

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 62-83

Л. В. ДУБИНЕЦЬ¹, О. Л. МАРЕНИЧ², О. Ю. БАЛІЙЧУК³, А. С. КОРТОГУЗ^{4*}

¹Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-0319-4544

²Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-3602-5851

³Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

^{4*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 256 19 65, ел. пошта andrykor63@gmail.com, ORCID 0000-0001-9316-3500

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ЛОКОМОТИВНИХ ДЕПО ПРИСТРОЇВ ІЗ НЕРЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Мета. У роботі необхідно провести дослідження електричних двигунів для отримання результатів, які дозволять оцінити ступінь енергозбереження за рахунок зменшення електричних витрат у пристроях із нерегульованим електроприводом. **Методика.** Запропоновано інженерний метод із визначення втрат активної потужності у двигуні пристроїв із нерегульованим електроприводом локомотивних депо при зміні навантаження на валу цих двигунів. Також потрібно провести аналіз зниження втрат активної потужності у двигуні та мережі електропостачання при заміні неповністю навантаженого двигуна двигуном меншої потужності. **Результати.** Після проведених авторами розрахунків було встановлено, що для електричних двигунів у випадках зменшення коефіцієнта завантаження від 0,7...0,75 до 0,4...0,5 зменшення активних втрат після заміни двигуна на менш потужний складає від 0,58 кВт до 2,865 кВт. Також були проведені розрахунки на прикладі електричного двигуна із меншою синхронною частотою обертання: ефект від заміни недовантажених двигунів збільшується з точки зору зниження втрат активної потужності. Найбільший ефект досягається при коефіцієнті завантаження $k_3 \leq 0,55$. **Наукова новизна.** Вперше висвітлено питання ефективності енергозбереження для пристроїв із нерегульованим електроприводом у локомотивних депо шляхом заміни недовантажених двигунів менш потужними. Оскільки розглянутих електроприводів значна кількість, то можливі великі збитки з урахуванням особливостей їх експлуатації. **Практична значимість.** Отримані в ході досліджень результати дозволяють вирішувати задачу по заміні недовантажених двигунів у пристроях локомотивних депо на двигуни меншої потужності з найбільшим ефектом з точки зору зменшення електричних втрат. Так, двигун мийної машини потужністю 90 кВт може бути замінений на двигун потужністю 75 кВт при коефіцієнті завантаження $k_3 \leq 0,7$, що може суттєво зменшити експлуатаційні збитки. Дану методику можна застосувати не тільки в локомотивних депо, а й взагалі для усіх пристроїв із нерегульованим електричним двигуном, які працюють у недовантаженому режимі.

Ключові слова: електропривод; локомотивне депо; енергозбереження; втрати активної потужності; коефіцієнт завантаження двигуна; двигуни серії АІР

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Вступ

Енергозбереження – стратегічна лінія розвитку основних галузей економіки країни. Значну частку у споживанні електричної енергії значну частку складають електричні двигуни різного призначення (на них припадає більше половини виробленої енергії) [3, 12]. Саме тут закладені найбільші резерви енергозбереження. Під час ремонту локомотивів в депо широко застосовують пристрої, в електроприводі яких двигуни працюють в некерованому режимі. Як правило, це асинхронні короткозамкнені двигуни потужністю від десятків долей кВт до декількох десятків кВт. Наприклад, монтажний візок, який застосовують під час ремонту візків локомотивів, має електропривод з потужністю двигуна 0,8 кВт; двигун електропривода конвеєра для ремонту букс тепловозів має потужність 2,2 кВт; потужність електропривода двигуна мийної машини для миття підшипників – 29,7 кВт, мийної машини для миття тягових двигунів – 82 кВт, тощо [1, 16, 18].

Мета

Виконати дослідження для отримання результатів, які дозволять оцінити ступінь енергозбереження за рахунок зменшення електричних витрат в пристроях з нерегульованим електроприводом.

Методика

Практика показує, що в реальних умовах експлуатації вказаних пристроїв залежно від технології ремонту локомотивів коефіцієнт завантаження електроприводів багатьох двигунів не перевищує 50 %. Робота привода в недозавантаженому режимі призводить до величезних втрат. Існує декілька шляхів реалізації енергозбереження засобами промислового електропривода [1, 16, 17, 18]. В нашому випадку найбільш доцільним з точки зору простоти здійснення та втрат є заміна електричного двигуна завищеної потужності менш потужним з метою зниження втрат активної потужності у двигуні і мережі електропостачання [3, 4, 17, 18]. Розглянемо конкретний приклад, коли з метою уніфікації обладнання мийна машина для миття тягових двигунів використовується для миття корпусів редукторів, букс та інших вузлів, які

розміщують на столі підйомно-транспортного візка. При цьому коефіцієнт завантаження двигуна електропривода може змінюватись залежно від завантаження вказаного стола.

Потрібно виконати аналіз зниження втрат активної потужності у двигуні і мережі електропостачання при заміні неповністю навантаженого двигуна, встановленого при виготовленні машини, двигуном меншої потужності при митті інших (не тягових двигунів) вузлів локомотива.

Вихідні дані: режим роботи електропривода – тривалий; двигун серії АИР з параметрами [4, 9]: $P_{ном1} = 90$ кВт, $U_{д ном} = 380$ В, $\eta_{д ном1} = 0,93$, $\cos \varphi_{ном1} = 0,91$, $I_{ном1} = 160$ А, $\cos \varphi_{xx1} = 0,15$; тип двигуна – 5АМ250М2.

Аналіз виконаємо відповідно до [13]. Пропонується такий метод [6, 7, 14]. Втрати активної потужності в режимі холостого ходу електричного двигуна 5АМ250М2:

$$\begin{aligned} \Delta P_{xx1} &= \sqrt{3} I_{xx1} U_{д ном} \cos \varphi_{xx1} \cdot 10^{-3} = \\ &= \sqrt{3} \cdot 48 \cdot 380 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} = 4,73 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Струм холостого ходу:

$$I_{xx1} = 0,3 I_{ном1} = 0,3 \cdot 160 = 48 \text{ А},$$

де 0,3 – коефіцієнт відповідно до [12].

Тоді відносні втрати в режимі холостого ходу:

$$\Delta P_{xx1}^* = \frac{\Delta P_{xx1}}{P_{ном1}} \cdot 100\% = \frac{4,73}{90} \cdot 100\% = 5,25\%.$$

Коефіцієнт завантаження двигуна:

$$k_{z1} = \frac{P_r}{P_{ном}}$$

де P_r – реальне завантаження встановленого двигуна мийної машини.

Доцільність зниження встановленої потужності електричних двигунів необхідно обґрунтовувати розрахунками, якщо:

$$(0,4 \dots 0,5) \leq k_{z1} < (0,7 \dots 0,75).$$

Приймаємо $k_{z1} = 0,7$. Тоді $P_r = k_{z1} P_{ном1} = 0,7 \cdot 90 = 63$ кВт. Найближчий до $P_r = 63$ кВт більший по потужності – двигун

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

типу 5AM250S4 [3]. Технічні характеристики двигуна типу 5AM250S4: $P_{\text{ном}2} = 75$ кВт, $U_{\text{д ном}} = 380$ В, $\eta_{\text{д ном}2} = 0,93$, $\cos \varphi_{\text{ном}2} = 0,91$, $I_{\text{ном}2} = 134,6$ А, $\cos \varphi_{\text{xx}2} = 0,15$.

Тоді для двигуна типу 5AM250S4:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{xx}2} &= \sqrt{3} I_{\text{xx}2} U_{\text{д ном}} \cos \varphi_{\text{xx}2} \cdot 10^{-3} = \\ &= \sqrt{3} \cdot 40,38 \cdot 380 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} = 3,98 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Струм холостого ходу:

$$I_{\text{xx}2} = 0,3 I_{\text{ном}2} = 0,3 \cdot 134,6 = 40,38 \text{ А}$$

$$\Delta P_{\text{xx}2}^* = \frac{\Delta P_{\text{xx}2}}{P_{\text{ном}2}} \cdot 100\% = \frac{3,98}{75} \cdot 100\% = 5,3\%$$

Сумарні втрати $\Delta P_{\Sigma 1}$ активної потужності для двигуна типу 5AM250M2:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma 1} &= (Q_{\text{xx}1} (1 - k_{31}^2) + k_{31}^2 Q_{\text{ном}}) k_e + \\ &+ \Delta P_{\text{xx}1} + k_{31}^2 \Delta P_{361}, \end{aligned}$$

де $Q_{\text{xx}1} = \sqrt{3} U_{\text{д ном}} I_{\text{xx}1} \cdot 10^{-3}$ – реактивна потужність, яку двигун споживає із мережі у випадку холостого ходу;

$$Q_{\text{xx}1} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 48 \cdot 10^{-3} = 31,55 \text{ кВар}.$$

$$Q_{\text{ном}1} = \left(P_{\text{ном}1} \cdot \frac{\text{tg } \varphi_{\text{ном}1}}{\eta_{\text{д ном}1}} \right) - \text{реактивна потужність}$$

електричного двигуна в разі номінального навантаження;

$$Q_{\text{ном}1} = \left(90 \cdot \frac{0,456}{0,93} \right) = 44,13 \text{ кВар}$$

$$\text{tg } \varphi_{\text{ном}1} = \text{tg}(\arccos \varphi_{\text{ном}1}),$$

де $\cos \varphi_{\text{ном}1}$ – номінальний коефіцієнт потужності електричного двигуна;

k_e – коефіцієнт підвищення втрат або економічний еквівалент, що визначає втрати активної потужності на передавання одного кВар реактивної потужності в дані системи електропостачання, $k_e = 0,125$ кВт/кВар – для низьковольтних споживачів [4];

ΔP_{361} – збільшення втрат активної потужності в електричному двигуні за навантаження 100%;

$$\Delta P_{361} = P_{\text{ном}1} \frac{1 - \eta_{\text{д ном}1}}{\eta_{\text{д ном}1}} \cdot \frac{1}{1 + \gamma_1},$$

де $\gamma_1 = \frac{\Delta P_{\text{xx}1}}{\Delta P_{361}}$ – розрахунковий коефіцієнт,

що залежить від конструкції електричного двигуна і обчислюється за формулою:

$$\gamma_1 = \frac{\Delta P_{\text{xx}1}^*}{100(1 - \eta_{\text{д ном}1}) - \Delta P_{\text{xx}1}^*}$$

$$\gamma_1 = \frac{5,25}{100(1 - 0,93) - 5,25} = 3$$

$$\Delta P_{361} = 90 \frac{1 - 0,93}{0,93} \cdot \frac{1}{1 + 3} = 1,7 \text{ кВт}$$

Тоді

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma 1} &= (31,55(1 - 0,7^2) + 0,7^2 \cdot 44,13) \cdot 0,125 + \\ &+ 4,73 + 0,7^2 \cdot 1,7 = 10,27 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Аналогічно сумарні втрати $\Delta P_{\Sigma 2}$ активної потужності для двигуна меншої потужності типу 5AM250S4:

$$\begin{aligned} Q_{\text{xx}2} &= \sqrt{3} U_{\text{д ном}} I_{\text{xx}2} = \\ &= \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 40,38 \cdot 10^{-3} = 26,55 \text{ кВар} \end{aligned}$$

$$Q_{\text{ном}2} = \left(P_{\text{ном}2} \cdot \frac{\text{tg } \varphi_{\text{ном}2}}{\eta_{\text{д ном}2}} \right) =$$

$$= \left(75 \cdot \frac{0,456}{0,93} \right) = 36,77 \text{ кВар}$$

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \frac{\Delta P_{\text{xx}2}^*}{100(1 - \eta_{\text{д ном}2}) - \Delta P_{\text{xx}2}^*} = \\ &= \frac{5,3}{100(1 - 0,93) - 5,3} = 1,7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{362} &= P_{\text{ном}2} \frac{1 - \eta_{\text{д ном}2}}{\eta_{\text{д ном}2}} \cdot \frac{1}{1 + \gamma_2} = \\ &= 75 \frac{1 - 0,93}{0,93} \cdot \frac{1}{1 + 1,7} = 2,09 \text{ кВт} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma 2} &= (Q_{\text{xx}2} (1 - k_{32}^2) + k_{32}^2 Q_{\text{ном}}) k_e + \\ &+ \Delta P_{\text{xx}2} + k_{32}^2 \Delta P_{362} \end{aligned}$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$k_{32} = \frac{P_r}{P_{ном2}} = \frac{63}{75} = 0,84$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (26,55(1 - 0,84^2) + 0,84^2 \cdot 36,77) \cdot 0,125 + 3,98 + 0,84^2 \cdot 2,09 = 9,69 \text{ кВт}$$

Таким чином, після заміни в миючій машині неповністю завантаженого двигуна 5AM250M2 при $k_{31} = 0,7$ двигуном меншої потужності 5AM250S4 отримують зниження втрат активної потужності у двигуні і мережі електропостачання:

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 10,27 - 9,69 = 0,58 \text{ кВт.}$$

Аналогічним чином проведено розрахунки і аналіз зниження втрат активної потужності у двигуні і мережі електропостачання, якщо $k_{31} = 0,65; 0,6; 0,55; 0,5$ при $n = 3000$ об/хв; 1500 об/хв; 1000 об/хв; 750 об/хв.

При виборі [3] типу двигуна найближчого в більший бік за потужністю відносно реального завантаження P_r потрібно забезпечити:

$$k_{32} = \frac{P_r}{P_{ном2}} \leq 0,9$$

Отримали такі результати для двигунів на 3000 об/хв.

При $k_{31} = 0,65$: $P_r = 58,5$ кВт. Найближчий більший по потужності, ніж $P_r = 58,5$ кВт – це двигун типу 5AM250S4 (як і при $k_{31} = 0,7$).

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31,55(1 - 0,65^2) + 0,65^2 \cdot 44,13) \cdot 0,125 + 4,73 + 0,65^2 \cdot 1,7 = 10,07 \text{ кВт}$$

$$k_{32} = 0,78$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (26,55(1 - 0,78^2) + 0,78^2 \cdot 36,77) \cdot 0,125 + 3,98 + 0,78^2 \cdot 2,09 = 8,69 \text{ кВт}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 10,07 - 8,69 = 1,38 \text{ кВт.}$$

При $k_{31} = 0,6$: $P_r = 54$ кВт.

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31,55(1 - 0,6^2) + 0,6^2 \cdot 44,13) \cdot 0,125 + 4,73 + 0,6^2 \cdot 1,7 = 9,85 \text{ кВт}$$

$$k_{32} = 0,72$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (26,55(1 - 0,72^2) + 0,72^2 \cdot 36,77) \cdot 0,125 + 3,98 + 0,72^2 \cdot 2,09 = 8,37 \text{ кВт}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 9,85 - 8,37 = 1,48 \text{ кВт}$$

При $k_{31} = 0,55$: $P_r = 49,5$ кВт. Найближчий по потужності більший по потужності двигун типу 5A225M2 (55 кВт, 3000 об/хв). При цьому забезпечено $k_{32} = \frac{49,5}{55} = 0,9$.

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31,55(1 - 0,55^2) + 0,55^2 \cdot 44,13) \cdot 0,125 + 4,73 + 0,55^2 \cdot 1,7 = 9,67 \text{ кВт.}$$

$\frac{I_{xx2}}{I_{ном2}} = 0,25$ (відповідно до [7] це відношення приймаємо 0,25, що є середнім значенням цього відношення для інтервалу потужностей 22,5...110 кВт і відповідає середньому значенню потужності – 55 кВт).

$$I_{xx2} = 24,8 \text{ А}; \Delta P_{xx2} = 2,45 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{xx2}^* = 4,45 \%$$

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31,55(1 - 0,55^2) + 0,55^2 \cdot 44,13) \times 0,125 + 4,73 + 0,55^2 \cdot 1,7 = 9,67 \text{ кВт}$$

$$Q_{xx2} = 16,3 \text{ кВар}; Q_{ном2} = 27,11 \text{ кВар};$$

$$\gamma_2 = 1,46; \Delta P_{362} = 1,83 \text{ кВт.}$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (16,3(1 - 0,9^2) + 0,9^2 \cdot 27,11) \times 0,125 + 2,45 + 0,9^2 \cdot 1,83 = 7,06 \text{ кВт}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 9,67 - 7,06 = 2,61 \text{ кВт.}$$

При $k_{31} = 0,5$: $P_r = 45$ кВт. Найближчий більший по потужності двигун типу 5A225M2. $k_{32} = 0,82$.

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31,55(1 - 0,5^2) + 0,5^2 \cdot 44,13) \times 0,125 + 4,73 + 0,5^2 \cdot 1,7 = 9,495 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (16,3(1 - 0,82^2) + 0,82^2 \cdot 27,11) \times 0,125 + 2,45 + 0,82^2 \cdot 1,83 = 6,63 \text{ кВт}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 9,495 - 6,63 = 2,865 \text{ кВт.}$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Аналогічним чином отримані наступні значення ΔP для двигунів серії АИР на 1500 об/хв .

При $k_{31} = 0,7$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10,59$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9,23$ кВт	$\Delta P = 1,36$ кВт
При $k_{31} = 0,65$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10,48$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9,09$ кВт	$\Delta P = 1,39$ кВт
При $k_{31} = 0,6$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10,34$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 8,92$ кВт	$\Delta P = 1,42$ кВт
При $k_{31} = 0,55$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10,25$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7,415$ кВт	$\Delta P = 2,835$ кВт
При $k_{31} = 0,5$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10,128$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7,17$ кВт	$\Delta P = 2,96$ кВт

Для двигунів серії АИР на 1000 об/хв отримано наступне.

При $k_{31} = 0,7$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11,43$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9,73$ кВт	$\Delta P = 1,7$ кВт
При $k_{31} = 0,65$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11,37$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9,64$ кВт	$\Delta P = 1,73$ кВт
При $k_{31} = 0,6$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11,3$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9,55$ кВт	$\Delta P = 1,75$ кВт
При $k_{31} = 0,55$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11,23$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 8,49$ кВт	$\Delta P = 2,74$ кВт
При $k_{31} = 0,5$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11,17$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 8,37$ кВт	$\Delta P = 2,8$ кВт

Для двигунів серії АИР на 750 об/хв отримано наступне.

При $k_{31} = 0,7$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 13,04$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 10,9$ кВт	$\Delta P = 2,14$ кВт
При $k_{31} = 0,65$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 13,02$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 10,825$ кВт	$\Delta P = 2,195$ кВт
При $k_{31} = 0,6$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 12,98$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9,16$ кВт	$\Delta P = 3,82$ кВт
При $k_{31} = 0,55$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 12,86$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7,84$ кВт	$\Delta P = 5,02$ кВт
При $k_{31} = 0,5$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 12,87$ кВт	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7,73$ кВт	$\Delta P = 5,09$ кВт

Для наочності покажемо $\Delta P = f(k_{31})$ у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

Залежність $\Delta P = f(k_{31})$

3000 об/хв					
ΔP , кВт	0,58	1,38	1,48	2,61	2,865
k_{31}	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
1500 об/хв					
ΔP , кВт	1,36	1,39	1,42	2,835	2,96
k_{31}	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
1000 об/хв					
ΔP , кВт	1,7	1,73	1,75	2,74	2,8
k_{31}	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Закінчення табл. 1

750 об/хв						
ΔP , кВт	2,14	2,195	3,82	5,02	5,09	
k_{31}	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	

Параметри, вказані в табл. 1, отримані при використанні типів електричних двигунів, які наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Типи двигунів, які використані під час досліджень

3000 об/хв						
Тип ел. двигуна	5AM250M2	5AM250S4	5AM250S4	5AM250S4	5A225M2	5A225M2
k_{31}	>0,7	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
1500 об/хв						
Тип ел. двигуна	5AM250M4	5AM250S4	5AM250S4	5AM250S4	5A225M4	5A225M4
k_{31}	>0,7	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
1000 об/хв						
Тип ел. двигуна	AIP280M6	AIP280S6	AIP280S6	AIP280S6	AIP250M6	AIP250M6
k_{31}	>0,7	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
750 об/хв						
Тип ел. двигуна	AIP315S8	AIP280M2	AIP280M2	AIP280M2	AIP280S8	AIP280S8
k_{31}	>0,7	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5

Результати

У результаті виконаних досліджень встановлено, що для електричних двигунів серії АІР при зміні коефіцієнта завантаження в межах $(0,4...0,5) \leq k_3 \leq (0,7...0,75)$ зменшення втрат активної потужності у двигуні і мережі після заміни двигуна, неповністю навантаженого двигуном меншої потужності складає від 0,58 до 2,865 кВт при вихідній потужності двигуна 90 кВт. Отримані численні значення зниження вказаних втрат можуть бути використані як первинна інформація при вирішенні питання доцільності заміни двигунів у вказаному інтервалі значень коефіцієнта завантаження. При застосуванні двигунів із меншою синхронною

частотою обертання ефект від заміни неповністю навантажених двигунів збільшується з точки зору зниження втрат активної потужності. Найбільший ефект досягається при коефіцієнті завантаження $k_3 \leq 0,55$.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше висвітлено питання ефективності енергозбереження для пристроїв з нерегульованим електроприводом шляхом заміни недовантажених двигунів менш потужними з урахуванням особливостей їх експлуатації в локомотивних депо. Отримані в ході досліджень результати дозволяють вирішувати завдання щодо заміни недовантажених двигунів у пристроях локомотивних депо на двигуни меншої потужності з

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

найбільшим ефектом з точки зору зменшення електричних втрат та збільшення періоду експлуатації електричних двигунів.

Висновки

1. Запропонований метод визначення зниження втрат активної потужності в електричному двигуні і мережі електропостачання після заміни неповністю навантаженого двигуна двигуном меншої потужності може бути застосований під час експлуатації різних машин у тривалому режимі на підприємствах з ремонту рухомого складу залізниць.

2. Отримані численні значення зниження вказаних втрат можуть бути використані як первинна інформація при вирішенні питання доцільності заміни двигунів в інтервалі значень коефіцієнта завантаження $0,5 < k_3 < 0,7$.

3. При застосуванні двигунів із меншою синхронною частотою обертання ефект від заміни неповністю навантажених двигунів збільшується з точки зору зниження втрат активної потужності. Найбільший ефект досягається при коефіцієнті завантаження $k_3 \leq 0,55$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Вишневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вишневский. – Ленинград : Энергия, 1977. – 432 с.
- ДСТУ 3886-99. Енергозбереження. Системи електроприводу. Метод аналізу та вибору. – Надано чинності 2000-07-01. – Київ : Держстандарт України, 2000. – 54 с.
- Закладний, О. М. Енергозбереження засобами промислового електропривода / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. – Київ : Кондор, 2005. – 408 с.
- Ильинский, Н. Ф. Энергосбережение в электроприводе / Н. Ф. Ильинский. – Москва : Высш. шк., 1989. – 127 с.
- Кацман, М. М. Справочник по электрическим машинам / М. М. Кацман. – Москва : Академия, 2005. – 480 с.
- Ковалко, М. П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк ; відпов. ред. А. К. Шидловський. – Київ : УЕЗ, 1998. – 506 с.
- К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 62–67.
- Кужеков, С. Л. Практическое пособие по электрическим сетям и электрооборудованию / С. Л. Кужеков, С. В. Гончаров. – 5-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2010. – 492 с.
- Мамолапа, В. М. Энергосбережение в системах электропривода / В. М. Мамолапа. – Київ : Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. – 86 с.
- Маренич, О. Л. Підвищення коефіцієнта потужності електродвигунів пристроїв на підприємствах з ремонту залізничної техніки / О. Л. Маренич, О. О. Маренич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 21. – С. 72–73.
- Поточные линии ремонта локомотивов в депо / Н. И. Фильков, Е. Л. Дубинский, М. М. Майдель, И. Б. Стерлин. – Москва : Транспорт, 1983. – 302 с.
- Предельно допустимые значения тока холостого хода для трехфазных асинхронных двигателей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://granat-es.ru/2.-dopustimye-znacheniya-tokaholos>. – Назва з екрану – Перевірено : 09.09.2016.
- Родионов, В. Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего / В. Г. Родионов. – Москва : ЭНАС, 2010. – 352 с.
- Сибикин, Ю. Д. Технология энергосбережения / М. Ю. Сибикин, Ю. Д. Сибикин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Форум, 2012. – 352 с.
- Улучшение энергетических показателей предприятий по ремонту подвижного состава / Л. В. Дубинец, О. Л. Маренич, О. А. Карзова [и др.] // Гірнич електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. / ДВНЗ «НГУ». – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 90. – С. 144–150.
- Электродвигатели АИР – технические характеристики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: electronpro.ru/production. – Назва з екрану – Перевірено : 09.09.2016.
- Hillmans, S. Electric railway traction systems and techniques for energy saving / S. Hillmans, R. Tllis // Proc. of IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems. – 2014. – P. 6. doi: 10.1049/cp.2014.1432.
- Zeraoulia, M. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study / M. Zeraoulia, M. El H. Benbouzid, D. Diallo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2006. – Vol. 55. – Iss. 6. – P. 1756–1764. doi: 10.1109/TVT.2006.878719.

Л. В. ДУБИНЕЦ¹, О. Л. МАРЕНИЧ², А. Ю. БАЛІЙЧУК³, А. С. КОРТОГУЗ^{4*}

¹Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-0319-4544

²Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-3602-5851

³Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

^{4*}Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 256 19 65, ел. пошта andrykor63@gmail.com, ORCID 0000-0001-9316-3500

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЛОКОМОТИВНОМ ДЕПО УСТРОЙСТВ С НЕРЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Цель. В работе необходимо провести исследования электродвигателей для получения результатов, которые позволят оценить степень энергосбережения за счет уменьшения электрических потерь в устройствах с нерегулируемым электроприводом. **Методика.** Предложен инженерный метод по определению потерь активной мощности в устройствах с нерегулируемым электроприводом локомотивных депо при изменении нагрузки на валу этих двигателей. Также нужно провести анализ снижения потерь активной мощности в двигателе и сети электроснабжения при замене не полностью нагруженного двигателя двигателем меньшей мощности. **Результаты.** После проведенных авторами расчетов было установлено, что для электродвигателей в случае уменьшения коэффициента загрузки от 0,7...0,75 до 0,4...0,5 уменьшение активных потерь после замены двигателя на менее мощный составляет от 0,58 кВт до 2,865 кВт. Также были проведены расчеты на примере электродвигателей с меньшей синхронной частотой вращения: эффект от замены нагруженных двигателей увеличивается с точки зрения снижения потерь активной мощности. Наибольший эффект достигается при коэффициенте загрузки $k_3 \leq 0,55$. **Научная новизна.** Впервые освещены вопросы эффективности энергосбережения для устройств с нерегулируемым электроприводом в локомотивных депо путем замены недогруженных двигателей менее мощными. Поскольку рассмотренных электроприводов значительное количество, то возможны большие убытки с учетом особенностей их эксплуатации. **Практическая значимость.** Полученные в ходе исследований результаты позволяют решать задачу по замене недогруженных двигателей в устройствах локомотивных депо на двигатели меньшей мощности с максимальным эффектом с точки зрения уменьшения электрических потерь. Так, двигатель мочной машины мощностью 90 кВт может быть заменен на двигатель мощностью 75 кВт при коэффициенте загрузки $k_3 \leq 0,7$, что может существенно уменьшить эксплуатационные убытки. Данную методику можно применять не только в локомотивных депо, а и в общем для всех устройств с нерегулируемым электродвигателем, работающих в недогруженном режиме.

Ключевые слова: электропривод; локомотивное депо; энергосбережение; потери активной мощности; коэффициент загрузки двигателя; двигатели серии АИР

L. V. DUBYNETS¹, O. L. MARENYCH², O. YU. BALICHUK³, A. S. KORTOHUS^{4*}

¹Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-0319-4544

²Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-3602-5851

³Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

^{4*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 256 19 65, e-mail andrykor63@gmail.com, ORCID 0000-0001-9316-3500

ENERGY SAVING DURING OPERATION OF EQUIPMENT WITH NON-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE IN LOCOMOTIVE DEPOT

Purpose. To conduct research of electric motors in order to obtain the results that will assess the degree of energy saving due to electric loss reduction in the equipment with non-controlled electric drive. **Methodology.** The paper proposes an engineering method for determination of active power losses in the motors of the equipment with non-controlled electric drive in locomotive depot during load changes on the motor shaft. It is necessary to analyse the reduction of active power losses in the motor and the power supply network when an under-loaded motor is replaced with a motor having less power. **Findings.** After the calculations performed by the authors, it was found that for electric motors, in case of reducing the load factor from 0,7...0,75 to 0,4...0,5 active loss reduction after the motor replacement for the less powerful one ranges from 0.58 kW to 2.865 kW. Also, the calculations were carried out on the example of electric motors with a lower synchronous speed, the effect of under-loaded motor replacement increases in terms of active power loss reduction. The greatest effect is achieved when the load factor is $k_l \leq 0.55$. **Originality.** For the first time the paper outlines the issues of energy saving efficiency for the equipment with non-controlled electric drive in locomotive depot by replacing the under-loaded motors with the less powerful ones. As long as there is a significant amount of the considered electric drives, it may cause severe losses, taking into account the peculiarities of their operation. **Practical value.** The obtained research results allow us to solve the problem of replacement of under-loaded motors in locomotive depot equipment with the motors having less power as efficiently as possible in terms of reducing electric losses. For instance 90-kW motor of a washing machine can be replaced with 75-kW motor when the load factor is $k_l \leq 0.7$, this can significantly reduce the performance losses. This method can be applied not only in locomotive depot but also for all equipment with non-controlled electric drives that operates in under-load mode.

Keywords: electric drives; locomotive depot; energy savings; active power loss; motor load factor; AIR series motors

REFERENCES

1. Vishnevskiy S.N. *Kharakteristiki dvigateley v elektroprivode* [Characteristics of engines in the electric driver]. Leningrad, Energiya Publ., 1977. 432 p.
2. *Derzhavnyi standart Ukrainy DSTU 3886-99. Enerhozberezhennia. Systemy elektroprivodu. Metod analizu ta vyboru* [State Standard 3886-99. Energy saving. Electric systems. The method of analysis and selection]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 2000. 54 p.
3. Zakladnyi O.M., Prakhovnyk A.V., Solovei O.I. *Enerhozberezhennia zasobamy promyslovoho elektroprivodu* [Energy saving by industrial electric drivers]. Kyiv, Kondor Publ., 2005. 408 p.
4. Ilnskiy N.F. *Energozberezeniye v elektroprivode* [Energy Saving in the motor driver]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 127 p.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

5. К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода [To the theory of energy saving by means of industrial drive]. *Elektrotehnika – Electrotechnics*, 1999, no. 5, pp. 62-67.
6. Kovalko M.P., Denysiuk S.P., Shydlovskiy A.K. *Enerhozberezhennia – priorytetnyi napriamok derzhavnoi polityky Ukrainy* [Energy conservation is a priority direction of Ukraine's state policy]. Kyiv, UEZ Publ., 1998. 506 p.
7. Mamolapa V.M. *Energosberezheniye v sistemakh elektroprivoda* [Energy Saving in the motor driver systems]. Kiyev, Energeticheskii tsentr YES v Kiyeve Publ., 1995. 86 p.
8. Kuzhekov S.L., Goncharov S.V. *Prakticheskoye posobiye po elektricheskim setyam i elektrooborudovaniyu* [Handbook on electrical networks and equipment]. Rostov na Donu, Feniks Publ., 2011. 492 p.
9. Marenych O.L., Marenych O.O. Pidvyshchennia koefitsienta potuzhnosti elektrodvyhunyv prystoiv na pidpriemstvakh z remontu zaliznychnoi tekhniki [The power factor improving of the motors in enterprises with repair of railway equipment]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 21, pp. 72-73.
10. Filkov N.I., Dubinskiy Ye.L., Maydel M.M., Sterlin I.B. *Potochnyye linii remonta lokomotivov v depo* [In-line systems of locomotive repair in the motive-power depot]. Moscow, Transport Publ., 1983. 302 p.
11. *Predelno dopustimyye znacheniya toka kholostogo khoda dlya trekhfaznykh asinkhronnykh dvigateley* (The limit values of nitrogen-load current for three-phase asynchronous motors). Available at: <http://granates.ru/2.-dopustimye-znacheniya-toka-holos> (Accessed 09 September 2016).
12. Rodionov V.G. *Energetika: problemy nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego* [Energy: Present questions and opportunities of the future]. Moscow, ENAS Publ., 2010. 352 p.
13. Sibikin Yu.D., Sibikin M.Yu. *Tekhnologiya energosberezheniya* [Energy saving technology]. Moscow, Forum Publ., 2012. 352 p.
14. Katsman M.M. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Handbook of electrical machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 480 p.
15. Dubinets L.V., Marenich O.L., Karzova O.A., Krasnov R.V., Melnik A.A. Uluchsheniye energeticheskikh pokazateley predpriyatiy po remontu podvizhnogo sostava [Improving the energy performance of enterprises on rolling stock repair]. *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk: «Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka»* [Scientific and research collection: «Mining electrical engineering and automation»]. Dnipropetrovsk, 2013, issue 90, pp. 144-150.
16. *Elektrodvigateli AIR – tekhnicheskiye kharakteristiki* (AIR electric motors–specifications). Available at: electronpo.ru/production (Accessed 09 September 2016).
17. Hillmansen S., Tllis R. Electric railway traction systems and techniques for energy saving. Proc. of IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems, 2014. 6 p. doi: 10.1049/cp.2014.1432.
18. Zeraoulia M., Benbouzid M.El H., Diallo D. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, vol. 55, issue 6, pp. 1756-1764. doi: 10.1109/T VT.2006.878719.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна), д.т.н., проф. М. О. Костіним (Україна)

Надійшла до редколегії: 27.05.2016

Прийнята до друку: 15.09.2016