

УДК 629.423.31

**МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ
МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

Д-р техн. наук А. П. Фалендиш, О. Б. Коломієць, інж. І. Р. Вихопень,
канд. техн. наук С. М. Тихонравов

**МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Д-р техн. наук А. П. Фалендыш, О. Б. Коломиец, инж. И. Р. Выхопень,
канд. техн. наук С. Н. Тихонравов

**MODEL OF TECHNICAL EVALUATION TRACTION ENGINES OF MOTOR-WAGON
ROLLING STOCK**

Ph.D. prof. A. P. Falendysh, O. B. Kolomiets, I. R. Vihopen,
cand. of techn. sciences S. M. Tykhonravov

У даній статті надано опис моделі діагностування технічного стану основних вузлів тягових електродвигунів моторвагонного рухомого складу на основі інформаційно-статистичного методу контролю складних систем. Приведено перелік основних параметрів контролю стану систем тягового двигуна, допустимі значення їх величин. Представлено алгоритм розрахунку на основі даних, отриманих під час діагностування, наведено формули та пояснення до них.

Ключові слова: діагностування, технічний стан, тяговий двигун, моторвагонний рухомий склад.

В данной статье представлено описание модели диагностирования технического состояния основных узлов тяговых электродвигателей мотор-вагонного подвижного состава на основе информационно-статистического метода контроля сложных систем. Приведен перечень основных параметров контроля состояния систем тягового двигателя, допустимые значения их величин. Представлен алгоритм расчета на основе данных, полученных во время диагностирования, приведены формулы и пояснения к ним.

Ключевые слова: диагностирование, техническое состояние, тяговый двигатель, моторвагонный подвижной состав.

This article presents the description of the proposed model of diagnosing the technical condition of the basic units of the traction motors on the example of multiple units. Traction motor is one of the nodes, which is subjected to the greatest effects of various factors occurring during operation. Dynamic loads of interaction with irregularities in the way environmental influences (weather conditions) - the factors, as a result of which, the traction motors are often the causes of the long downtime of the rolling stock for repairs. Timely detection, and most importantly the ability to predict the future technical condition, is a major diagnostic challenge.

Based on the structural features of the structure of the traction motors implemented grouping parameters undergoing diagnosis. Grouping is performed on the main engine system, such as the skeleton, and the magnetic system; anchor bearings, I brush collector node anchor. A list of the specific parameters of the diagnosis are presented in tabular form indicating the limit values of these parameters in accordance with the rules of repair of traction motors railcar rolling stock.

When checking the technical condition of the traction motor system as a whole as the main task solved in the course of work on the model is to determine the optimal deflection areas of diagnosed parameters according to one of the two states, which may be the traction motor.

Running diagnostics traction motor is based on information and statistical method of controlling complex systems. To do this, given the probabilistic - graphical model ties deviation parameters, states, and presented to the calculation of the conditional entropy.

Using the rules of algebra of events given in the text is built randomly oriented graph illustrating the way of occurrence of those or other variations depending on the received initial diagnosis parameters, which in turn are grouped on the main traction motor systems.

To assess the state of the traction motor is applied entropy evaluation method. The basic concepts and formulas for the calculation, detailed explanation of the calculation algorithm.

In order to test the present model of diagnosing the technical condition of the traction motors multiple units, calculations were carried out to assess the condition of the engines of the RT-51 electric railcar depot ER9 electric trainset Odessa-Zastav-1.

Implemented conclusions regarding the material presented above, and presented to them in the main text of the article.

Keywords: *diagnostics, technical condition, traction motor, multiple unit.*

Вступ. Тягові електродвигуни є одними з елементів тягового рухомого складу (ТРС), що найбільше піддається впливу шкідливих факторів, що виникають під час експлуатації. Фізичні та динамічні навантаження, вплив різноманітних факторів природного і технічного характеру – все це жорстко позначається на їх технічному стані. Незважаючи на інтенсивні пошуки методів удосконалення конструкції самих тягових двигунів, конструкції їх установки та реалізації передачі сили тяги з якоря на колісну пару, вони залишаються одними з елементів, що найчастіше виходять з ладу. Одним із шляхів вирішення даної проблеми може стати розроблення і впровадження новітніх методів технічного діагностування.

Технічна діагностика – сфера знань, що охоплює теорію, методи і засоби визначення технічного стану об'єктів. Сам же процес діагностування являє собою комплекс заходів (алгоритм розрахунку), спрямований на визначення технічного стану об'єкта діагностики. Завданнями технічного діагностування є контроль технічного стану; пошук місця і визначення причин відмови (несправності); прогнозування технічного стану [1].

Застосування різноманітних методів діагностики стану вузлів та агрегатів на залізничному транспорті є важливою складовою процесу вдосконалення галузі в цілому. Тому необхідно розробити нові, сучасні методи проведення технічного діагностування тягових електричних двигунів електропоїздів, які будуть враховувати як їх конструкцію, так і сучасні засоби діагностування. Це дозволить значною мірою зменшити витрати на експлуатацію та обслуговування тягових двигунів і тягового рухомого складу в цілому.

Мета статті. Метою статті є розроблення моделі оцінки технічного стану тягових двигунів моторвагонного рухомого складу, яка буде враховувати як конструкцію двигунів, так і сучасні засоби діагностування їх.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Висока актуальність теми розроблення нових, сучасних методів діагностики рухомого складу і його складових до і після проведення ремонту та випробувань яскраво підтверджується наявністю великої кількості статей і наукових праць, представлених у періодичних виданнях технічного

характеру [2-11]. Немаловажне значення діагностування тягових двигунів, як основних вузлів рухомого складу, має при проведенні приймальних, експлуатаційних і сертифікаційних випробувань ТРС та виборі системи його експлуатації [2-5].

Аналіз робіт з діагностування тягових двигунів показав, що одними з запропонованих варіантів методів діагностики є діагностування їх стану на основі спектрального аналізу. Так, за даною схемою пропонується виконання діагностування стану ізоляції тягових двигунів електровозів за допомогою наноінтерферометричних оптоволоконних датчиків. Увагу загострено на параметрі нагріву ізоляції обмоток магнітної системи остова тягового двигуна. Виходячи з представлених даних експлуатації, пошкодження обмоток є однією з основних причин виходу з ладу тягових двигунів [6].

Іншим із шляхів застосування спектрального аналізу є метод діагностування магнітної системи та колекторно-щіткового апарату тягових двигунів на основі двошарової розпізнавальної системи. Також даний метод пропонується до застосування при контролі стану колісномоторних блоків [7].

Для спрощення процесу діагностування за рахунок скорочення кількості параметрів, які потрібно відслідковувати, пропонуються універсальні параметри, які б відображували увесь технічний стан тягового двигуна в комплексі. Як варіант, запропоновано використання частоти обертів вала якоря тягового двигуна, а саме порівняння нерівномірності його обертання [8].

Не менш значними є результати з досліджень стану обмоток тягових двигунів під час проведення випробувань методом взаємного навантаження. На основі них висунуто пропозиції щодо вдосконалення методу проведення випробування [9-11,14]. З метою підвищення надійності роботи

тягових двигунів електропоїздів запропоновано виконання модернізації конструкції якорних обмоток. В основному це стосується модернізації ізоляції обмоток, застосування новітніх ізоляційних матеріалів [11]. Але питанням систематизації усіх запропонованих методів з діагностування тягових двигунів приділяється недостатньо уваги. Тому розроблення моделі оцінки технічного стану тягових двигунів електропоїздів в умовах моторвагонного депо з урахуванням сучасної виміральної техніки є завданням своєчасним та актуальним.

Виклад матеріалу. Тяговий електродвигун моторвагонного рухомого складу, як об'єкт контролю й діагностування, являє собою складну електромеханічну систему, яка не піддається опису формалізованими методами. У тяговому двигуні (тд) можна виділити такі основні вузли (рис. 1): остов і магнітна система (ос); якорні підшипники (яп); якор (я); щіткоколекторний вузол (щк) [12].

У свою чергу в тяговому двигуні експертним методом на основі нормативно-технічної документації по двигуну виділено основні параметри його контролю X_i (табл. 1). При цьому тяговий двигун і його вузли можуть знаходитись у двох станах: справному $s_{1\text{тд}i}$ або несправному $s_{2\text{тд}i}$.

Введемо коефіцієнт відхилення отриманого параметра від нормативного $d_{\text{тд}xi}$, який будемо розраховувати за формулою

$$d_{\text{тд}xi} = d_{\text{тд} \text{замір} \text{ } xi} / d_{\text{тд} \text{норм} \text{ } xi} \quad (1)$$

де $d_{\text{тд} \text{замір} \text{ } xi}$ – значення i -го параметра, яке визначено під час контролю тягового двигуна;

$d_{\text{тд} \text{норм} \text{ } xi}$ - нормативне значення i -го параметра контролю.

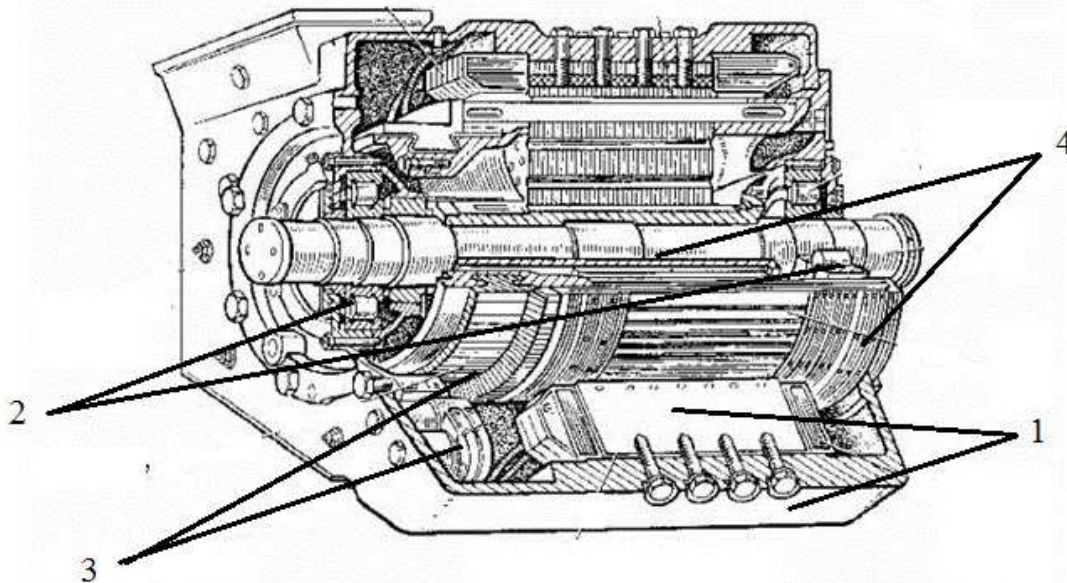


Рис. 1. Загальний вигляд тягового двигуна:
 1 – остов і магнітна система; 2- якірні підшипники;
 3 – щіткоколекторний вузол; 4 – якір

Таблиця 1

Основні параметри контролю тягового двигуна

Вузол тягового двигуна	Позначення параметра	Параметр контролю тягового двигуна	Позначення коефіцієнта відхилення параметра	Нормативне значення параметра
1	2	3	4	5
<i>Остов і магнітна система, d_{oc}</i>	X1	Знос носиків остова	$d_{тдх1}$	2-2,5
	X2	Знос моторно-осьової горловини	$d_{тдх2}$	210-213,5
	X3	Натяг МОП	$d_{тдх3}$	0,-0,25
	X4	Зазор між МОП і шийкою	$d_{тдх4}$	0,4
	X5	Осьовий розбіг ТЕД	$d_{тдх5}$	
	X6	Зазор під головними полюсами	$d_{тдх6}$	3,8-4,3
	X7	Зазор під додатковими полюсами	$d_{тдх7}$	3,5-4,2
	X8	Опір обмоток ТЕД	$d_{тдх8}$	1,1
<i>Якірні підшипники, $d_{яп}$</i>	X9	Радіальний зазор підшипника: з боку колектора	$d_{тдх9}$	0,14-0,25
	X10	з боку щіток	$d_{тдх10}$	0,11-0,25
	X11	Овальність гнізд посадки зовнішніх кілець	$d_{тдх11}$	0,1
	X12	Овальність горловини під підшипниковий щит	$d_{тдх12}$	0,1

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Якір, $d_{я}$	X13	Овальність і биття шийки під якірним підшипником	$d_{ТДХ13}$	0,1
	X14	Осьовий розбіг якоря	$d_{ТДХ14}$	0,2-1,0
	X15	Опір ізоляції	$d_{ТДХ15}$	1,0
	X16	Міжвиткові замикання	$d_{ТДХ16}$	0
Щітково-колекторний вузол, $d_{щк}$	X17	Діаметр колектора	$d_{ТДХ17}$	465
	X18	Глибина продоріжки міканіту	$d_{ТДХ18}$	1-1,5
	X19	Натиск на щітку	$d_{ТДХ19}$	20-25
	X20	Висота щіток	$d_{ТДХ20}$	25-50
	X21	Зазор між щіткою та щіткотримачем по товщині	$d_{ТДХ21}$	0,072-0,4
	X22	Зазор між щіткою та щіткотримачем по ширині	$d_{ТДХ22}$	0,11-0,9
	X23	Глибина виробітки колектора	$d_{ТДХ23}$	Більше 0,5
	X24	Биття колектора	$d_{ТДХ24}$	Більше 2
	X25	Відхил щіток від нейтралі	$d_{ТДХ25}$	0,5

При контролі технічного стану тягового двигуна в цілому головне завдання полягає у визначенні оптимальних областей A_i ($i=0, n$) у просторі ознак x_i , відповідних одному з двох станів $s_{1Тді}$ чи $s_{2Тді}$, у яких може знаходитись тяговий двигун. При знаходженні вектора X в області A_0 робиться висновок про працездатність двигуна, а при виході вектора за межі A_0 ухвалюється гіпотеза про несправність окремих вузлів або його в цілому. Встановлення оптимальної границі припустимих областей A_0 і існування окремих гіпотез необхідно проводити за одним з прийнятих критеріїв якості: середньої втрати від неправильних рішень, середньої вартості і тривалості контролю та ін.

Виконувати діагностування тягового двигуна будемо на основі інформаційно-статистичного методу контролю складних систем, взявши за основу положення в роботі [13]. Для цього будемо імовірісно-графічну модель зв'язків відхилення параметрів, станів і розраховуємо їх умовну ентропію. Приймаючи за вершини події вихідного стану s_{im0} події відхилення

параметрів d_{m0xi} і станів основних вузлів двигуна d_{m0yj} , а за спрямовані дуги - події цих змін d_{m0dxi} і $d_{m0dxiyj}$, одержимо орієнтований випадковий граф (рис. 2), де кожній незалежній події d_{m0dxi} і $d_{m0dxiyj}$ привласнюється ймовірність його здійснення p_{dxi} і p_{dxiyj} . Кожна з цих імовірностей визначається на основі статистичного матеріалу, отриманого шляхом систематичного нагромадження результатів контролю параметрів тягових двигунів.

Користуючись правилами алгебри подій, можна виразити d_{m0xi} і d_{m0yj} через можливі шляхи до них з вихідного стану s_d . Як видно з графа, події d_{m0xi} можуть бути як простими, так і складними, а події d_{m0yj} , як правило, складними. Кожний з можливих шляхів з вершини s_d у вершину d_{m0yj} представляється як логічний добуток елементарних шляхів між суміжними вершинами, тобто $L_{gyj} = d_{m0dxi} d_{m0dxiyj}$, а вираження складної події – у вигляді суми

$$d_{m0yi} = \sum_{g=1}^k L_{gyj}.$$

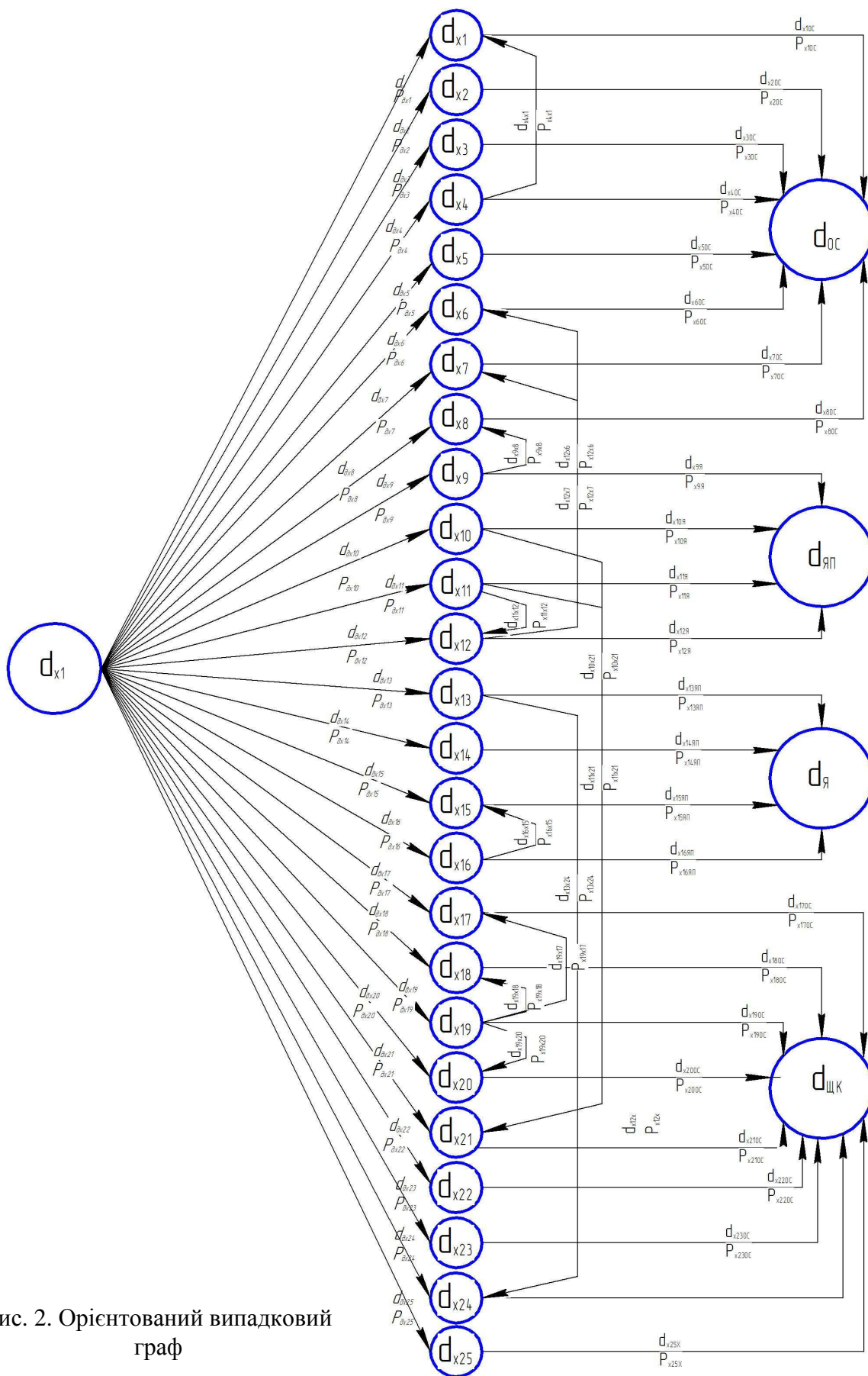


Рис. 2. Орієнтований випадковий граф

При комбінації відхилень параметрів $T_{xi\psi}^{yj}$ ($\psi \in \{1, 2^n\}$) складні події відхилення стану вузлів тягового двигуна також можуть спостерігатися в комбінаціях

$T_{xi\xi}^{yj}$ ($\xi \in \{1, 2^n\}$) станів двигуна, яких може бути будь-скільки. Для тягового двигуна кількість комбінацій по його основних вузлах подана в табл. 2.

Таблиця 2

Комбінації відхилень понад установлений допуск по вузлах двигуна

Вузол двигуна	Кількість параметрів діагностування	Кількість комбінацій відхилень понад установлений допуск
Остов і магнітна система	8	256
Якірні підшипники	4	16
Якір	4	16
Щіткоколекторний вузол	9	512

Для ентропійної оцінки стану тягового двигуна умовні ймовірності комбінацій відхилення параметрів $T_{xi\psi}^{yj}$ по отриманих при контролю комбінаціях відхилення стану вузлів $T_{yj\xi}$ визначаємо за формулою

$$P \cdot \left(\frac{T_{xi\psi}^{yj}}{T_{yj\xi}} \right) = \frac{P \cdot (T_{xi\psi}^{yj} \cdot T_{yj\xi})}{P \cdot (T_{yj\xi})}. \quad (2)$$

Ймовірності комбінацій подій $T_{xi\psi}^{yj}$ і $T_{yj\xi}$ визначаються через ймовірності окремих подій, зазначених на графі (рис. 2), за відомими формулами теорії ймовірностей.

$$E \cdot \left(\frac{T_{xi\psi}^{yj}}{T_{yj\xi}} \right) = - \sum_{\psi=1}^n \sum_{\xi=1}^m P \cdot \left(\frac{T_{xi\psi}^{yj}}{T_{yj\xi}} \right) \log_2 P \cdot \left(\frac{T_{xi\psi}^{yj}}{T_{yj\xi}} \right). \quad (3)$$

Ентропія служить кількісним заходом неупорядкованої деградації окремих вузлів або тягового двигуна в цілому і дає як кількісну оцінку технічного стану двигуна, так і якісну характеристику системи контролю й діагностування.

У складних системах, таких як ТЕД, вираження комбінацій подій $T_{xi\psi}^{yj}$, $T_{yj\xi}$ і $T_{yj\xi}$ для тягового двигуна отримуємо шляхом складання й перетворення матриці суміжності. Для цього процесу був розроблений відповідний алгоритм, написана програма в середовищі MatCad і зроблені відповідні розрахунки. Отримані значення умовної ймовірності комбінацій відхилення параметрів несуть інформацію про найбільш імовірні несправності й параметричні відмови у вузлах тягового двигуна.

Умовну ентропію, яка являє собою інтегральну оцінку рівня технічного стану тягового двигуна, розраховуємо за формулою

За даною моделлю були зроблені розрахунки з оцінки технічного стану тягових двигунів РТ-51 електропоїздів ЕР9 моторвагонного депо Одеса-Застава-1. Результати розрахунків в основному підтвердили задані міжремонтні пробіги

електропоїздів між ПР-3 по ремонту тягових двигунів.

Викладене дозволяє зробити такі висновки:

1. Класифікація методів контролю й діагностування тягових двигунів за основними ознаками дає можливість установити взаємозв'язок окремих методів і здійснити раціональний вибір їх для реалізації в системі контролю й діагностування.

2. Інформаційно-статистичний метод контролю технічного стану тягових двигунів електропоїздів, що визначається

на основі імовірнісної граф-моделі й використанні статистичних результатів контролю, дозволяють отримати інтегральну ентропійну оцінку стану двигуна. На її основі приймається рішення про підвищення надійності вузлів і вдосконалювання системи контролю й діагностування двигун.

3. У подальшому на базі значень ентропії необхідно розробити алгоритм інформаційної оцінки окремих параметрів контролю і їх комбінацій при контролі за інформаційним критерієм.

Список використаних джерел

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения [Текст]. – Введ. с 01.01.1991 г. – М.: ГК СССР по управлению качеством продукции и стандартами, 1989. – 132 с.
2. Особливості інформаційного обміну в процесі дистанційного моніторингу технічного стану і управління працездатністю енергоустановок залізничного транспорту з двигунами внутрішнього згорання [Текст] / І.В. Грицук, С.В. Панченко, А.О. Каграманян, А.П. Фалендиш // Залізничний транспорт України. – 2015. – №5. – С. 41-45.
3. Фалендиш, А. П. Визначення раціональної номенклатури контрольних параметрів експлуатаційних випробувань модернізованих тепловозів на працездатність [Текст] / А.П. Фалендиш, А.М. Зіньківський, М.І. Брагін, [та ін.] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: Вид-во СНУ, 2013. – №18 (207). – Ч.2. – С. 89-95.
4. Тартаковський, Е. Д. Визначення режимів роботи під час експлуатаційних випробувань моторно-осьових підшипників [Текст] / Е.Д. Тартаковський, А.П. Фалендиш, Д.М. Коваленко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2013. - №4 (193). – С. 247-253.
5. Фалендиш, А. П. Моделювання зміни коефіцієнта технічного використання маневрового тепловоза для різних систем утримання [Текст] / А.П. Фалендиш, А. Л. Сумцов, О. В. Артеменко, О. В. Клецька // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – №1/3 (79). – С. 24-31.
6. Петров, М. Н. Диагностика изоляции тяговых электродвигателей электровозов на основе нано-интерферометрических оптоволоконных датчиков [Текст] / М.Н. Петров, А.И. Орленко, О.А. Терегулов, Э.В. Лукьянов //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №15. – С. 139-141.
7. Авилов, В. Д. Контроль технического состояния и оценка ресурса тяговых двигателей и колесно-моторных блоков подвижного состава [Текст] / В.Д. Авилов, В.В. Харламов, В.Н. Костюков // Сб. науч. раб. ОАО «РЖД». – 2006. – С. 28-32.
8. Бондар, Б. Є. Діагностування тягових електродвигунів за нерівномірністю обертання якоря [Текст] / Б.Є. Бондар, О.Б. Очкасов, Д.В. Черняєв, І.Я. Шевченко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – Вип. 3(45). – С. 13-21.
9. Афанасов, А. М. Повышение энергетической эффективности испытаний тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока [Текст] / А.М. Афанасов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 12-15.

10. Афанасов, А. М. Развитие научных основ та вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму [Текст]: автореф. дис... д-ра техн. наук / А.М. Афанасов. – Дніпропетровськ, 2013. – 39 с.

11. Афанасов, А. М. Выбор рационального количества источников мощности системы взаимного нагружения тяговых электромашин [Текст] / А.М. Афанасов // Вісник НТУ „ХПІ“. – 2014. – №41(1084). – С. 37-43.

12. Руководство по устройству электропоездов ЭД9М, ЭД9Т, ЭР9П [Текст] / Д.М. Шеремет, С.А. Пономаренко. – М.: Центр Коммерческих разработок, 2005. – 128 с.

13. Шубников, П. Ф. Ремонт электрооборудования электроподвижного состава [Текст] / П.Ф. Шубников, С.Я. Мазо. – М.: Транспорт, 1986. – 317 с.

14. Deuzkiewicz P., Radkowski S. On-line condition monitoring of a power transmission of a rail vehicle [Текст] // Mechanical Systems and Signal Processing.-Volume 17, Issue 6. 2003.- P.1321-1334.

Фалендиш Анатолій Петрович, доктор техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 057-730-1999.

Коломієць Олександр Борисович, магістр, моторвагонне депо Одеса-Заставна-1.

Вихопень Іван Романович, інженер, ПАТ „Харківська ТЕЦ-5“.

Тихонравов Сергій Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: tihonravov@yahoo.com.

Falendysh Anatoliy, PhD, Professor of "Maintenance and repair of rolling stock". Tel. 057-730-1999.

Kolomiets Oleksandr, master, motorvagonne depot Odessa-Zastava-1.

Vihopen Ivan, ingeneer, PAT "TEC-5". Tel. 057-730-1999.

Tykhonravov S., cand. of tehn. Sciences, Associate Professor, chair of Electronics, Electrical Machines of krainian State University of railway transport. E-mail: tihonravov@yahoo.com.

Стаття прийнята 25.08.2016 р.