун із мережі, кВт; φ_1 та φ_2 – відповідно кути зсуву фаз між напругою та струмом до приєднання та після приєднання конденсатора, град.

Далі підбирають за довідковими даними косинусний конденсатор із реактивною потужністю, найближчою до розрахункової Q'_{30} в бік збільшення, який на постійній основі приєднують до затискачів ТАД. Для проведення досліджень із метою чисельної оцінки збільшення коефіцієнта потужності за запропонованим способом розроблено такий алгоритм:

1. Визначити модель маневрової лебідки.

2. За формулою (2) розрахувати $k_{zi} = 0, 2, 3, \dots, m$, де m – кількість вагонів згідно з технічною характеристикою обраної моделі лебідки.

3. Вибрати електродвигун серії 4А з номінальною потужністю та частотою обертання відповідно до технічної характеристики лебідки.

4. Для вибраного електродвигуна побудувати графіки залежностей $\cos \varphi_i = f(k_{zi})$ та $\eta = f(k_{zi})$ (рис. 1).

5. Прийняти, що за $k_{30} = 1$ коефіцієнт потужності після приєднання косинусного конденсатора повинен збільшитись від $\cos \varphi_{\text{ном}}$ до 0,94.

За формулою (5) розрахувати $Q'_{30} = Q_k$, у якій Q'_{30} – розрахункова реактивна потужність для збільшення коефіцієнта потужності від $\cos \varphi_{\text{ном}}$ 0,94 за $k_{30} = 1$; φ_1 – кут, косинус якого дорівнює $\cos \varphi_{\text{ном}}$; φ_2 – кут, косинус якого дорівнює 0,94;

$$P_{a0} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}, \quad (6)$$

де P_{a0} – активна потужність, яку споживає електродвигун із мережі в номінальному режимі, кВт (за $k_{30} = 1$).

6. За довідковими джерелами підібрати косинусний конденсатор із реактивною потужністю Q_{30} , найближчою до Q'_{30} у більший бік. У подальшому користуємося Q_{30} .

7. За аналогією до формули (5):

$$Q_{30} = P_{ai} (tg\varphi_i - tg\varphi_{iQ}). \quad (7)$$

Звідки:

$$tg\varphi_{iQ} = \frac{P_{ai} \cdot tg\varphi_i - Q_{30}}{P_{ai}}; \quad (8)$$

$$P_{ai} = \frac{P_i}{\eta_i} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot k_{zi}}{\eta_i}, \quad (9)$$

де P_{ai} – активна потужність, яку споживає ТАД із мережі за певного k_{zi} ; φ_i – кут за певного k_{zi} до вмикання Q_{30} ; φ_{iQ} – кут за певного k_{zi} після вмикання Q_{30} .

Відповідно до $\cos \varphi_i = f(k_{zi})$ знаходимо $\cos \varphi_i$ за певного k_{zi} . За $\cos \varphi_i$ визначаємо кут φ_i і, відповідно, $tg\varphi_i$.

Коефіцієнт η_i знаходимо за $\eta_i = f(k_{zi})$ (рис. 1).

За формулою (8) розраховуємо $tg\varphi_{iQ}$ і, відповідно, кут φ_{iQ} .

8. Знаючи кут φ_{iQ} , визначаємо $\cos \varphi_{iQ}$, що й було нашою метою.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Результати

Наведемо чисельний приклад:

1. Вибираємо маневрову лебідку моделі ТЛ–8Б [7].

Її технічна характеристика:

– максимальна кількість вагонів, що пере-
суваються, – 5;

– режим роботи ПВ – 100 %;

– електродвигун – 4 кВт/1440 об/хв;

– напруга – 380 В;

2. Згідно з технічною характеристикою лебідки $m = 5$.

Вважаємо, що всі п'ять вагонів повністю завантажені, тобто $n_i = 0$. Позначимо коефіцієнт завантаження за $n_i = 0$ через k_{30} .

ТАД працює при цьому в номінальному режимі.

Згідно з формулою (2):

$$k_{30} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 0}{84,4 \cdot 5} = 1;$$

$$k_{31} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 1}{84,4 \cdot 5} = 0,86;$$

$$k_{32} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 2}{84,4 \cdot 5} = 0,72;$$

$$k_{33} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 3}{84,4 \cdot 5} = 0,57;$$

$$k_{34} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 4}{84,4 \cdot 5} = 0,43;$$

$$k_{35} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 5}{84,4 \cdot 5} = 0,29.$$

3. Вибираємо електродвигун 4A100L4УЗ [3] ($P_{\text{ном}} = 4$ кВт, $n_c = 1500$ об/хв, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,84$, $\eta_{\text{ном}} = 0,84$).

У табл. 2 наведено параметри електродвигуна 4A100L4УЗ для побудови $\cos \varphi_i = f(k_{3i})$ та $\eta = f(k_{3i})$.

Таблиця 2

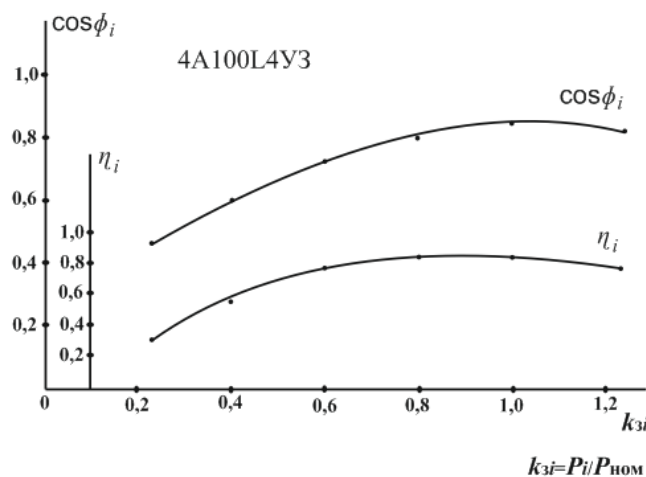
Значення $\cos \varphi_i$ та η_i для електродвигуна 4A100L4УЗ

Table 2

Values $\cos \varphi_i$ and η_i for 4A100L4UZ electric engine

$k_{3i} = P_i / P_{\text{ном}}$	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$\cos \varphi_i$	0,46	0,86	0,79	0,84	0,86
η_i	0,3	0,645	0,5	0,84	0,15

4. Згідно з табл. 2 будуємо графіки $\cos \varphi_i = f(k_{3i})$, $\eta = f(k_{3i})$ (рис. 1).

Рис. 1. Залежності $\cos \varphi_i = f(k_{3i})$ та $\eta = f(k_{3i})$ для 4A100L4УЗFig. 1. Dependencies $\cos \varphi_i = f(k_{3i})$ and $\eta = f(k_{3i})$ for 4A100L4UZ

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

5. Приймаємо, що за $k_{30} = 1$ коефіцієнт потужності після приєднання косинусного конденсатора повинен збільшитись від $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,84$ до рекомендованого значення 0,94.

За формулою (5) розраховуємо $Q'_{30} = Q_k$. Спочатку за формулою (6) визначаємо P_{a0} :

$$P_{a0} = \frac{4}{0,84} = 4,76 \text{ кВт.}$$

Кут, косинус якого дорівнює $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,84$, $\varphi_1 = 33^\circ$.

Кут, косинус якого дорівнює рекомендованому 0,94, $\varphi_2 = 20^\circ$.

Тоді:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} 33^\circ = 0,6494,$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} 20^\circ = 0,364.$$

Кути, їх косинуси та тангенси визначають за допомогою таблиць Брадіса або іншим способом.

6. Відповідно до формули (5):

$$Q'_{30} = 4,76(0,6494 - 0,364) = 1,36 \text{ кВАр.}$$

Як один із можливих варіантів вибираємо конденсатор косинусний ZEZ SILKO CSADG 1–0,4/1,5 (1,5 кВАр) [9].

Технічні характеристики обраного конденсатора:

- номінальна напруга 400 В;
- номінальна частота 50/60 Гц;
- номінальний струм 2,2 А;
- потужність 1,5 кВАр;
- ступінь захисту IP20;
- робоча температура: від -50 до $+65$ °С;
- статистична довговічність: 150 000...200 000 год;
- габарити 85x175 мм;
- кількість фаз 3.

Вартість одного конденсатора – 721 грн із ПДВ.

Таким чином, у нашому випадку $Q'_{30} = 1,5$ кВАр.

7. Значення $\operatorname{tg} \varphi_{iQ}$ розраховуємо за формулою (8) для всіх значень k_{3i}

$$\left(\begin{array}{l} k_{30} = 1; k_{31} = 0,86; k_{32} = 0,72; k_{33} = 0,57; \\ k_{34} = 0,43; k_{35} = 0,29 \end{array} \right).$$

$$\text{У разі } k_{30} = 1 \quad \cos \varphi_0 = \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,84;$$

$$\eta_0 = \eta_{\text{НОМ}} = 0,84; \quad P_{a0} = \frac{4 \cdot 1}{0,84} = 4,76 \text{ кВт;}$$

$$\varphi_0 = 33^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi_0 = \operatorname{tg} 33^\circ = 0,6494;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{0Q} = \frac{4,76 \cdot 0,6494 - 1,5}{4,76} = 0,3343;$$

$$\varphi_{0Q} = 18^\circ 30';$$

$$\cos 18^\circ 30' = 0,9483 \approx 0,95.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = \cos \varphi_0 = 0,84$ (добре) до $\cos \varphi_{0Q} = \cos 18^\circ 30' = 0,9483 \approx 0,95$ (високе).

У разі $k_{31} = 0,86$ $\cos \varphi_1 = 0,82$ (рис. 1); $\eta_1 = 0,86$ (рис. 1); $P_{a1} = \frac{4 \cdot 0,86}{0,86} = 4$ кВт;

$$\varphi_1 = 35^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} 35^\circ = 0,7002;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{1Q} = \frac{4 \cdot 0,7002 - 1,5}{4} = 0,3252;$$

$$\varphi_{1Q} = 18^\circ;$$

$$\cos \varphi_{1Q} = \cos 18^\circ = 0,9511 \approx 0,95.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_1 = 0,82$ (добре) до $\cos \varphi_{1Q} = 0,9511 \approx 0,95$ (високе).

За $k_{32} = 0,72$ $\cos \varphi_2 = 0,77$ (рис. 1); $\eta_2 = 0,82$ (рис. 1); $P_{a2} = \frac{4 \cdot 0,72}{0,86} = 3,51$ кВт;

$$\varphi_2 = 39^\circ 24'; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} 39^\circ 24' = 0,8314;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{2Q} = \frac{3,51 \cdot 0,8314 - 1,5}{3,51} = 0,394;$$

$$\varphi_{2Q} = 21^\circ 30';$$

$$\cos \varphi_{2Q} = \cos 21^\circ 30' = 0,9304.$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_2 = 0,77$ (задовільне) до $\cos \varphi_{2Q} = 0,9304$ (добре, ближче до високе).

За $k_{33} = 0,57$ $\cos \varphi_3 = 0,72$ (рис. 1); $\eta_3 = 0,7$ (рис. 1); $P_{a3} = \frac{4 \cdot 0,57}{0,7} = 3,26$ кВт; $\varphi_3 = 44^\circ$;
 $tg \varphi_3 = tg 44^\circ = 0,9657$;

$$tg \varphi_{3Q} = \frac{3,26 \cdot 0,9657 - 1,5}{3,26} = 0,5056;$$

$$\varphi_{3Q} = 26^\circ 48';$$

$$\cos \varphi_{3Q} = 0,8973.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_3 = 0,72$ (задовільне) до $\cos \varphi_{3Q} = 0,8973$ (добре).

У разі $k_{34} = 0,43$ $\cos \varphi_4 = 0,62$ (рис. 1); $\eta_4 = 0,56$ (рис. 1); $P_{a4} = \frac{4 \cdot 0,43}{0,56} = 3,07$ кВт;
 $\varphi_4 = 52^\circ$; $tg \varphi_4 = tg 52^\circ = 1,2799$;

$$tg \varphi_{4Q} = \frac{3,07 \cdot 1,2799 - 1,5}{3,07} = 0,7913;$$

$$\varphi_{4Q} = 38^\circ 24';$$

$$\cos \varphi_{4Q} = 0,788.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_4 = 0,62$ (низьке) до $\cos \varphi_{4Q} = 0,788$ (задовільне, близьке до добре).

За $k_{35} = 0,29$ $\cos \varphi_5 = 0,51$ (рис. 1); $\eta_5 = 0,38$ (рис. 1); $P_{a5} = \frac{4 \cdot 0,29}{0,38} = 3,05$ кВт; $\varphi_5 = 59^\circ$;

$$tg \varphi_5 = tg 59^\circ = 1,6643;$$

$$tg \varphi_{5Q} = \frac{3,05 \cdot 1,6643 - 1,5}{3,05} = 1,1725;$$

$$\varphi_{5Q} = 49^\circ 30';$$

$$\cos \varphi_{5Q} = 0,6561.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_5 = 0,51$ (низьке, майже незадовільне) до $\cos \varphi_{5Q} = 0,6561$ (задовільне).

Результати досліджень для наочності заведено в табл. 3.

Таблиця 3

Результати досліджень коефіцієнта потужності

Table 3

Results of power factor studies

$k_{3i} = \frac{N_{\text{сеп}} m - N_{\text{сеп},3} k_{\text{сеп},n} n_i}{N_{\text{сеп}} m}$	$k_{30} = 1$	$k_{31} = 0,86$	$k_{32} = 0,72$	$k_{33} = 0,57$	$k_{34} = 0,43$	$k_{35} = 0,29$
$\cos \varphi_i$ (рис. 1)	0,84	0,82	0,77	0,72	0,62	0,51
φ_i	33°	35°	$39^\circ 24'$	44°	52°	59°
η_i (рис. 1)	0,84	0,86	0,82	0,7	0,56	0,38
φ_{iQ}	$18^\circ 30'$	18°	$21^\circ 30'$	$26^\circ 48'$	$38^\circ 24'$	$49^\circ 30'$
$\cos \varphi_{iQ}$	0,95	0,95	0,9304	0,8973	0,788	0,6561,
$\frac{\cos \varphi_{iQ} - \cos \varphi_i}{\cos \varphi_i} \cdot 100 \cdot \%$	13,1	15,85	20,83	24,62	27,1	28,65

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Таким чином, простий і відносно недорогий запропонований нами спосіб (приєднання на постійній основі до ТАД приводу лише одного нерегульованого косинусного конденсатора з реактивною потужністю 1,5 кВАр) збільшує коефіцієнт потужності електроприводу маневрової лебідки моделі ТЛ–8Б від 13,1 % (за $k_{30} = 1$) до 28,65 % (за $k_{35} = 0,29$).

Звернемо увагу, що для деяких моделей маневрових лебідок $\cos \varphi_{\text{ном}} < 0,8$ (як для ТЛ–8Б). Наприклад, для електродвигуна лебідки моделі ЛВ (5,5 кВт, 730 об/хв) [7] як аналог можна взяти електродвигун 4А132М8У3 [3], для якого $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,74$.

У цьому випадку за $k_{30} = 1$:

$$P_{a0} = \frac{5,5}{0,74} = 7,43 \text{ кВт};$$

кут, косинус якого дорівнює $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,74$,
 $\varphi_1 = 42^\circ$;

кут, косинус якого дорівнює рекомендованому 0,94, $\varphi_2 = 20^\circ$;

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} 42^\circ = 0,6691; \operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} 20^\circ = 0,364;$$

$$Q'_{30} = 7,43(0,6691 - 0,364) = 2,27 \text{ кВАр}.$$

Як один із варіантів конденсатора можливе підключення до ТАД приводу лебідки косинусного ZEZ SILKO CSADG 1–0,4/3,15 (3,15 кВАр) [9].

Тобто $Q'_{30} = 3,15$ кВАр.

При цьому коефіцієнт потужності за $k_{30} = 1$ збільшиться на $\frac{0,94 - 0,74}{0,74} \cdot 100 \% = 27 \%$ проти 13,1 % для лебідки ТЛ–8Б.

Зазначена задача збільшення коефіцієнта потужності електродвигунів маневрових залізничних лебідок зумовлена тим, що під час технологічного процесу із завантаження-розвантаження вагонів ТАД приводу значний час працює в недовантаженому режимі. При цьому коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) електродвигуна зменшується порівняно з номінальним режимом. Запропонований спосіб збільшення $\cos \varphi$ електропривода маневрової лебідки по-

лягає в тому, що для досягнення простоти схеми, її надійності та зменшення витрат потужності потрібно безпосередньо до затискачів ТАД приєднати нерегульовану ємність (косинусний конденсатор). Для розрахунку значення реактивної потужності цієї ємності потрібно мати залежності коефіцієнтів потужності та корисної дії від завантаження електродвигуна. Робочі характеристики, у тому числі й вказані залежності, для сучасних трифазних асинхронних двигунів (наприклад, серії АІР) у каталогах, довідниках відсутні. У літературі наведено ряд методик для їх розрахунку, у яких, як правило, використовуються схеми заміщення. Для визначення параметрів схеми заміщення потрібні розрахунки значних обсягів та суттєві експериментальні дослідження.

Запропонована методика базується на використанні як аналога двигунів серії 4А з потужністю та частотою обертання, які вказані в технічних характеристиках маневрових лебідок. Методика не вимагає великих обсягів розрахунків. За вихідні дані виступає інформація, яка наведена в довідниках для електродвигунів серії 4А та в технічних характеристиках маневрових лебідок.

Проведені розрахунки за запропонованим алгоритмом для маневрової лебідки моделі ТЛ–8Б показали, що в разі приєднання до ТАД електропривода лебідки косинусного нерегульованого конденсатора з реактивною потужністю 1,5 кВАр коефіцієнт потужності збільшується на 13,1 % за номінального завантаження і на 28,65 % за мінімального навантаження на валу.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше з урахуванням особливостей технологічного процесу із завантаження-розвантаження вагонів запропоновано методику (алгоритм) розрахунку потрібної реактивної потужності нерегульованого косинусного конденсатора, який рекомендовано на постійній основі приєднати до затискачів ТАД електропривода маневрової лебідки для збільшення його коефіцієнта потужності.

Для визначення чисельних значень коефіцієнтів завантаження електродвигуна під час тех-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

нологічного процесу із завантаження-розвантаження вагонів запропонована відповідна формула.

Розроблена методика (алгоритм) та результати проведених досліджень можуть бути використані під час розробки електроприводів нових маневрових лебідок та модернізації наявних із метою збільшення їх коефіцієнтів потужності.

Висновки

Ця робота має чітко виражений прикладний характер. Під час виконання технологічних процесів на залізничному транспорті крім маневрових лебідок, застосовують тисячі одиниць спеціалізованого обладнання. У більшості ви-

падків в електроприводі цього обладнання застосовують трифазні асинхронні двигуни. Наприклад, під час обслуговування та ремонту локомотивів, вагонів та іншого рухомого складу залізниць електроприводи мийних машин, конвеєрів та іншого обладнання, як і електроприводи маневрових лебідок, працюють у недовантаженому режимі тривалий час. Це зменшує їх коефіцієнти потужності, що, як відомо, негативно впливає на показники мережі постачання. Запропонований спосіб збільшення коефіцієнта потужності електроприводів, методика розрахунку реактивної потужності нерегульованої компенсувальної ємності та отримані результати досліджень можуть бути використані і в цих випадках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балійчук О. Ю., Маренич О. Л., Дубинець Л. В. Підвищення коефіцієнту потужності електроприводів нестандартного обладнання підприємств з ремонту рухомого складу залізниць. *Електрифікація транспорту*. 2017. Вип. № 14. С. 31–36.
2. Васьковський Ю. М., Гераскін О. А. *Метод. вказ. і контрольні задачі до практичних занять з дисципліни «Електричні машини». Розділ «Асинхронні машини» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» напрямку підготовки 6.050702 «Електромеханіка»*. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 38 с.
3. Волошко А. В. *Метод. вказ. до виконання практичних робіт з дисципліни: «Комплексне керування енерговикористанням» для студентів напрямку 6.050701 «Електротехніка та технології» спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання», «Енергетичний менеджмент» 7.05007103, 8.05.007103*. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 36 с.
4. Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М., Козак М. О. Експериментальні дослідження електричних машин. Ч. 3. *Асинхронні машини* : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2007. 197 с.
5. Дубинець Л. В., Карзова О. А., Краснов Р. В., Маренич О. Л., Мельник А. А. Улучшение энергетических показателей предприятий по ремонту подвижного состава. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2013. Вип. 90. С. 144–150.
6. *Загальні відомості про компенсації реактивної потужності*. URL : <https://electrocontrol.com.ua/ua/statistshemu-i-spravochnaaya-informaciya/obshhie-svedeniya-o-kompensacii-reaktivnoj-moshhnosti.html>
7. *Каталог продукції. Лебедки маневровые*. URL : <https://vintalplus.com.ua/catalog>
8. *Коефіцієнт потужності*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Коефіцієнт_потужності
9. *Конденсатор косинусный ZEZ SILKO CSADG 1-0,4/20N (20 kVAr)*. URL: <https://electrocontrol.com.ua/kondensatory/kondensator-kosinusnyi-csadg-1-04-20-20-kvar-zez-silko-00010013>
10. Лаврухін О. В., Бауліна Г. С., Костєнніков О. М., Богомазовата Г. Є. *Вантажні перевезення на залізничному транспорті* : підручник. Харків : Укр. ДУЗТ, 2015. Ч. 1. 260 с.
11. *Маневровые лебедки*. URL: <https://aip.com.ua/pto/lebedki/manevrovye>
12. Маренич О. Л., Гацуляк А. В. Деякі шляхи підвищення енергетичних показників електроприводів підприємств з ремонту рухомого складу залізниць. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : Тези 79 Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 17-18 вересня, 2020)*. Дніпро, 2020. С. 57–58.
13. Постнікова М. В., Квітка С. О. *Розрахунок енергетичних показників асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором* : методичні вказівки до практичної роботи. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 22 с.
14. *Типи і розміри залізничних вагонів*. URL: <https://cutt.ly/YOXrWIE>

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

15. Чорний О. П., Зачепа В. К., Титюк О. А., Чорна О. А. *Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів* : навч. посіб. Кременчуг : ЧП Щербатих А. В., 2019. 122 с.
16. *Электродвигатели 4А и 4АМ. Каталог и технические характеристики.*
URL: <https://aip.com.ua/elektrodvigateli-4a-i-4am/>
17. De Keyser A., Vansompel H., Crevecoeur G. Real-Time energy-efficient actuation of induction motor drives using approximate dynamic programming. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021. Vol. 68. Iss. 12. P. 11837–11846. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2020.3044791>
18. Khodapanah M., Zobaа A. F., Abbod M. Estimating power factor of induction motors at any loading conditions using support vector regression (SVR). *Electrical Engineering*. 2018. Vol. 100. Iss. 4. P. 2579–2588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0723-7>
19. Kostin M., Mishchenko T., Hoholyuk O. Fryze Reactive Power in Electric Transport Systems with Stochastic Voltages and Currents. *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. (16-19 Sept. 2020). Poland, 2020. P. 1–4.
DOI: <https://doi.org/10.1109/cpee50798.2020.9238672>
20. Lane M., Shaeboub A., Gu F., Ball A. D. Investigation of reductions in motor efficiency and power factor caused by stator faults when operated from an inverter drive under open loop and sensorless vector modes. *Systems Science & Control Engineering*. 2017. Vol. 5. Iss. 1. P. 361–379.
DOI: <https://doi.org/10.1080/21642583.2017.1367734>
21. Wibowo P. M., Haddin M., Marwanto A. Energy saving analysis of air fan motor in power plant boiler controlled by variable frequency drive. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2021. Vol. 12. Iss. 4. P. 2059–2069. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2059-2069>
22. Xiao H., Chuang H.-C., Yang Z.-H., Lee C.-T. The efficiency improvement of induction motor with constant speed for belt drive mechanism. *Energy Efficiency*. 2021. Vol. 14, No 8.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10009-6>

O. L. MARENYCH^{1*}, O. O. KARZOVA^{2*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ks.marenych@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

^{2*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail karzova@i.ua, ORCID 0000-0003-3607-1188

Power Factor Increase of Electric Drives of Railway Shunting Winches

Purpose. The main purpose of the work is to develop recommendations for increasing the power factor of electric drives of railway shunting winches, taking into account the peculiarities of the technological process at loading and unloading sites. To achieve this purpose, the following tasks were set: to choose a rational way to increase the power factor of the electric drive of shunting winch, taking into account the peculiarities of the technological process, simplicity and reliability of the electrical circuit; develop a methodology (calculation algorithm) to determine the elements of the circuit, which are designed to increase the power factor; conduct research to determine the numerical technical characteristics of these elements, using the developed methodology; assess the power factor increase for the electric drive of some models of winches; formulate recommendations on possible modernization of the electric drive of shunting winches. **Methodology.** An algorithm for calculating the reactive power of an unregulated cosine capacitor, which has to be permanently connected to the terminals of a three-phase induction motor of a shunting winch drive in order to increase the power factor, is developed. **Findings.** Studies have shown that the proposed method of increasing the power factor gives a significant increase in different values of the load factor of the shunting winch motor, while ensuring the simplicity of the scheme and its reliability. **Originality.** For the first time, taking into account the peculiarities of the technology of unloading and loading cars, a method of calculating the required reactive power of an unregulated cosine capacitor, which is connected to the terminals of the drive motor, is proposed. The formula for determining the load factor of the electric motor depending on the ratio of unloaded and loaded cars that move with a winch is proposed. The formula for determining the load factor of the electric motor depending on the ratio of unloaded and loaded cars, which move using a winch is proposed. **Practical value.** The

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

results are of practical value because the obtained numerical values of increasing the power coefficients of the drives of shunting winches and reactive power required for this cosine capacitors can be used as primary information in deciding whether it is advisable to modernize winch drives by connecting to the terminals of three-phase induction motor.

Keywords: power factor; shunting winch; loading factor; cosine capacitor; unloading-loading of cars; energy saving

REFERENCES

- Baliichuk, O. Yu., Dubynets, L. V., Marenych, O. L., & Lysenko, O. O. (2017). Increasing of the power factor of non-standard equipment of enterprises for repairing the railway rolling-stock. *Electrification of Transport*, 14, 31-36. (in Ukrainian)
- Vaskovsky, Y. M., & Geraskin, O. A. (2013). *Metodychni vказivky i kontrolni zadachi do praktychnykh zanyat z dyscypliny «Elektrychni mashyny». Rozdil «Asynkronni mashyny» dlya studentiv osvitho-kvalifikacijnogo rivnya «bakalavr» napryamu pidgotovky 6.050702 «Elektromexanika»*. Kyiv: NTUU«KPI». (in Ukrainian)
- Voloshko, A. V. (2016). *Metodychni vказivky do vykonannya praktychnykh robit z dyscypliny: «Kompleksne keruvannya energovkory`stanniam» dlya studentiv napryamu 6.050701 «Elektrotexnika ta texnolo-giyy» specialnosti «Elektrotexnichni sy`stemy elektrospozhyvannya», «Energetychnyj menedzhment» 7.05007103, 8.05.007103*. Kyiv: NTUU«KPI». (in Ukrainian)
- Grabko, V. V., Rozvodyuk, M. P., Levitsky, S. M., & Kozak, M. O. (2007). Eksperymentalni doslidzhennya elektrychnykh mashyn. In *Asynkronni mashyny: navchalnyj posibnyk*. (Vol. 3.). Vinnytsia: VNTU. (in Ukrainian)
- Dubinets, L. V., Karzova, O. A., Krasnov, R. V., Marenich, O. L., & Melnik, A. A. (2013). Uluchshenie energeticheskikh pokazateley predpriyatiy po remontu podvizhnogo sostava. *Mining Electromechanics and Automation*, 90, 144-150. (in Russian)
- Zagalni vidomosti pro kompensaciyi reaktivnoyi potuzhnosti*. Retrieved from <https://electrocontrol.com.ua/ua/stati-sxemy-i-spravochnaya-informaciya/obshhie-svedeniya-o-kompensacii-reaktivnoj-moshhnosti.html> (in Ukrainian)
- Catalog. Winch*. Retrieved from <https://vintalplus.com.ua/catalog> (in Russian)
- Koefitsiyent potuzhnosti*. Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/Коефіцієнт_потужності (in Ukrainian)
- Kondensator kosinusnyy EZ SILKO CSADG 1-0,4/20N (20 kVAR)*. Retrieved from <https://electrocontrol.com.ua/kondensatory/kondensator-kosinusnyi-csagd-1-04-20-20-kvar-zez-silko-00010013> (in Russian)
- Lavruxin, O. V., Baulina, G. S., Kostyennikov, O. M., & Bogomazovata, G. Ye. *Vantazhni perevezennya na zaliznychnomu transporti: pidruchnyk*. (Vol. 1). Kharkiv: Ukr. DUZT. (in Ukrainian)
- Manevrovye lebedki*. Retrieved from <https://aip.com.ua/pto/lebedki/manevrovye> (in Russian)
- Marenich, O. L., & Gatsulyak, A. V. (2020, September). Dejaki shljakhy pidvyshhennja energhetychnykh pokaznykiv elektroprivodiv pidpryjemstv z remontu rukhomogho skladu zaliznycj. *Abstracts of the 80th International Scientific and Practical Conference «Problems and Prospects of Railway Transport Development»* (pp. 57-58). Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
- Postnikova, M. V., & Kvitka, S. O. (2020). *Rozrakhunok energhetychnykh pokaznykiv asynkronnoho elektrodvyhuna z korotkozamknenym rotorom: metodychni vказivky do praktychnoyi roboty*. Melitopol: T DATU. (in Ukrainian)
- Typy i rozmiry zaliznychnykh vagoniv*. Retrieved from <https://cutt.ly/YOXrWIE> (in Ukrainian)
- Chorny, O. P., Zachepa, V. K., Tityuk, O. A., & Chorna, O. A. (2019). *Monitorynh i diahnostyka elektromekhanichnykh obyektiv: navchalnyy posibnyk*. Kremenchug: ChP Shcherbatykh A. V. (in Ukrainian)
- Elektrodvigateli 4A i 4AM. Katalog i tekhnicheskie kharakteristiki*. Retrieved from <https://aip.com.ua/elektrodvigateli-4a-i-4am/> (in Ukrainian)
- De Keyser, A., Vansompel, H., & Crevecoeur, G. (2021). Real-Time Energy-Efficient Actuation of Induction Motor Drives Using Approximate Dynamic Programming. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(12), 11837-11846. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2020.3044791> (in English)
- Lane, M., Shaeboub, A., Gu, F., & Ball, A. D. (2017). Investigation of reductions in motor efficiency and power factor caused by stator faults when operated from an inverter drive under open loop and sensorless vector modes. *Systems Science & Control Engineering*, 5(1), 361-379. DOI: <https://doi.org/10.1080/21642583.2017.1367734> (in English)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

19. Khodapanah, M., Zobaа, A. F., & Abbod, M. (2018). Estimating power factor of induction motors at any loading conditions using support vector regression (SVR). *Electrical Engineering, 100*(4), 2579-2588.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0723-7> (in English)
20. Kostin, M., Mishchenko, T., & Hoholyuk, O. (2020, September). Fryze Reactive Power in Electric Transport Systems with Stochastic Voltages and Currents. In *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)* (pp. 1-4). Poland.
DOI: <https://doi.org/10.1109/cpee50798.2020.9238672> (in English)
21. Xiao, H., Chuang, H.-C., Yang, Z.-H., & Lee, C.-T. (2021). The efficiency improvement of induction motor with constant speed for belt drive mechanism. *Energy Efficiency, 14*(8).
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10009-6> (in English)
22. Wibowo, P. M., Haddin, M., & Marwanto, A. (2021). Energy saving analysis of air fan motor in power plant boiler controlled by variable frequency drive. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), 12*(4), 2059-2069. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2059-2069> (in English)

Надійшла до редколегії : 02.06.2021

Прийнята до друку: 04.10.2021