

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 62-83

L. V. DUBYNETS¹, O. L. MARENYCH², O. YU. BALIICHUK³, 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

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Introduction

Energy saving is the strategic line of development of the main branches of the economy. A significant share of electric power consumers falls to electric motors of various purposes, which consume more than half of the energy produced [3, 12]. There is where the largest energy saving reserves lie in. The repair of locomotives in a depot often involves the equipment whose electric drive motors operate in non-controlled mode. This usually includes squirrel-cage induction motors with power from tenth of kW to several tens of kW. For example, dolly, which is used for repair of locomotive bogies, has the electric motor with power of 0.8 kW; the electric motor of the assembly line for locomotive axle-box repair has power of 2.2 kW; electric motor power of the washing machine for washing the bearings is 29.7 kW, that of washing machine for washing the traction motors is 82 kW, etc. [1, 16, 18].

Purpose

To conduct research 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

Practice shows that in real operation conditions of this equipment, depending on the locomotive repair technology, the load factor of many electric drive motors is less than 50%. The drive operation in under-load mode results in huge losses. There are several ways to implement energy saving by means of an industrial electric drive [1, 16, 17, 18]. In our case, the most appropriate in terms of ease of implementation and losses is the replacement of the powerful electric drive with that having less power to reduce active power losses in the motor and in the electricity network [3, 4, 17, 18]. Let us consider the specific example, when for the purpose of equipment unification the traction motor washing machine is used for washing reduction gear housing, axle-box and other assemblies that are placed on the table of the handling dolly. Herewith the electric drive motor load factor may vary depending on the table load.

It is necessary to analyse the reduction of active power losses in the motor and the electrical net-

work when replacing the under-loaded motor mounted during the equipment manufacture with the less powerful motor when washing other (non-traction motors) units of the locomotive.

Initial data: electric drive mode is long-term. AIR series motor with the following parameters [4, 9]: $P_{nom1} = 90 \text{ kW}$, $U_{m\ nom} = 380 \text{ V}$, $\eta_{m\ nom1} = 0.93$, $\cos \varphi_{nom1} = 0.91$, $I_{nom1} = 160 \text{ A}$, $\cos \varphi_{xx1} = 0.15$. Motor type – 5AM250M2.

The analysis is performed in accordance with [13]. We propose the following method [6, 7, 14]. Losses of active power in no-load mode of 5AM250M2 motor:

$$\begin{aligned} \Delta P_{xx1} &= \sqrt{3} I_{xx1} U_{m\ nom} \cos \varphi_{xx1} \cdot 10^{-3} = \\ &= \sqrt{3} \cdot 48 \cdot 380 \cdot 0.15 \cdot 10^{-3} = 4.73 \text{ kW} \end{aligned} \quad (1)$$

No-load current:

$$I_{xx1} = 0.3 I_{nom1} = 0.3 \cdot 160 = 48 \text{ A}, \quad (2)$$

where 0.3 – coefficient according to [12].

Then the relative losses in no-load mode:

$$\begin{aligned} \Delta P_{xx1}^* &= \frac{\Delta P_{xx1}}{P_{nom1}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{4.73}{90} \cdot 100\% = 5.25\% \end{aligned} \quad (3)$$

The motor load factor:

$$k_{l1} = \frac{P_r}{P_{nom}} \quad (4)$$

where P_r – actual load of the mounted motor of the washing machine.

The feasibility of reducing the installed motor power must be justified with calculations, if:

$$(0.4...0.5) \leq k_{l1} < (0.7...0.75) \quad (5)$$

We accept: $k_{l1} = 0.7$. Then: $P_r = k_{l1} P_{nom1} = 0.7 \cdot 90 = 63 \text{ kW}$. The closest to $P_r = 63 \text{ kW}$ and more powerful is the motor of 5AM250S4 type [3]. Specifications of 5AM250S4 type motor: $P_{nom2} = 75 \text{ kW}$, $U_{m\ nom} = 380 \text{ V}$, $\eta_{m\ nom2} = 0.93$, $\cos \varphi_{nom2} = 0.91$, $I_{nom2} = 134.6 \text{ A}$, $\cos \varphi_{xx2} = 0.15$.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Then for 5AM250S4 type motor:

$$\Delta P_{xx2} = \sqrt{3} I_{xx2} U_{m\text{ nom}} \cos \varphi_{xx2} \cdot 10^{-3} = \\ = \sqrt{3} \cdot 40.38 \cdot 380 \cdot 0.15 \cdot 10^{-3} = 3.98 \text{ kW} \quad (6)$$

No-load current:

$$I_{xx2} = 0.3 I_{\text{nom}2} = 0.3 \cdot 134.6 = 40.38 \text{ A}, \quad (7)$$

$$\Delta P_{xx2}^* = \frac{\Delta P_{xx2}}{P_{\text{nom}2}} \cdot 100\% = \frac{3.98}{75} \cdot 100\% = 5.3\% \quad (8)$$

The total active power losses $\Delta P_{\Sigma 1}$ for 5AM250M2 type motor:

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (Q_{xx1} (1 - k_{l1}^2) + k_{l1}^2 Q_{\text{nom}}) k_e + \\ + \Delta P_{xx1} + k_{l1}^2 \Delta P_{\text{in}1}, \quad (9)$$

where

$$Q_{xx1} = \sqrt{3} U_{m\text{ nom}} I_{xx1} \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

– reactive power consumed from the network in no-load mode;

$$Q_{xx1} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 48 \cdot 10^{-3} = 31.55 \text{ kVAr}.$$

$$Q_{\text{nom}1} = \left(P_{\text{nom}1} \cdot \frac{\text{tg } \varphi_{\text{nom}1}}{\eta_{m\text{ nom}1}} \right) \quad (11)$$

– reactive motor power in rated load mode;

$$Q_{\text{nom}1} = \left(90 \cdot \frac{0.456}{0.93} \right) = 44.13 \text{ kVAr}$$

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

where $\cos \varphi_{\text{nom}1}$ – nominal motor power factor; k_e – increased loss coefficient or economic equivalent, which determines the active power losses for transmission of one kVAr of reactive power into these power supply systems, $k_e = 0.125 \text{ kW/kVAr}$ for low voltage consumers [4]; $\Delta P_{\text{in}1}$ – increased active power losses in the electric motor for 100% load;

$$\Delta P_{\text{in}1} = P_{\text{nom}1} \frac{1 - \eta_{m\text{ nom}1}}{\eta_{m\text{ nom}1}} \cdot \frac{1}{1 + \gamma_1}, \quad (12)$$

where $\gamma_1 = \frac{\Delta P_{xx1}}{\Delta P_{\text{in}1}}$ – design coefficient depending on the electric motor design and calculated by the formula:

$$\gamma_1 = \frac{\Delta P_{xx1}^*}{100(1 - \eta_{m\text{ nom}1}) - \Delta P_{xx1}^*} \quad (13)$$

$$\gamma_1 = \frac{5.25}{100(1 - 0.93) - 5.25} = 3$$

$$\Delta P_{\text{in}1} = 90 \frac{1 - 0.93}{0.93} \cdot \frac{1}{1 + 3} = 1.7 \text{ kW}$$

Then,

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.7^2) + 0.7^2 \cdot 44.13) \cdot 0.125 + \\ + 4.73 + 0.7^2 \cdot 1.7 = 10.27 \text{ kW}_T$$

Similarly, the total active power losses for less powerful motor of 5AM250S4 type:

$$Q_{xx2} = \sqrt{3} U_{m\text{ nom}} I_{xx2} = \\ = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 40.38 \cdot 10^{-3} = 26.55 \text{ kVAr} \quad (14)$$

$$Q_{\text{nom}2} = \left(P_{\text{nom}2} \cdot \frac{\text{tg } \varphi_{\text{nom}2}}{\eta_{m\text{ nom}2}} \right) = \\ = \left(75 \cdot \frac{0.456}{0.93} \right) = 36.77 \text{ kVAr} \quad (15)$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta P_{xx2}^*}{100(1 - \eta_{m\text{ nom}2}) - \Delta P_{xx2}^*} = \\ = \frac{5.3}{100(1 - 0.93) - 5.3} = 1.7 \quad (16)$$

$$\Delta P_{\text{in}2} = P_{\text{nom}2} \frac{1 - \eta_{m\text{ nom}2}}{\eta_{m\text{ nom}2}} \cdot \frac{1}{1 + \gamma_2} = \\ = 75 \frac{1 - 0.93}{0.93} \cdot \frac{1}{1 + 1.7} = 2.09 \text{ kW} \quad (17)$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (Q_{xx2} (1 - k_{l2}^2) + k_{l2}^2 Q_{\text{nom}}) k_e + \\ + \Delta P_{xx2} + k_{l2}^2 \Delta P_{\text{in}2} \quad (18)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$k_{l2} = \frac{P_r}{P_{\text{nom2}}} = \frac{63}{75} = 0.84 \quad (19)$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (26.55(1 - 0.84^2) + 0.84^2 \cdot 36.77) \cdot 0.125 + 3.98 + 0.84^2 \cdot 2.09 = 9.69 \text{ kW}$$

Thus, after replacing the under-loaded motor 5AM250M2 at $k_{l1} = 0.7$ with the less powerful motor 5AM250S4 in the washing machine, we obtained the reduction of active power losses in the motor and the electricity network:

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 10.27 - 9.69 = 0.58 \text{ kW} \quad (20)$$

Similarly, we conducted the calculations and the analysis of active power loss reduction in the motor and the electricity network, if

$$k_{l1} = 0.65; 0.6; 0.55; 0.5$$

at $n = 3000 \text{ r.p.m.}; 1500 \text{ r.p.m.}; 1000 \text{ r.p.m.}; 750 \text{ r.p.m.}$

When choosing [3] the motor type which is the closest to the more powerful one relative to the real load P_r , it is necessary to provide:

$$k_{l2} = \frac{P_r}{P_{\text{nom2}}} \leq 0.9 \quad (21)$$

We obtained the following results for the motors at 3000 r.p.m.

When $k_{l1} = 0.65$: $P_r = 58.5 \text{ kW}$. The closest more powerful, than $P_r = 58.5 \text{ kW}$, is 5AM250S4 type motor (as when $k_{l1} = 0.7$).

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.65^2) + 0.65^2 \cdot 44.13) \cdot 0.125 + 4.73 + 0.65^2 \cdot 1.7 = 10.07 \text{ kW}$$

$$k_{l2} = 0.78$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (26.55(1 - 0.78^2) + 0.78^2 \cdot 36.77) \cdot 0.125 + 3.98 + 0.78^2 \cdot 2.09 = 8.69 \text{ kW}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 10.07 - 8.69 = 1.38 \text{ kW}$$

When $k_{l1} = 0.6$: $P_r = 54 \text{ kW}$.

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.6^2) + 0.6^2 \cdot 44.13) \cdot 0.125 + 4.73 + 0.6^2 \cdot 1.7 = 9.85 \text{ kW}$$

$$k_{l2} = 0.72$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (26.55(1 - 0.72^2) + 0.72^2 \cdot 36.77) \cdot 0.125 + 3.98 + 0.72^2 \cdot 2.09 = 8.37 \text{ kW}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 9.85 - 8.37 = 1.48 \text{ kW}$$

When $k_{l1} = 0.55$: $P_r = 49.5 \text{ kW}$. The closest more powerful motor is 5A225M2 type (55 kW, 3000 r.p.m.). Here it is ensured $k_{l2} = \frac{49.5}{55} = 0.9$.

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.55^2) + 0.55^2 \cdot 44.13) \cdot 0.125 + 4.73 + 0.55^2 \cdot 1.7 = 9.67 \text{ kW}$$

$\frac{I_{xx2}}{I_{\text{nom2}}} = 0.25$ (according to [7] we take this ratio as 0.25, which is the average value of this ratio for the power range 22.5 ... 110 kW and corresponds to the average power – 55 kW).

$$I_{xx2} = 24.8 \text{ A}; \Delta P_{xx2} = 2.45 \text{ kW}; \Delta P_{xx2}^* = 4.45 \%$$

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.55^2) + 0.55^2 \cdot 44.13) \times 0.125 + 4.73 + 0.55^2 \cdot 1.7 = 9.67 \text{ kW}$$

$$Q_{xx2} = 16.3 \text{ kVAr}; Q_{\text{nom2}} = 27.11 \text{ kVAr}; \gamma_2 = 1.46$$

$$\Delta P_{\text{in2}} = 1.83 \text{ kW}$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (16.3(1 - 0.9^2) + 0.9^2 \cdot 27.11) \times 0.125 + 2.45 + 0.9^2 \cdot 1.83 = 7.06 \text{ kW}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 9.67 - 7.06 = 2.61 \text{ kW}$$

When $k_{l1} = 0.5$: $P_r = 45 \text{ kW}$. The closest more powerful motor is 5A225M2 type. $k_{l2} = 0.82$.

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.5^2) + 0.5^2 \cdot 44.13) \times 0.125 + 4.73 + 0.5^2 \cdot 1.7 = 9.495 \text{ kW}$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (16.3(1 - 0.82^2) + 0.82^2 \cdot 27.11) \times \\ \times 0.125 + 2.45 + 0.82^2 \cdot 1.83 = 6.63 \text{ kW} \\ \Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 9.495 - 6.63 = 2.865 \text{ kW} .$$

Similarly, the following values of ΔP are obtained for AIR series motors at 1500 r.p.m.

For AIR series motors at 1000 r.p.m. we obtained the following.

For AIR series motors at 750 r.p.m. we obtained the following.

For illustration purposes we will show $\Delta P = f(k_{r1})$ in the form of Table 1.

The parameters listed in Table 1 are obtained for the types of electric motors shown in Table 2.

When $k_{r1} = 0.7$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.59 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.23 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.36 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.65$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.48 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.09 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.39 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.6$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.34 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 8.92 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.42 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.55$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.25 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7.415 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.835 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.5$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.128 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7.17 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.96 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.7$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.43 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.73 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.7 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.65$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.37 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.64 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.73 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.6$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.3 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.55 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.75 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.55$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.23 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 8.49 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.74 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.5$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.17 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 8.37 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.8 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.7$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 13.04 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 10.9 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.14 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.65$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 13.02 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 10.825 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.195 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.6$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 12.98 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.16 \text{ kW}$	$\Delta P = 3.82 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.55$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 12.86 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7.84 \text{ kW}$	$\Delta P = 5.02 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.5$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 12.87 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7.73 \text{ kW}$	$\Delta P = 5.09 \text{ kW}$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Table 1

Dependence $\Delta P = f(k_{rl})$					
3000 r.p.m.					
ΔP , kW	0.58	1.38	1.48	2.61	2.865
k_{rl}	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
1500 r.p.m.					
ΔP , kW	1.36	1.39	1.42	2.835	2.96
k_{rl}	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
1000 r.p.m.					
ΔP , kW	1.7	1.73	1.75	2.74	2.8
k_{rl}	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
750 r.p.m.					
ΔP , kW	2.14	2.195	3.82	5.02	5.09
k_{rl}	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5

Table 2

Types of motors, used during the research

3000 r.p.m.						
Electric motor type	5AM250M2	5AM250S4	5AM250S4	5AM250S4	5A225M2	5A225M2
k_{rl}	>0.7	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
1500 r.p.m.						
Electric motor type	5AM250M4	5AM250S4	5AM250S4	5AM250S4	5A225M4	5A225M4
k_{rl}	>0.7	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
1000 r.p.m.						
Electric motor type	AIR280M6	AIR280S6	AIR280S6	AIR280S6	AIR250M6	AIR250M6
k_{rl}	>0.7	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
750 r.p.m.						
Electric motor type	AIR315S8	AIR280M2	AIR280M2	AIR280M2	AIR280S8	AIR280S8
k_{rl}	>0.7	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5

Findings

After the performed calculations it was found that for AIR series electric motors, in case of reducing the load factor within the range $(0.4...0.5) \leq k_l \leq (0.7...0.75)$, active power loss reduction in the motor and the network after replacement of the under-loaded motor with the less powerful one ranges from 0.58 kW to 2.865 kW at initial motor power of 90 kW. The obtained numerical values of reduction of these losses can be used as source information when considering the feasibility of replacement of the motors within the specified range of the load values. When using the motors with the 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 and practical value

For the first time the paper outlines the issues of energy saving efficiency for the equipment with non-controlled electric drive by replacing the under-loaded motors with the less powerful ones, taking into account the peculiarities of their operation in a locomotive depot.

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 the electric losses and increasing the electric motors operation period.

Conclusions

1. The proposed method for determining the reduction of active power losses in the electric motor and the power supply network after replacing an under-loaded motor with a less powerful motor can be used during continuous mode operation of various machines at the railway rolling stock repair enterprises.

2. The obtained numerical values of reduction of these losses can be used as source information when considering the feasibility of replacement of the motors within the load factor range $0.5 < k_l < 0.7$.

3. When using the motors with the 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 $k_l \leq 0.55$.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вишне夫斯基, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вишне夫斯基. – Ленинград : Энергия, 1977. – 432 с.
2. ДСТУ 3886-99. Енергозбереження. Системи електроприводу. Метод аналізу та вибору. – Надано чинності 2000-07-01. – Київ : Держстандарт України, 2000. – 54 с.
3. Закладний, О. М. Енергозбереження засобами промислового електропривода / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. – Київ : Кондор, 2005. – 408 с.
4. Ильинский, Н. Ф. Энергосбережение в электроприводе / Н. Ф. Ильинский. – Москва : Высш. шк., 1989. – 127 с.
5. Кацман, М. М. Справочник по электрическим машинам / М. М. Кацман. – Москва : Академия, 2005. – 480 с.
6. 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.
7. К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 62–67.
8. 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.
9. Мамолапа, В. М. Энергосбережение в системах электропривода / В. М. Мамолапа. – Київ : Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. – 86 с.
10. 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.
11. Поточные линии ремонта локомотивов в депо / Н. И. Фильков, Е. Л. Дубинский, М. М. Майдель, И. Б. Стерлин. – Москва : Транспорт, 1983. – 302 с.
12. Предельно допустимые значения тока холостого хода для трехфазных асинхронных двигателей [Electronic resource]. – Available at: <http://granat-es.ru/2.-dopustimye-znacheniya-toka-holos-holos>. – Title from the screen. – Accessed : 09.09.2016.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

13. Родионов, В. Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего / В. Г. Родионов. – Москва : ЭНАС, 2010. – 352 с.
14. Сибикин, Ю. Д. Технология энергосбережения / М. Ю. Сибикин, Ю. Д. Сибикин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Форум, 2012. – 352 с.
15. Улучшение энергетических показателей предприятий по ремонту подвижного состава / Л. В. Дубинец, О. Л. Маренич, О. А. Карзова [и др.] // Гірничя електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. / ДВНЗ «НГУ». – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 90. – С. 144–150.
16. Электродвигатели АИР – технические характеристики [Electronic resource]. – Available at: electronpo.ru/production. – Title from the screen. – Accessed : 09.09.2016.
17. Hillmansen, S. Electric railway traction systems and techniques for energy saving / S. Hillmansen, R. Tllis // Proc. of IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems. – 2014. – P. 6. doi: 10.1049/cp.2014.1432.
18. 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. 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 витрат. 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 зби-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тки. 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

Л. В. ДУБИНЕЦ¹, О. Л. МАРЕНИЧ², А. Ю. БАЛИЙЧУК³, 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 $k_z \leq 0,55$. **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 моечной машины мощностью 90 кВт может быть заменен на двигатель мощностью 75 кВт при коэффициенте загрузки $k_z \leq 0,7$, 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 АІР

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.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

3. Zakladnyi O.M., Prakhovnyk A.V., Solovei O.I. *Enerhozberezhennia zasobamy promyslovoho elektropryvoda* [Energy saving by industrial electric drivers]. Kyiv, Kondor Publ., 2005. 408 p.
4. Ilinskiy N.F. *Energoberezheniye v elektroprivode* [Energy Saving in the motor driver]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 127 p.
5. Katsman M.M. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Handbook of electrical machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 480 p.
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. K teorii energoberezheniya sredstvami promyshlennogo elektropryvoda [To the theory of energy saving by means of industrial drive]. *Elektrotehnika – Electrotechnics*, 1999, no. 5, pp. 62-67.
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. Mamolapa V.M. *Energoberezheniye v sistemakh elektropryvoda* [Energy Saving in the motor driver systems]. Kiyev, Energeticheskii tsentr YES v Kiyeye Publ., 1995. 86 p.
10. Marenych O.L., Marenych O.O. Pidvyshchennia koefitsienta potuzhnosti elektrodvyhuniv 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.
11. 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.
12. *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://granat-es.ru/2.-dopustimyye-znacheniya-toka-holos> (Accessed 09 September 2016).
13. Rodionov V.G. *Energetika: problemy nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego* [Energy: Present questions and opportunities of the future]. Moscow, ENAS Publ., 2010. 352 p.
14. Sibikin Yu.D., Sibikin M.Yu. *Tekhnologiya energoberezheniya* [Energy saving technology]. Moscow, Forum Publ., 2012. 352 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.

Prof. F. P. Shkrabets, D. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. M. O. Kostin, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: May 27, 2016

Received: Sep. 15, 2016