

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.423.3:621.3.025

О. Ю. БАЛІЙЧУК^{1*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

ТЕРМІН СЛУЖБИ ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета. В роботі необхідно проаналізувати підвищення працездатності допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М при експлуатації в реальних умовах. **Методика.** Запропоновано інженерний метод із визначення відносного скорочення терміну служби асинхронних двигунів, обраних із певним проєктним запасом потужності, в нормальних експлуатаційних умовах та при зниженні показників якості живлячої електроенергії в бортових колах рухомого складу, що має місце при реальній експлуатації на ділянках Укрзалізниці. **Результати.** У результаті проведених автором досліджень встановлено, що тривала робота асинхронних двигунів, обраних із достатнім коефіцієнтом запасу потужності $k_z = 1,6$, при несиметрії живлячої напруги 16–20 % призводить до скорочення їх терміну служби на 9,5–33,2 % в залежності від типу двигуна. Цим доведено, що вибір допоміжних машин із більшим запасом потужності не є раціональним способом підвищення працездатності допоміжних машин на електропоїздах серії ЕР9М. Зроблені рекомендації стосовно впровадження симетро-компенсуючих та захисних пристроїв, побудованих на сучасній мікропроцесорній та мікроконтролерній елементній базі. Вони роблять неможливою роботу допоміжних машин при низькому рівні якості електричної енергії у бортових колах електропоїздів змінного струму в цілому та на електропоїздах серії ЕР9М зокрема. **Наукова новизна.** Вперше висвітлено питання аналітичного дослідження впливу якості живлячої енергії на термін служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М через визначення відносного скорочення терміну служби допоміжних машин (в залежності від температури загального перегріву). Враховано вплив коефіцієнту запасу потужності двигуна на середній перегрів та процес нагрівання електричних машин в цілому. **Практична значимість.** Отримані в ході досліджень результати дозволяють критично оцінити існуючий захист допоміжних машин електропоїздів змінного струму та розробити рекомендації щодо впровадження комплексу організаційно-технічних заходів із підвищення працездатності допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М.

Ключові слова: допоміжні машини; змінний струм; якість електричної енергії; термін служби; працездатність; коефіцієнт запасу

Вступ

Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення обумовлюються міждержавним стандартом ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в систе-

мах электроснабжения общего назначения» [4].

Аналіз спеціалізованих джерел виявив, що на сьогодні відсутні інші нормативні документи, якими б було обумовлено норми якості електричної енергії в колах власних потреб електрифікованого рухомого складу. Використання на рухомому складі як привідні двигуни допоміжних машин загальнопромислових асинх-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ронних двигунів типу АИР, АОМ та ін. дозволяє зробити висновок про можливість застосування вказаного стандарту для оцінки якості електричної енергії в системах допоміжних машин.

Термін служби – це показник довговічності і відповідно до [3] являє собою календарну тривалість експлуатації від початку експлуатації об'єкта або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан. Він є одним із багатьох показників надійності допоміжних електричних машин на рухомому складі [2]. Разом із цим надійність електричної машини це така її властивість виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників в заданих межах, що відповідають заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання транспортування. Надійність є комплексною властивістю, яка залежно від призначення машини і умов її експлуатації може містити в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, зберігаємість і працездатність [3].

Основним видом електродвигунів, що використовуються на електропоїздах змінного струму серії ЕР9М, є загальнопромислові асинхронні двигуни із короткозамкненим ротором [10]. Середній розрахунковий термін служби для таких двигунів складає не менше 15 років відповідно до [1], зазвичай 15–20 років.

Проте, значна кількість щорічних випадків заміни і капітальних ремонтів допоміжних машин говорить про те, що асинхронні двигуни не виробляють повністю свій проектний ресурс, їх термін служби складає менше 15 років.

Постає задача в оцінці впливу кількісних показників якості живлячої електричної енергії на термін служби асинхронного двигуна і розробці рекомендацій щодо вибору організаційно-технічних заходів з подовження терміну служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму.

Мета

Метою цієї праці є підвищення працездатності допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М під час роботи їх в реальних умовах експлуатації.

Методика

З точки зору на надійність і працездатність допоміжних електричних машин в системах електрорухомого складу змінного струму найбільш суттєвого впливу завдають:

- відхилення напруги δU_c (далі за текстом будемо позначати ΔU);
- коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} [4, 5, 6, 15].

Основними причинами скорочення терміну служби є пошкодження ізоляції обмоток статора АД. Ці ушкодження виникають внаслідок перегріву машини (температура перевищує гранично допустимі значення). Під впливом підвищеної температури з плином часу ізоляція старіє та втрачає свої властивості, що призводить до її пробію і відмови машини [11, 15, 16, 17].

В допоміжних машинах на електропоїздах змінного струму серії ЕР9М застосовується ізоляція класу В і F. Відповідно до [2] для цих класів нагрівостійкості ізоляції (нерухомих обмоток) передбачено такі гранично допустимі температури перегріву: В – 130 °С, F – 155° С, Н – 180 °С.

У разі перевищення допустимих температур термін служби ізоляції різко зменшується за складним логарифмічним законом. Незначне перевищення температури понад допустиме значення призводить до суттєвого скорочення терміну служби ізоляційних матеріалів [7, 12, 13, 17].

Таблиця 1

Table 1

Гранично допустимі температури перегріву для класів ізоляції відповідно до [2]

The maximum permissible overheating temperatures for isolation classes in accordance with [2]

| Вид ізоляції | Гранично допустимі температури перегріву відповідно до [2] | | |
|------------------|--|-----|-----|
| | В | F | Н |
| Нерухомі обмотки | 130 | 155 | 180 |

Причиною перевищення гранично допустимих температур ізоляції обмотки статора АД є не тільки перевантаження двигуна, в результаті чого збільшується струм, який споживає машина, а й якість живлячої її електричної енергії, зокрема несиметрія живлячої трифазної напруги та відхи-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

лення напруги від номінального значення [5, 6, 15, 16].

Для оцінки ступеня старіння ізоляції і відповідно скорочення терміну служби двигуна в [5, 6] застосовують поняття відносного скорочення терміну служби АД:

$$\Delta V_* \approx \beta \cdot \Delta \tau - \frac{1}{2} \beta^2 \cdot \Delta \tau^2 + \frac{1}{6} \beta^3 \cdot \Delta \tau^3, \quad (1)$$

де $\beta = \frac{\ln 2}{\Delta \theta} = \frac{0,693}{\Delta \theta}$ – коефіцієнт старіння ізоляції ($\Delta \theta$ для класу ізоляції В приймають рівним $\Delta \theta = 10^\circ \text{C}$); $\Delta \tau$ – додатковий нагрів АД.

Найбільше впливає на нагрівання обмоток статора АД серед всіх показників якості електричної енергії саме коефіцієнт несиметрії живлячої напруги [5, 6, 15, 16].

Додатковий нагрів від несиметрії живлячої напруги визначається із виразу:

$$\Delta \tau = \frac{2K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_1, \quad (2)$$

де K_{2U} – коефіцієнт зворотної послідовності напруги, %; θ_1 – середнє перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна.

На електропоїздах змінного струму серії ЕР9М як допоміжні машини застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором таких типів: для привода компресора – двигун ум. № 548; для привода насоса охоло-

дження трансформатора – 2ТТ 16/10-01, для привода вентиляторів пасажирських приміщень – АОМ 32-4; для привода вентилятора кабіни машиніста на головних вагонах – АОМ 22-2.

Використовуючи метод узагальненої теплової моделі [6, 16], розрахуємо середнє перевищення температури обмотки статора названих двигунів за умови їх роботи із номінальним навантаженням.

Результати розрахунку наведено в табл. 2.

Під час проектування рухомого складу рекомендують [8] обирати двигуни із запасом за потужністю 1,5...1,6. Таким чином вказані вище двигуни працюють із навантаженням меншим за номінальне і, відповідно при нормальних умовах повинні нагріватися в меншій мірі, у порівнянні із значеннями температур, наведеними в табл. 2. Перш за все це обумовлено тим, що коефіцієнт корисної дії двигуна, що працює, залежить від корисної механічної потужності на його валу. При малих навантаженнях ККД малий, а при більших – зростає [7, 9, 13, 14]. Відповідно змінюється чисельно величина втрат $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$.

Коефіцієнт навантаження являє собою відношення механічної потужності навантаження P_c до номінальної потужності двигуна $P_{ном}$, тобто $k_n = \frac{P_c}{P_{ном}}$.

Таблиця 2

Table 2

Результати розрахунку середнього перевищення температури обмотки статора асинхронних двигунів в номінальному режимі методом узагальненої теплової моделі

The calculation results of the temperature average excess of the stator winding of asynchronous motors in nominal mode by means of the generalized thermal model

| Тип двигуна | $P_{ном}$, кВт | $\eta_{ном}$ | D_{a1} , см | l_1 , см | R_{11} | ΔP_1 , Вт | R_{12} | ΔP_2 , Вт | R_{13} | ΔP_3 , Вт | θ_1 , °C |
|---------------|-----------------|--------------|---------------|------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|-----------------|
| ум. № 548 | 5 | 0,81 | 36,8 | 13,5 | 0,05 | 586,42 | 0,03 | 293,21 | 0,03 | 234,57 | 49,08 |
| 2 ТТ 16/10-01 | 0,8 | 0,7 | 15,3 | 9 | 0,20 | 488,89 | 0,12 | 244,44 | 0,12 | 195,56 | 51,76 |
| АОМ 32-4 | 1,5 | 0,7 | 14,5 | 9 | 0,21 | 321,43 | 0,12 | 160,71 | 0,12 | 128,57 | 102,41 |
| АОМ 22-2 | 1,0 | 0,81 | 12 | 8,5 | 0,26 | 117,28 | 0,16 | 58,64 | 0,16 | 46,91 | 47,81 |

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Максимальне значення коефіцієнта корисної дії [9] при даному коефіцієнті навантаження k_n знайдемо із виразу:

$$\eta = \frac{k_n \cdot P_{\text{НОМ}}}{k_n \cdot P_{\text{НОМ}} + K + K^2 \cdot V_{\text{НОМ}}}, \quad (3)$$

де $K = p_{\text{ст}} + p_{\text{мех}}$ – постійні втрати потужності в двигуні; $V_{\text{НОМ}} = p_{\text{мл}} + p_2$ – номінальні змінні втрати потужності в двигуні.

Коефіцієнт запасу за потужністю k_3 являє собою відношення номінальної потужності двигуна $P_{\text{НОМ}}$ до механічної потужності навантаження P_c , тобто $k_3 = \frac{P_{\text{НОМ}}}{P_c}$. Як видно, коефіцієнт запасу взаємообернена величина до коефіцієнта навантаження $k_n = \frac{1}{k_3}$, тому можемо навести вираз для визначення ККД у вигляді:

$$\eta = \frac{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{НОМ}}}{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{НОМ}} + K + \left(\frac{1}{k_3}\right)^2 \cdot V_{\text{НОМ}}}. \quad (4)$$

При зміні коефіцієнта запасу буде змінюватись коефіцієнт корисної дії двигуна.

За (4) оцінимо зміну ККД двигуна при роботі із запасом потужності. Результати досліджень наведено в табл. 3.

На рис. 1 наведено залежності $\eta = f(k_3)$ для допоміжних машин електропоїздів ЕР9М. Як видно з рис. 1. та табл. 3, при проектному запасі потужності $k_3 = 1,6$ коефіцієнт корисної дії двигунів збільшується на 2,49 % для двигуна АОМ 22-2, на 3,94 % – для двигуна АОМ 32-4; на 2,63 % – для двигуна ум. № 548; на 3,54 % – для двигуна електронасоса 2ТТ 16/10-01.

Це пояснюється тим, що для двигунів малої потужності максимальне значення ККД на робочій характеристиці розташоване лівіше точки номінального режиму [9, 13, 14]. Тому при зменшенні потужності механічного навантаження двигуна на 40 % відбувається збільшення його коефіцієнта корисної дії і зменшення втрат в двигуні.

Таблица 3

Table 3

Коефіцієнт корисної дії асинхронних двигунів при роботі їх із коефіцієнтом запасу за потужністю k_3

The efficiency of asynchronous motors during working with their coefficient of power reserve k_3

| k_3 | Тип двигуна | | | |
|-------|-------------|----------|-----------|-------------|
| | АОМ 22-2 | АОМ 32-4 | Ум. № 548 | 2ТТ16/10-01 |
| 1,0 | 0,81 | 0,7 | 0,8 | 0,73 |
| 1,1 | 0,8167 | 0,70919 | 0,80697 | 0,73861 |
| 1,2 | 0,82171 | 0,71611 | 0,81218 | 0,74509 |
| 1,3 | 0,82538 | 0,72122 | 0,81601 | 0,74986 |
| 1,4 | 0,82798 | 0,72485 | 0,81871 | 0,75324 |
| 1,5 | 0,82971 | 0,72727 | 0,82051 | 0,7555 |
| 1,6 | 0,83072 | 0,72869 | 0,82157 | 0,75682 |
| 1,7 | 0,83113 | 0,72928 | 0,822 | 0,75737 |
| 1,8 | 0,83105 | 0,72917 | 0,82192 | 0,75726 |
| 1,9 | 0,83056 | 0,72847 | 0,8214 | 0,75661 |
| 2,0 | 0,82971 | 0,72727 | 0,82051 | 0,7555 |

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Визначимо середнє перевищення температури обмоток статора асинхронних двигунів при врахуванні коефіцієнта запасу за потужністю $k_3 = 1,5 \dots 1,6$. Для цього знову скористаємося методом узагальненої теплової моделі [6, 16]. В розрахунок замість номінальних потужності і коефіцієнта корисної дії підставимо їх дійсні значення,

що відповідають даному коефіцієнту k_3 .

В табл. 4 наведено результати дослідження впливу коефіцієнта запасу за потужністю $k_3 = 1,5$, а в табл. 5 наведено результати дослідження впливу запасу потужності $k_3 = 1,6$.

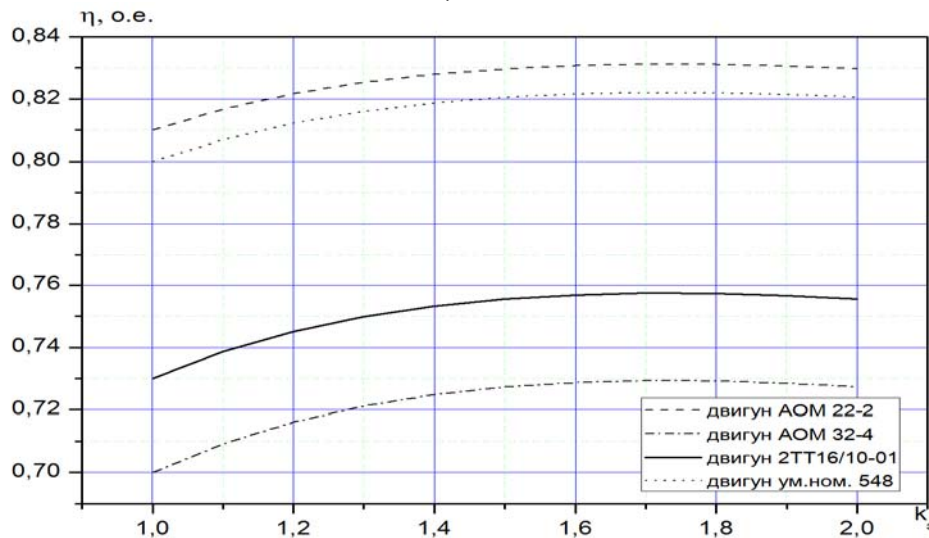


Рис. 1. Коефіцієнт корисної дії асинхронних двигунів при роботі їх із коефіцієнтом запасу за потужністю k_3

Fig. 1. The efficiency of induction motors during working with their coefficient of power reserve k_3

Таблиця 4

Table 4

Результати розрахунку середнього перевищення температури обмотки статора асинхронних двигунів при $k_3 = 1,5$

The calculation results of the temperature average excess of the stator winding of asynchronous motors when $k_3 = 1,5$

| Тип двигуна | P, кВт | η | ΔP ₁ , Вт | ΔP ₂ , Вт | ΔP ₃ , Вт | θ ₁ , °C |
|---------------|--------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| ум. № 548 | 3,3 | 0,82051 | 360,94 | 180,47 | 144,38 | 30,21 |
| 2 ТТ 16/10-01 | 0,533 | 0,7555 | 86,25 | 43,12 | 34,50 | 26,04 |
| АОМ 32-4 | 1,0 | 0,72727 | 187,5 | 93,75 | 75 | 59,74 |
| АОМ 22-2 | 0,67 | 0,82971 | 68,76 | 34,38 | 27,50 | 28,03 |

Таблиця 5

Table 5

Результати розрахунку середнього перевищення температури обмотки статора асинхронних двигунів при $k_3 = 1,6$

The calculation results of the temperature average excess of the stator winding of asynchronous motors when $k_3 = 1,6$

| Тип двигуна | P, кВт | η | ΔP_1 , Вт | ΔP_2 , Вт | ΔP_3 , Вт | θ_1 , °C |
|------------------|--------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| ум. № 548 | 3,125 | 0,82157 | 360,94 | 180,47 | 144,38 | 28,40 |
| 2 ТТ 16/10-01 | 0,5 | 0,75682 | 86,25 | 43,12 | 34,50 | 24,26 |
| АОМ 32-4 | 0,94 | 0,72869 | 187,5 | 93,75 | 75 | 55,76 |
| АОМ 22-2 | 0,625 | 0,83072 | 68,76 | 34,38 | 27,50 | 25,96 |

Для порівняння ступеня нагріву допоміжних машин електропоїзда ЕР9М наведемо на рис. 2 гістограми середніх перевищень температур обмоток статора для кожного двигуна при трьох режимах навантаження ($k_3 = 1$; $k_3 = 1,5$; $k_3 = 1,6$).

Як видно з рис. 2, при збільшенні запасу потужності двигуна до $k_3 = 1,6$ перегрів його обмотки зменшується в 1,89 разу порівняно з режимом номінального навантаження, коли $k_3 = 1$.

Для допоміжних машин, що живляться від асинхронного фазорозщеплювача, на електропо-

їздах змінного струму серії ЕР9М в процесі експлуатації цілком нормальним є наявність несиметрії живлячої напруги більшої за гранично допустимі значення. Значення коефіцієнта несиметрії може досягати 10...20 % [16]. При таких значеннях коефіцієнта несиметрії можливим є значний перегрів обмоток статора навіть на двигунах, обраних із запасом потужності.

Визначимо додатковий нагрів обмотки статора асинхронних двигунів, обраних із запасом потужності, від несиметрії живлячої напруги.

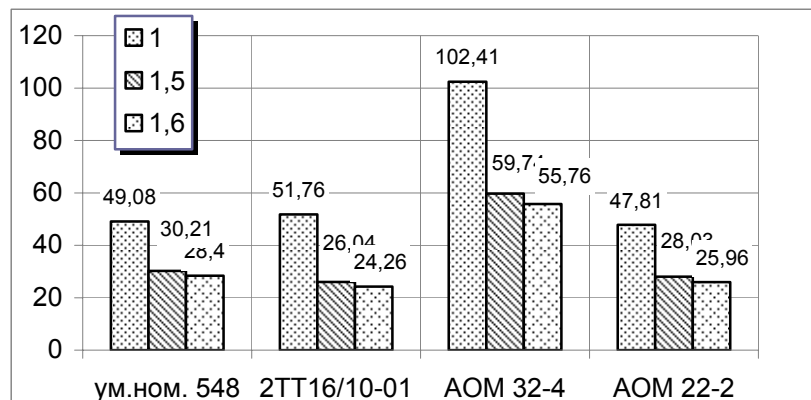


Рис. 2. Порівняння температур перегріву допоміжних машин електропоїзда ЕР9М для різних режимів навантаження

Fig. 2. Comparison of overheating temperature of auxiliary machines of electric ER9M for different load modes

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

При цьому основні припущення, на яких базується метод узагальненої теплової моделі, дозволяють розглядати складні явища теплових процесів, що відбуваються в асинхронних двигунах, як більш прості окремі, а їх результуючу дію можна оцінити, застосувавши метод накладення. Тоді, сумарний перегрів обмоток статора допоміжних машин електропоїзда ЕР9М отримуємо додаванням до кожного значення додаткового перегріву із табл. 6 значення середнього перегріву обмоток асинхронних двигунів, отриманих раніше (див. табл. 5). Результуючий перегрів наведено в табл. 7.

Варто розуміти, що навіть значне зниження якості живлячої енергії не зможе стати причиною миттєвого виходу з ладу допоміжних машин. Лише тривалий період роботи

цих машин, який можна порівняти із часом, що потрібний для досягнення всіма тепловими процесами в машині усталеного стану, в мережі з низькою якістю електричної енергії призводить до теплового старіння ізоляційних матеріалів і, відповідно, скорочення строку її служби.

Як видно з табл. 7, можливим є такий режим живлення допоміжних машин електропоїздів змінного струму, коли температура перегріву частин двигунів перевищить гранично допустимі межі, які наведено в табл. 1. Причому для всіх розглянутих двигунів, крім двигуна типу АОМ 32-4 такий режим настає при коефіцієнті несиметрії живлячої напруги 12 %, а для двигуна АОМ 32-4, гранична межа настає вже при 6 %.

Таблиця 6

Table 6

Додатковий перегрів °С асинхронних двигунів із $k_3 = 1,6$ від несиметрії живлячої напруги

Additional overheating °C of asynchronous motors with $k_3 = 1,6$ from the supply voltage asymmetry

| Тип електродвигуна | Коефіцієнт несиметрії, % | | | | | |
|--------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| ум. № 548 | 0 | 2,272146 | 9,088584 | 20,44931 | 36,35433 | 56,80365 |
| 2ТТ-16/10-01 | 0 | 1,94051 | 7,762038 | 17,46459 | 31,04815 | 48,51274 |
| АОМ 32-4 | 0 | 4,460513 | 17,84205 | 40,14462 | 71,36821 | 111,5128 |
| АОМ 22-2 | 0 | 2,076707 | 8,30683 | 18,69037 | 33,22732 | 51,91768 |

Закінчення табл. 6

End of Table 6

| Тип електродвигуна | Коефіцієнт несиметрії, % | | | | |
|--------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| ум. № 548 | 81,79725 | 111,3351 | 145,4173 | 184,0438 | 227,2146 |
| 2ТТ-16/10-01 | 69,85835 | 95,08497 | 124,1926 | 157,1813 | 194,051 |
| АОМ 32-4 | 160,5785 | 218,5651 | 285,4728 | 361,3016 | 446,0513 |
| АОМ 22-2 | 74,76147 | 101,7587 | 132,9093 | 168,2133 | 207,6707 |

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Таблиця 7

Table 7

Результуючий перегрів °C асинхронних двигунів із $k_3 = 1,6$
The resulting overheating °C of asynchronous motors with $k_3 = 1,6$

| Тип електродвигуна | Коефіцієнт несиметрії, % | | | | | |
|--------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| ум. № 548 | 28,40182 | 30,67397 | 37,49041 | 48,85114 | 64,75616 | 85,20547 |
| 2ТТ-16/10-01 | 24,25637 | 26,19688 | 32,01841 | 41,72096 | 55,30452 | 72,76911 |
| АОМ 32-4 | 55,75641 | 60,21693 | 73,59846 | 95,90103 | 127,1246 | 167,2692 |
| АОМ 22-2 | 25,95884 | 28,03555 | 34,26567 | 44,64921 | 59,18616 | 77,87653 |

Закінчення табл. 7

End of Table 7

| Тип електродвигуна | Коефіцієнт несиметрії, % | | | | |
|--------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| ум. № 548 | 110,1991 | 139,737 | 173,8192 | 212,4456 | 255,6164 |
| 2ТТ-16/10-01 | 94,11472 | 119,3413 | 148,449 | 181,4376 | 218,3073 |
| АОМ 32-4 | 216,3349 | 274,3215 | 341,2292 | 417,058 | 501,8077 |
| АОМ 22-2 | 100,7203 | 127,7175 | 158,8681 | 194,1721 | 233,6296 |

Таблиця 8

Table 8

Відносне скорочення терміну служби АД при роботі в мережі з високою несиметрією живлячої напруги

Relative reduction of the AM service life at operation in networks with high asymmetry of the supply voltage

| Тип електродвигуна | Коефіцієнт несиметрії, % | | | | | |
|--------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| ум. № 548 | 1,526622 | 1,678752 | 2,135141 | 2,89579 | 3,960698 | 5,329866 |
| 2ТТ-16/10-01 | 1,249066 | 1,378992 | 1,768768 | 2,418394 | 3,327871 | 4,497199 |
| АОМ 32-4 | 3,358127 | 3,656778 | 4,552728 | 6,045979 | 8,13653 | 10,82438 |
| АОМ 22-2 | 1,363054 | 1,502098 | 1,919231 | 2,614453 | 3,587763 | 4,839162 |

Закінчення табл. 8

End of Table 8

| Тип електродвигуна | Коефіцієнт несиметрії, % | | | | |
|--------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| ум. № 548 | 7,003294 | 8,980981 | 11,26293 | 13,84913 | 16,7396 |
| 2ТТ-16/10-01 | 5,926378 | 7,615407 | 9,564286 | 11,77302 | 14,2416 |
| АОМ 32-4 | 14,10953 | 17,99199 | 22,47174 | 27,54879 | 33,22315 |
| АОМ 22-2 | 6,36865 | 8,176226 | 10,26189 | 12,62564 | 15,26749 |

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

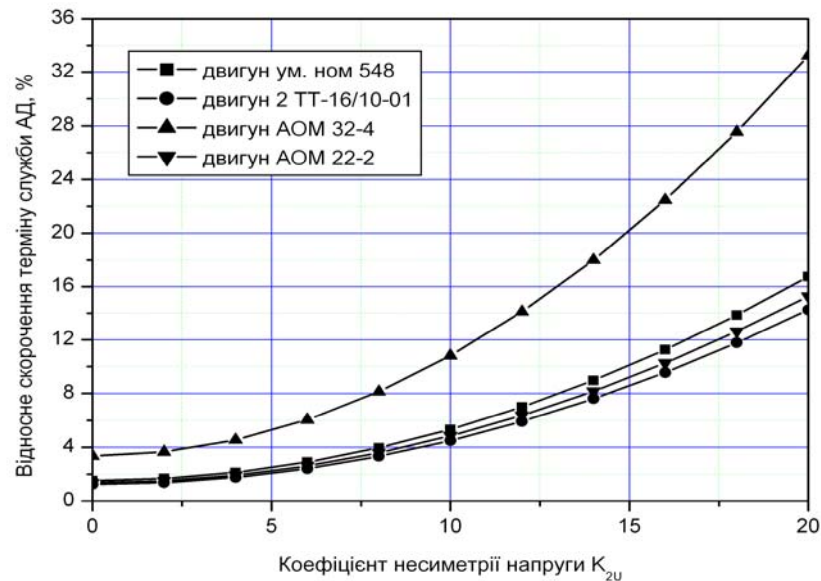


Рис. 3. Залежність відносного скорочення терміну служби АД від коефіцієнта несиметрії напруги

Fig. 3. The dependence of relative reduction of the AM service life from high asymmetry of the supply voltage

Результати

Отримавши значення результуючого перегріву асинхронних двигунів, можна оцінити ступінь старіння ізоляції АД залежно від величини коефіцієнта несиметрії живлячої двигун напруги. Для цього скористаємося виразом (1). В табл. 8 наведемо результати розрахунку відносного скорочення терміну служби двигунів.

За даними табл. 8 побудуємо графічну залежність між відносним скороченням терміну служби допоміжних машин та коефіцієнтом несиметрії живлячої напруги для всіх асинхронних двигунів електропоїзда ЕР9М.

Як видно з рис. 3, тривала робота асинхронних двигунів при несиметрії живлячої напруги 16...20 % призводить до скорочення їх терміну служби на 9,5...33,2 % залежно від типу двигуна, що для класу ізоляції В становитиме в роках 1,5...5,3 років при гарантованому проектному терміні служби ізоляції 16 років.

Варто зазначити, що відхилення напруги також завдає помітного впливу на тепловий стан допоміжних машин і за певних умов, коли значення коефіцієнта несиметрії буде високим (більше 10–12 %), а напруга в контактній мережі

знизиться до мінімально допустимого значення 19 кВ, цілком можливим є те, що результуючий перегрів обмоток може бути більший за той, що отриманий в табл. 7.

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано метод оцінки скорочення терміну служби асинхронних допоміжних машин електропоїздів змінного струму, який дозволяє врахувати особливості умов реальної експлуатації на рухомому складі та проектний коефіцієнт запасу двигунів за потужністю.

Висновки

Збільшення запасу за потужністю двигунів не можна розглядати як єдиний і достатній спосіб по захисту двигунів від негативного впливу низької якості живлячої електроенергії. На електрорухомому складі, де якість живлячої електричної енергії в бортових колах відрізняється низьким рівнем, потрібно застосовувати симетро-компенсуючі і захисні пристрої, які унеможливають роботу допоміжних машин при низьких рівнях якості живлячої енергії. Комплексний підхід до вибору оптимального запаса

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

су потужності допоміжних машин та впровадження сучасних систем захисту дозволить вирішити питання передчасного виходу з ладу допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- ГОСТ 19523-74. Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые серии 4А мощностью от 0,06 до 400 кВт. Общие технические условия. – Введ. 1975–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1980. – 44 с.
- ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – Введ. 1983–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 36 с.
- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 1989–15–11. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. – 24 с.
- ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах энергоснабжения общего назначения. Введ. 1999–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 33 с.
- Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – Москва : Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко [и др.] – Москва : Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
- Кацман, М. М. Электрические машины : учеб. для студ. сред. профессион. учебн. заведений / М. М. Кацман. – Москва : Высш. шк., 2001. – 463 с.
- Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – Москва : Транспорт, 1987. – 536 с.
- Москаленко, В. В. Электрический привод : учебн. для студ. высш. учебн. заведений / В. В. Москаленко. – Москва : Академия, 2007. – 368 с.
- Муха, А. М. Аналіз роботи допоміжних електричних машин електропоїздів залізниць України / А. М. Муха, О. Ю. Балійчук, І. Є. Скогарев // Зб. наук. пр. Донецьк. ін-ту залізн. трансп. Українськ. держ. акад. залізн. трансп. – 2014. – № 37. – С.143–150.
- Устименко, Д. В. Аналіз впливу зміни режиму роботи на ступінь нагріву ізоляції обмотки якоря електродвигуна поршневого компресора / Д. В. Устименко, Р. В. Краснов, А. В. Мазур // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 138–141.
- An acoustic diagnostic technique for use with electric machine insulation / Y.-S. Lee, J. K. Nelson, H. A. Scarton [et al.] // Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions. – 1994. – № 6. – P. 1186–1193. doi: 10.1109/94.368645.
- Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Third Edition / P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, S. Pekarek. – Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2013. – 680 p. doi: 10.1109/9780470544167.
- Bose, B. K. Modern Power Electronics and AC Drives / B. K. Bose. – New Jersey : Prentice Hall, 2001. – 736 p. doi: 10.1109/9780470545553.
- IEEE Std 112-2004. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. Approved 9 February 2004. – New York : IEEE, 2004. – 87 p.
- Influence of feeding electric energy quality on heating of the auxiliary machines of AC electric rolling stock / O. Yu. Baliichuk, L. V. Dubynets, O. M. Dukhnovskiy [et al.] // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 3 (51). – С. 34–41. doi: 10.15802/stp2014/25800.
- The influence of temperature and electric field frequency on the dielectric properties of electrical machines insulation systems / S. A. Busoi, P. V. Notingher, L. M. Dumitran, G. Tanasescu // Proc. of Intern. Symp. on Electrical and Electronics Eng. ISEEE (16.10.–8.10.2010). – Galati : Romania, 2010. – P. 5–9. doi: 10.1109/iseee.2010.-5628478.

А. Ю. БАЛИЙЧУК^{1*}

^{1*}Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

СРОК СЛУЖБЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель. В работе необходимо проанализировать повышение работоспособности вспомогательных машин электропоездов переменного тока серии ЭР9М при эксплуатации в реальных условиях. **Методика.** Предложен инженерный метод определения относительного сокращения срока службы асинхронных двигателей, выбранных с определенным проектным запасом мощности, в нормальных эксплуатационных условиях и при снижении показателей качества питающей электроэнергии в бортовых цепях подвижного состава, которое имеет место при реальной эксплуатации на участках Укрзалізничці. **Результаты.** В результате проведенных автором исследований установлено, что длительная работа асинхронных двигателей, выбранных с достаточным коэффициентом запаса мощности $k_s = 1,6$, при несимметрии питающего напряжения 16–20 % приводит к сокращению их срока службы на 9,5–33, 2 % в зависимости от типа двигателя. Этим доказано, что выбор вспомогательных машин с большим запасом мощности не является рациональным способом повышения работоспособности вспомогательных машин на электропоездах серии ЭР9М. Сделаны рекомендации по внедрению симметро-компенсирующих и защитных устройств, построенных на современной микропроцессорной и микроконтроллерной элементной базе. Они делают невозможной работу вспомогательных машин при низком уровне качества электрической энергии в бортовых цепях электропоездов переменного тока в целом, и на электропоездах серии ЭР9М в частности. **Научная новизна.** Впервые освещены вопросы аналитического исследования влияния качества питающей энергии на срок службы вспомогательных машин электропоездов переменного тока серии ЭР9М через определение относительного сокращения срока службы вспомогательных машин (в зависимости от температуры общего перегрева). Учтено влияние коэффициента запаса мощности двигателя на средний перегрев и процесс нагревания электрических машин в целом. **Практическая значимость.** Полученные в ходе исследований результаты позволяют критически оценить существующую защиту вспомогательных машин электропоездов переменного тока и разработать рекомендации по внедрению комплекса организационно-технических мероприятий по повышению работоспособности вспомогательных машин электропоездов переменного тока серии ЭР9М.

Ключевые слова: вспомогательные машины; переменный ток; качество электрической энергии; срок службы; работоспособность; коэффициент запаса

O. YU. BALIICHUK^{1*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanic», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

LIFETIME OF AUXILIARY MACHINES OF AC ELECTRIC TRAINS

Purpose. In this paper it is necessary to analyze increase the efficiency of auxiliary machines of AC electric trains, series ER 9M during operating under the real conditions. **Methodology.** An engineering method to determine the relative reduction of the lifetime of asynchronous motors, selected with a certain design factor of power reserve, under normal operating conditions and with decrease of the electric power supply quality in auxiliary circuits of rolling stock, which takes place in real operation in sections of Ukrzaliznytsia was proposed. **Findings.** As a result of a study, conducted by the author it was found that long-term operation of asynchronous motors, selected with a sufficient reserve of power $k_s = 1,6$, when the supply voltage unbalance is 16 ... 20% leads to a reduction of their lifetime on 9,5...33,2%, depending on the type of motors. It proves that the choice of auxiliary machines with a large margin of power is not a rational way to increase the efficiency of auxiliary machines of electric trains, series ER9M. Recommendations were suggested for the introductions of symmetry-balancing and protective devices based on modern microprocessor and microcontroller hardware components. They make impossible operation of auxiliary

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

machines during a low level of electric energy quality in onboard electric circuits of AC electric train in general, and on the trains, series ER9M in particular. **Originality.** The issues of the analytical study of the energy supply quality effect on the lifetime of auxiliary machines of AC electric trains, series ER9M through the determination of the relative reduction of the lifetime of auxiliary machines, depending on the general overheating temperature were highlighted firstly. The effect of safety factor for motor capacity on the average overheating and on the heating process of electrical machines on the whole was taken into consideration. **Practical value.** Obtained results allow forming critical opinion about the existing protection of auxiliary machines of AC electric train and develop recommendations for the implementation of complex organizational and technical measures to improve operability of auxiliary machines of AC electric trains, series ER 9M.

Keywords: auxiliary machines; alternating current; power quality; service life; operability; safety factor

REFERENCES

1. *GOST 19523-74. Dvigateli trekhfaznyye asinkhronnyye korotkozamknutyie serii 4A moshchnostyu ot 0,06 do 400 kVt. Obshchiye tekhnicheskkiye usloviya* [State Standard 19523-74. 3-phase asynchronous squirrel-cage motors, series 4A, power from 0,06 to 400 kw. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1980. 44 p.
2. *GOST 2582–81. Mashiny elektricheskkiye vrashchayushchiesya tyagovyye. Obshchiye tekhnicheskkiye usloviya* [State Standard 2582 – 81. Traction rotating electrical machines. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 36 p.
3. *GOST 27.002-89. Nadezhnost v tekhnike. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [State Standard 27.002-89. Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 1990. 24 p.
4. *GOST 13109–97. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh energosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109–97. Electrical energy. Compatibility of technical equipment. Quality standards of electrical energy in power systems of general purpose]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 33 p.
5. Zhezhenko I.V., Sayenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Power quality indexes and their control at the industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p.
6. Zhezhenko I.V., Sayenko Yu.L., Baranenko T.K., Gorpinich A.V., Nesterovich V.V. *Izbrannyye voprosy nesinusoidalnykh rezhimov v elektricheskikh setyakh predpriyatiy* [Selected problems of non-sinusoidal regimes in electrical networks of enterprises]. Moscow, Enerhoatomyzdat Publ., 2007. 294 p.
7. Katsman M.M. *Elektricheskkiye mashiny* [Electrical machinery]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2001. 463 p.
8. Kurbasov A.S., Sedov V.I., Sorin L.N. *Proektirovaniye tyagovykh elektrodvigatelye* [Design of traction motors]. Moscow, Transport Publ., 1987. 536 p.
9. Moskalenko V.V. *Elektricheskyy privod* [Electric drive]. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 368 p.
10. Mukha A.M., Baliichuk O.Yu., Skohariiev I.Ye. *Analiz roboty dopomizhnykh elektrychnykh mashyn elektroizdiv zaliznyts Ukrainy* [Analysis of the auxiliary electric machines at electric railways of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu* [Bulletin of Donetsk Institute of Railway Transport of Ukrainian State Academy of Railway Transport], 2014, issue 37, pp. 143-150.
11. Ustyomenko D.V., Krasnov R.V., Mazur A.V. *Analiz vplyvu zminy rezhymu roboty na stupin nahrivu izoliatsii obmotky yakoria elektrodvyhuna porshnevoho kompressora* [Analysis of influence of change of office hours on degree of heating of isolation of puttee of anchor of electric motor of piston compressor]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 138-141.
12. Lee Y.-S., Nelson J.K., Scarton H.A. et al. An acoustic diagnostic technique for use with electric machine insulation. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions*, 1994, no. 6, pp. 1186-1193. doi: 10.1109/94.368645.
13. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Second Edition.* Hoboken, Wiley-IEEE Press Publ., 2002. 632 p. doi: 10.1109/9780470544167.
14. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives.* New Jersey, Prentice Hall Publ., 2001. 736 p. doi: 10.1109/9780470545553.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

15. IEEE Std 112-2004. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. Approved 9 February 2004. New York, IEEE Publ., 2004. 87 p.
16. Baliichuk O.Yu., Dubynets L.V., Dukhnovskyi O.M., Marenych O.O., Marenych O.L. Influence of feeding electric energy quality on heating of the auxiliary machines of ac electric rolling stock. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 3 (51), pp. 34-41. doi : 10.15802/stp2014/25800.
17. Busoi S.A., Notingher P.V., Dumitran L.M., Tanasescu G. The influence of temperature and electric field frequency on the dielectric properties of electrical machines insulation systems. Proc. of Intern. Symp. on Electrical and Electronics Eng. ISEEE (16.10.-18.10.2010), Galati, Romania, 2010, pp. 5-9. doi: 10.1109/iseee.2010.5628478.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Л. В. Дубинцем (Україна), д.т.н. проф. С. І. Випанасенком (Україна)

Надійшла до редколегії: 28.01.2015

Прийнята до друку: 16.03.2015