

УДК 628.144.2:62-824

Шмельов Ю.М.

Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету

Чорна В.О.

Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету

Мельник О.Є.

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Харитонов О.С.

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Ляхова О.В.

Політехнічний коледж ДВНЗ «Криворізький національний університет»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ НА РЕСУРС ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

Розглянуто найбільш значущі причини передчасного виходу з ладу тягових електричних двигунів промислових електровозів. Проведено аналіз залежності терміну служби ізоляції двигуна від перевищення температури ізоляції певного класу вище допустимих значень. З урахуванням місць пошкоджень двигунів складена математична модель для досліджень ступеня впливу навантаження і температурного чинника на тяговий двигун промислового електротехнічного комплексу. Проведені дослідження показали, що найбільш уразливим вузлом тягового двигуна є обмотка якоря. Моделювання показало, що зміна струму двигуна і ступеня нагріву його обмоток впливають на зниження терміну служби двигуна, причому значною мірою якірної обмотки. Підвищення швидкості обертання валу двигуна збільшує вібрацію, яка впливає на механічну частину двигуна.

Ключові слова: тяговий двигун, якір, температура, ресурс, ізоляція, моделювання.

Постановка проблеми. Електротехнічний комплекс (ЕТК) тягового рухомого складу гірничодобувних підприємств складається зі значної кількості взаємопов'язаних та взаємозалежних елементів. Працездатність будь-якого з компонентів впливає на режими функціонування та рівень надійності всього комплексу. Навіть незначні відхилення параметрів електрообладнання можуть стати причиною порушень режимів роботи електротехнічного комплексу, що відіб'ється на ході технологічного процесу видобутку корисних копалин.

Найбільш навантаженою та водночас найбільш вразливою складовою частиною електротехнічного комплексу є тягові двигуни [1]. Від надійності тягових електричних двигунів (далі – ТЕД) залежить ефективність функціонування всього комплексу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі В.О. Чорної [1] представлені результати аналізу причин відмов ТЕД, з яких видно, що низька тепловіддача двигунів «закритого» типу викликає перегрів обмотки якоря, тобто є основною причиною виходу їх з ладу.

У статті Р.М. Девлікамова [2] представлені результати досліджень надійності колекторно-щіткового вузла ТЕД постійного струму магістрального електрорухомого складу та способи її підвищення.

А.С. Космодам'янським [3] запропонована математична модель системи охолодження ТЕД постійного струму локомотива.

У роботі «Надежность тягового подвижного состава» [4] наведені результати досліджень надійності ТЕД магістральних електровозів, що свідчать про вплив температури та швидкості нагріву ізоляції на пробій ізоляції обмотки двигуна.

Постановка завдання. Мета статті – дослідження на математичній моделі впливу зміни температури нагріву обмоток та навантаження на ресурс тягового електричного двигуна.

Виклад основного матеріалу дослідження. Великі навантаження та часті пуски ТЕД ЕТК призводять до нагрівання якірних обмоток і теплового руйнування ізоляції. Нерівномірність розподілу повітря всередині двигуна, розбіжність швидкісних

характеристик двигунів ЕТК, що паралельно працюють, призводять до нерівномірного перегріву обмоток якоря і полюсних котушок [5].

У разі перевищення допустимої температури обмоток ТЕД, їх ізоляція стає жорсткою і крихкою, і значною мірою втрачає електричну міцність. Якщо обмотки перегріваються, летючі речовини з ізоляційних матеріалів швидко випаровуються, що призводить до утворення тріщин, розшарувань і пористості.

Однією з основних особливостей теплових перехідних процесів в електричних машинах є їхня інерційність, що виражається в значному відставанні змін температури від електро механічних перехідних процесів. Завдяки цьому машини можуть витримувати протягом деякого часу вплив перевантажень, струмів короткого замикання та інших нештатних режимів. Облік теплової інерційності в розрахунках нестационарного нагріву є обов'язковою умовою достовірності результатів [6].

Підвищена температура обмоток викликає теплове старіння ізоляції, що приводить до необоротного зниження електричної і механічної міцності. Задля оцінки впливу підвищеної температури на термін служби ізоляції двигуна використовується правило Монтзингера [7]:

$$D_{\vartheta} = A_0 2^{-\vartheta/\Delta\vartheta}, \quad (1)$$

де A_0 – термін служби ізоляції певного класу при постійній температурі ϑ (°C), років; $\Delta\vartheta$ – постійна величина збільшення температури, при якій термін служби ТЕД зменшується вдвічі.

Згідно з правилом Монтзингера, $\Delta\vartheta = 5 \dots 10^\circ\text{C}$, а при $\Delta\vartheta = 8^\circ\text{C}$ формула (1) приймає вигляд:

$$D_{\vartheta} = A_0 2^{-\vartheta/\Delta\vartheta} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{8}\vartheta} = A_0 e^{-0,0866\vartheta}.$$

У графічному вигляді для ізоляції класу F, яка характерна для ТЕД постійного струму ЕТК рухомого складу, ця залежність представляється кривою, зображеною на рис. 1.

З рисунку видно, що підвищення температури з 130 до 138°C спричиняє скорочення терміну її служби з 16 до 8 років, а нагрів до 155°C – до двох років. В основі цього явища лежить загальний закон залежності швидкості хімічних реакцій від температури, описуваний рівнянням Вант-Гоффа [8].

Слід зазначити, що це правило недоцільно використовувати в межах низьких температур через те, що при температурі 90°C і нижче старіння ізоляції відбувається в основному не через хімічні перетворення, а з інших причин, як-от вібрація тощо [6].

Серед наявних засобів та методів оцінки технічного стану електричних двигунів більшість базується на визначенні стану ізоляції обмоток. Діагностування тягового двигуна доцільно здійснювати за станом ізоляції головних полюсів та обмоток якоря.

Рівняння, що описує залежність терміну служби ізоляції, має такий вигляд:

$$R = L_{0я} 2^{-\frac{\vartheta}{\Delta\vartheta_я}} + L_{0п} 2^{-\frac{\vartheta}{\Delta\vartheta_п}} + L_B 2^{-\frac{L}{L_0}}, \quad (2)$$

де R – термін служби ізоляції при незмінній температурі;

$L_{0я}$, $L_{0п}$ – термін служби ізоляції обмоток якоря та головних полюсів при навколишній температурі 20°C;

L_B – термін служби машини щодо вібрації;

ϑ – встановлена незмінна підтримувана температура;

$\Delta\vartheta_я$, $\Delta\vartheta_п$ – постійна величина збільшення температури, при якій термін служби ізоляції обмотки якоря та полюсів зменшується вдвічі;

L – віброприскорення;

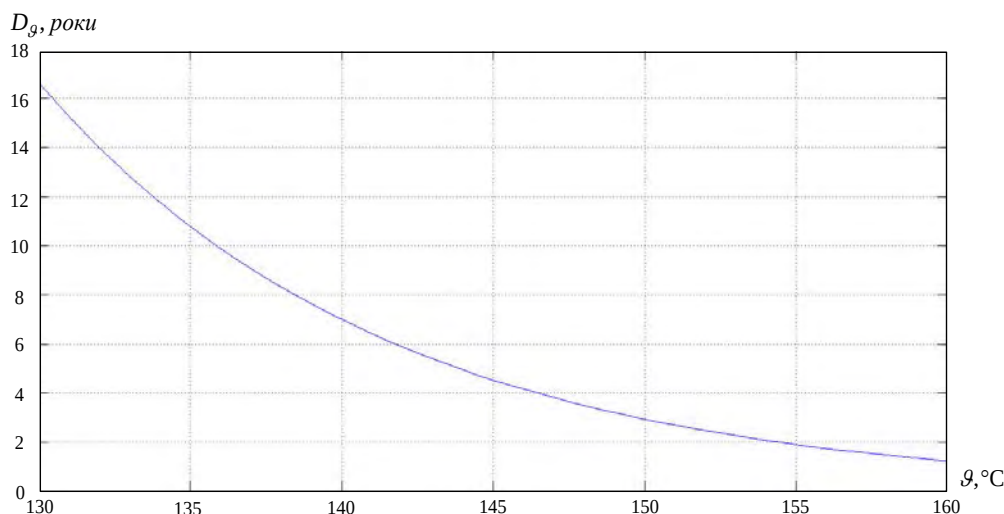


Рис. 1. Залежність терміну служби ізоляції від температури

L_0 – постійна величина віброприскорення [9; 10].

Перегрів якоря визначається таким виразом [7]:

$$\Delta\vartheta_{\text{я}} = \vartheta'_n + \vartheta'_{\text{в.л.}} - \vartheta_{\text{кл.із.}}, \quad (3)$$

де ϑ'_n – температура перегріву міді обмотки якоря;

$\vartheta'_{\text{в.л.}}$ – температура вентилязованого повітря;

$\vartheta_{\text{кл.із.}}$ – температура перегріву відповідного класу ізоляції.

Перегрів полюсів розраховується за виразом [7]:

$$\Delta\vartheta_n = \vartheta''_n + \vartheta_{\text{в.л.}} - \vartheta_{\text{н.с.}}, \quad (4)$$

де ϑ''_n – температура перегріву міді обмотки полюсів.

Базові параметри для визначення перегріву якоря та полюсів є конструктивними параметрами

двигуна, які визначається згідно з працею «Проектирование электрических машин» [11].

Об'єктом дослідження було вибрано ТЕД типу ДТН-45 із потужністю годинного режиму 45 кВт. Дослідження ресурсу двигуна проводиться на математичній моделі, структурна схема якої показана на рис. 2, виконаній у програмному пакеті «Mathlab». Математична модель складається з таких блоків: визначення втрат на перемагнічування та перегрів (Subsystem), частоти та тепловіддачі (Subsystem 3), ресурсу якоря (Subsystem 4), ресурсу полюсів (Subsystem 5), вібрації (Subsystem 6).

Під час моделювання не було враховано вплив запиленості, якості попередньо проведених ремонтів та деяких інших зовнішніх факторів на ресурс ТЕД.

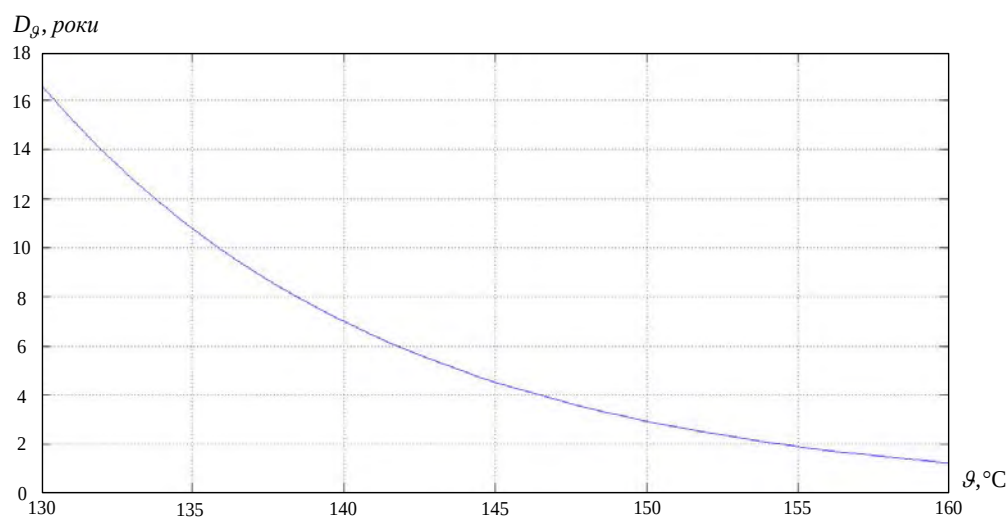


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі визначення залишкового ресурсу тягового електродвигуна

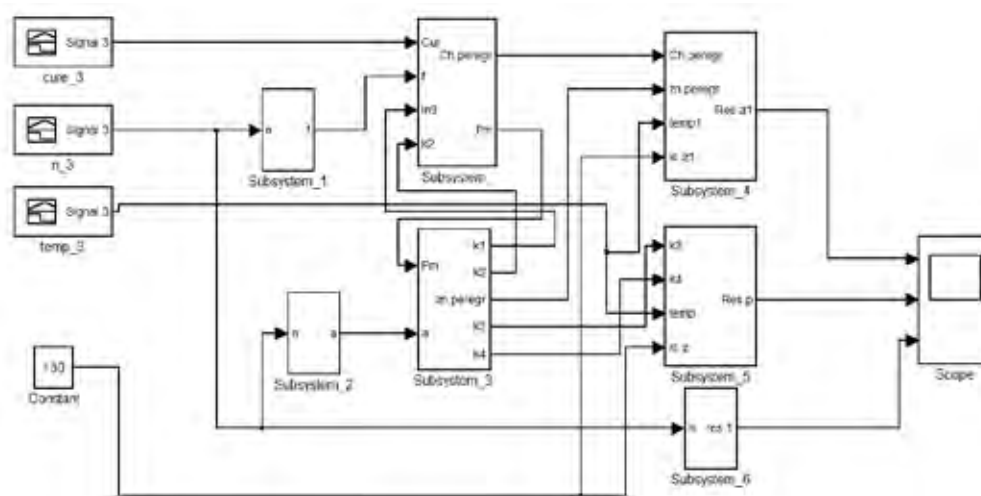


Рис. 3. Залежність ресурсу якоря, полюсів та вібрації від температури

На рисунках 3–5 представлені отримані залежності ресурсу двигуна від температури обмоток, струму, вібрації.

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що при підвищенні температури обмоток та струму двигуна ресурс ізоляції якоря та головних полюсів зменшується з різною інтенсивністю, що в подальшому призводить до виходу їх із ладу через термічне старіння ізоляції, що викликає її пробій. Якщо підвищуються оберти двигуна, збільшується вібрація, яка безпосередньо впливає на надійність підшипникового, колекторно-щіткового вузлів та інших механічних складників двигуна.

Отримані дані дають змогу дійти таких висновків. При збільшенні температури обмоток на 80°C порівняно максимально допустимої величини для цього класу ізоляції ресурс якоря знижується в 2,5 рази, а полюсів – в 1,5 рази. Збільшення температури спричиняє зменшення ресурсу двигуна, при цьому ресурс якоря зменшується суттєвіше, ніж полюсів. У разі перевищення температури обмоток на 350°C термін служби якоря зменшується майже в 7 разів щодо нормального режиму функціонування.

При збільшенні струму двигуна порівняно номінальної величини спостерігається значне зменшення ресурсу якоря та полюсів. Так, зі збільшенням струму на 5,5% термін служби якоря зменшується в 4 рази, а полюсів – в 2 рази. При збільшенні струму на 12% ресурс якоря та полюсів зменшується, відповідно, в 8,5 та 4 рази.

Як свідчать результати моделювання, зміна жодного з досліджуваних параметрів не впливає суттєво на рівень вібрації. Максимальна зміна вібрації, що зареєстрована в результаті моделювання, становить 1,5% у разі збільшення кількості обертів двигуна на 5%.

Таким чином, можна узагальнити результати досліджень: ресурс обмоток якоря та полюсів двигуна зменшується при збільшенні струму швидше, аніж при збільшенні самої температури. Також із графіків видно, що найбільш вразливим вузлом двигуна є обмотка якоря.

Висновки.

1. У процесі аналізу результатів попередніх досліджень встановлені причини виходу з ладу ТЕД ЕТК.

2. Проаналізована методика оцінки ресурсу ізоляції ТЕД та на її основі розроблена математична

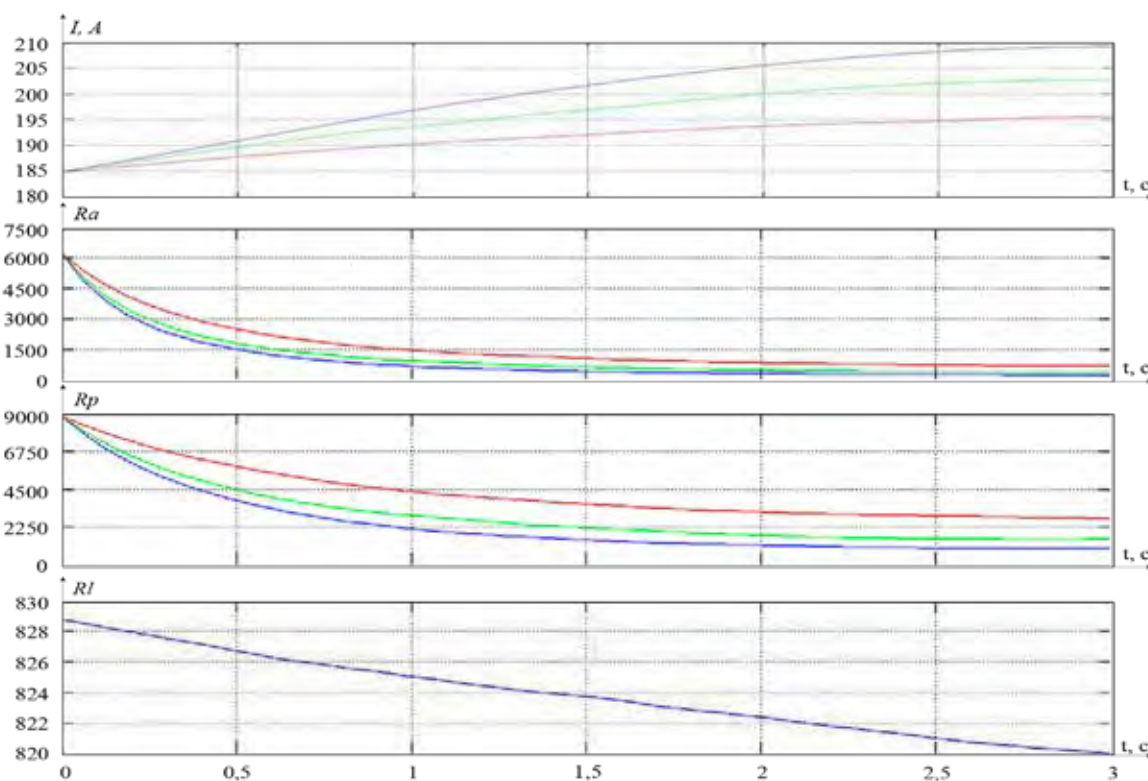


Рис. 4. Залежність ресурсу якоря, полюсів та вібрації від струму двигуна

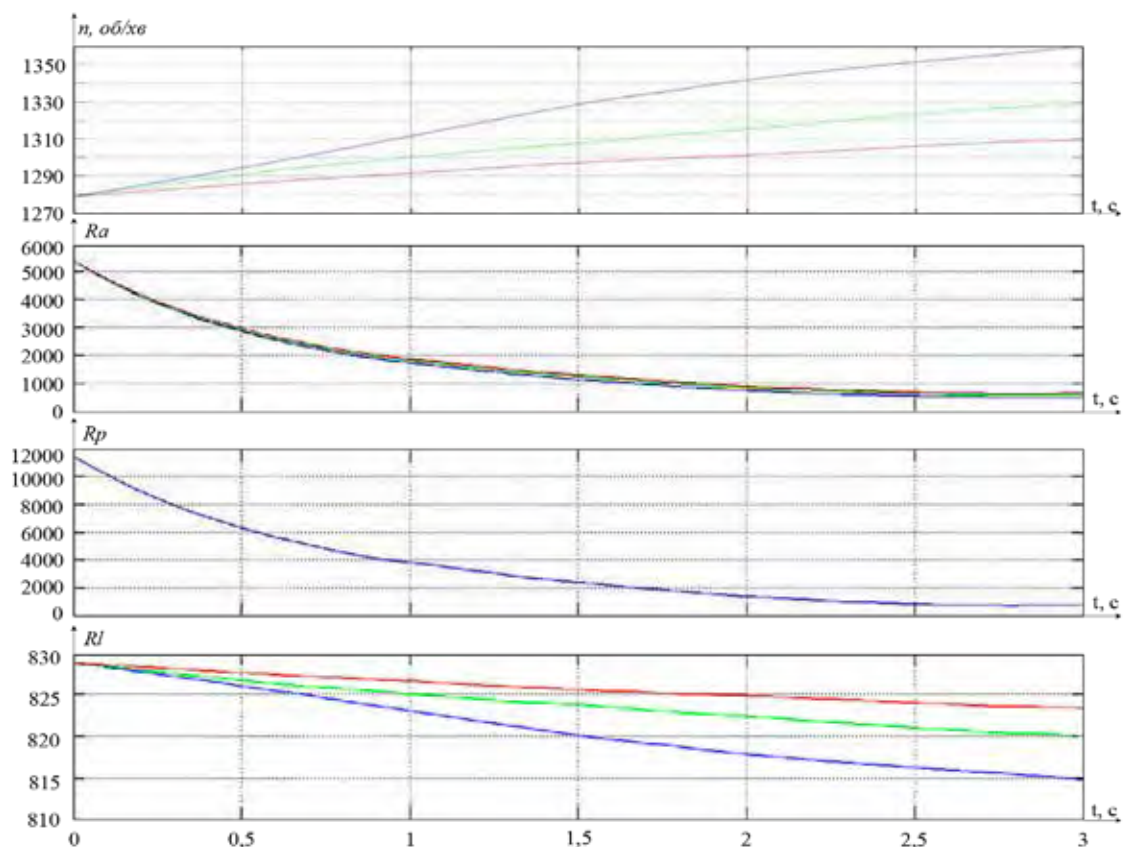


Рис. 5. Залежність ресурсу якоря, полюсів та вібрації від швидкості обертання двигуна

модель для досліджень залишкового ресурсу двигуна при зміні температури обмоток та навантаження.

3. Результати моделювання свідчать про те, що найбільш вразливим елементом тягового двигуна постійного струму є обмотка якоря, вплив високих струмів та температури значно скорочує ресурс цього вузла. У разі збільшення темпера-

тури обмоток на 80°C вдвічі знижується ресурс якоря. У разі збільшення струму на 12% термін служби обмотки якоря зменшується в 8 разів.

4. Відхилення температури повітря та струму двигуна від номінального значення найменше впливає на вібрацію. Підвищена вібрація спостерігається у разі збільшення частоти обертів вала двигуна.

Список літератури:

1. Черная В.О. К вопросу анализа повреждений тяговых двигателей шахтных электровозов. *Молодь : наука та інновації* : праці 1 Всеукр. наук.-техн. конф., Дніпропетровськ, 3–4 грудня 2013 р. Дніпропетровськ, 2013. С. 421–422.
2. Девликамов Р.М. Прогнозирование искрения в щеточном контакте коллекторной электрической машины и оценка ее коммутационной надежности. *Известия Вузов. Электромеханика*. 2007. № 1. С. 20–22.
3. Космодамианский А.С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.22.07. Москва, 2002. 36 с.
4. Надежность тягового подвижного состава. *Региональный центр инновационных технологий*. URL: <http://rcit.su/techinfoD9.html> (дата звернення: 23.03.2019).
5. Кузнецов Н.Л. Надійність електричних машин: навч. посібник. Москва: МЕІ, 2006. 432 с.
6. Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математичні моделі та системи технічної діагностики основних електротехнічних систем міських трамваїв : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 126 с.
7. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. Москва – Ленинград : Госэнегроиздат, 1961. 264 с.

8. Киреев В.А. Курс физической химии. Москва : Химия, 1975. 776 с.
9. Иоффе А.Б. Тяговые электрические машины. Москва, 1967. 248 с.
10. Тюков В.А., Честюнина Т.В., Бухгольц Ю.Г. Теплопередача, вентиляционные и тепловые расчеты в электромеханике : учебное пособие. Новосибирск : НГТУ, 2013. 248 с.
11. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. Москва : Высшая школа, 2005. 767 с.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НА РЕСУРС ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрены наиболее значимые причины преждевременного выхода из строя тяговых электрических двигателей промышленных электровозов. Проведен анализ зависимости срока службы изоляции двигателя от превышения температуры изоляции определенного класса выше допустимых значений. С учетом мест повреждений двигателей составлена математическая модель для исследований степени влияния нагрузки и температурного фактора на тяговый двигатель промышленного электротехнического комплекса. Проведенные исследования показали, что наиболее уязвимым узлом тягового двигателя является обмотка якоря. Моделирование показало, что изменение тока двигателя и степени нагрева его обмоток влияют на снижение срока службы двигателя, причем в значительной степени якорной обмотки. Повышение скорости вращения вала двигателя увеличивает вибрацию, которая оказывает влияние на механическую часть двигателя.

Ключевые слова: тяговый двигатель, якорь, температура, ресурс, изоляция, моделирование.

RESEARCH INFLUENCE OF OPERATING MODES ON THE RESOURCE OF THE ELECTRIC DRIVE ENGINE

The most significant reasons for the premature failure of traction electric engines of industrial electric locomotives are considered. The analysis of the service life of the insulation of the engine from the temperature of the insulation of a certain class above the permissible values. Taking into account the places of engine damage, a mathematical model has been compiled for studying the degree of influence of the load and temperature factor on the traction engine of an industrial electrical complex. Studies have shown that the most vulnerable node of the traction motor is the armature winding. Simulations has shown that a change in the motor current and the degree of heating of its windings affect the reduction of the service life of the motor; with a significant degree of anchor winding. Increasing the speed of rotation of the motor shaft increases vibration, which affects the mechanical part of the engine.

Key words: traction motor, rotor temperature, resource, insulation, simulation.