

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

УДК 621.152:656.2

**Артеменко Віктор Васильович**

**Вдосконалення ефективності контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Харків – 2006**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту на кафедрі "Експлуатація та ремонт рухомого складу" Міністерства транспорту та зв'язку України

#### **Науковий керівник**

– доктор технічних наук, професор  
**Бабанін Олександр Борисович**,  
Українська державна академія залізничного транспорту,  
кафедра "Експлуатація та ремонт рухомого складу",  
професор кафедри

#### **Офіційні опоненти**

- доктор технічних наук, професор  
**Головко Владислав Федорович**,  
Українська державна академія залізничного транспорту,  
кафедра "Вагони", завідувач кафедри

- доктор технічних наук, професор  
**Маслієв В'ячеслав Георгійович**,  
Національний технічний університет "Харківський,  
політехнічний інститут", кафедра "Електричний транспорт  
та тепловозобудування", професор кафедри

#### **Провідна установа**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира  
Даля, кафедра "Залізничний транспорт", Міністерство освіти і науки  
України, м. Луганськ.

Захист відбудеться 16.03.2006 р. о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий 16.02.2006 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.Б. Бойнік

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Вступ.** Сучасний стан тягового рухомого складу залізниць України потребує вирішення комплексу наукових та практичних задач його відновлення, утримання та ремонту. Напружена економічна ситуація в Україні не дозволяє в повній мірі поповнювати парк тепловозів. Це викликає подовження його строку експлуатації і вимагає розробку науково-обґрунтованих підходів і методичних основ, що повинні забезпечити на належному рівні їх надійність.

**Актуальність теми** дисертації зумовлена необхідністю вирішення наукової задачі з вдосконалення ефективності контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо. Як відомо дорожнеча, а часом і неможливість капітального ремонту на ремонтних підприємствах, змушує виконувати його в умовах локомотивного депо. Це значно підвищує вимоги до організації проведення ремонту, збільшенню обсягів технологічних операцій, упровадження нового обладнання, а що саме головне, потребує розробку нових наукових підходів до забезпечення контролю за якістю усього технологічного ланцюга. Виходячи з цього, наукова задача дисертаційної роботи є своєчасною та актуальною.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі "Експлуатація та ремонт рухомого складу" Української державної академії залізничного транспорту, яка є співвиконавцем науково-технічної частини Державної програми "Розвиток рейкового рухомого складу соціального призначення для залізничного транспорту та міського господарства" та відповідно до планів науково-дослідних робіт у рамках галузевих програм Міністерства транспорту та зв'язку України і Укрзалізниці за темами "Наукове обґрунтування реалізації концепції розвитку систем діагностування у локомотивному господарстві залізниць України" (№ ДР 0101U002465), "Розроблення інформаційної системи управління локомотивним господарством Укрзалізниці" (№ ДР 0198U005210).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є вдосконалення ефективності контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо.

Виходячи з цього, в дисертації поставлені наступні задачі:

- провести аналіз несправностей і відмов тягових електричних машин, які пов'язані з подовженням їх терміну служби;
- формалізувати задачу вдосконалення системи контролю технічного стану тягових електричних машин під час їх випробувань на її основі самонавчання;
- оцінити та визначити зміну виробничого ризику в залежності від ефективності системи контролю;
- науково обґрунтувати та визначити залежності нових параметрів контролю при проведенні випробувань;
- розробити метод вібраційного контролю та на його основі визначити основні вимоги до вдосконалення технології ремонту під час випробувань тягових електричних машин;
- доопрацювати методи інструментального теплового контролю вузлів тягових електричних машин на основі дистанційного інфрачервоного контролю з визначенням погрішності та діапазону вимірюємих параметрів;
- оцінити ефективність напрямків вдосконалення системи контролю тягових електричних машин при впровадженні сучасних засобів діагностики, моніторингу і обробки інформації.

*Об'єктом дослідження* є система контролю технічного стану тягових електричних машин в умовах депо.

*Предметом дослідження* є методи контролю технічного стану тягових електричних машин.

*Методи дослідження.* Вирішення наукової задачі базується на процедурі моніторингу технічного стану тягових електричних машин з використанням методів статистичного аналізу, теорії ймовірностей, теорії самонавчання та методів чисельного експерименту.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В дисертаційній роботі шляхом розробки комплексу математичних моделей вирішено наукову задачу вдосконалення системи контролю при ремонті тягових електричних машин за рахунок розробки методів оцінки їх технічного стану під час випробувань в умовах депо.

*Вперше розроблено та запропоновано:*

- метод комплексної оцінки факторів, які впливають на скорочення технічного стану тягових електричних машин при подовженні їх терміну служби;
- модель визначення граничних значень параметрів енергетичної установки тепловоза, що впливають на стан тягових електричних машин та лімітують їх термін служби;
- комплексна модель вдосконалення системи контролю технічного стану тягових електричних машин, в основу якої покладено принцип самонавчання та запропоновані шляхи її практичної реалізації.

*Доопрацьовано:*

- метод вібромоніторингу вузлів тягових електричних машин на принципово новій апаратній основі із застосуванням ПЕОМ та створенням відповідної бази даних за браковочними параметрами;
- методика теплового контролю відповідальних вузлів тягових електричних машин із застосуванням принципово нових технологічних апаратних засобів на основі інфрачервоних пірометричних приладів;
- створення теоретичних і практичних передумов по організації проведення вихідного контролю, які дозволяють на більш якісному рівні визначати технічний стан тягових електричних машин та як наслідок забезпечувати їх надійність при подовженні терміну служби.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблений комплекс моделей дозволяє в умовах локомотивного депо, при виконанні тяговим електричним машинам тепловозів поточного ремонту в обсязі капітального, здійснювати ефективний вихідний контроль, шляхом збільшення додаткових параметрів, які дозволяють оцінити дійсний технічний стан, а також дієво впливати на існуючі технологічні процеси.

Застосування розробленого комплексу моделей з вдосконалення ефективності контролю дає змогу підвищити якість ремонту тягових електричних машин в умовах депо, покращити їх надійність та підвищити коефіцієнт готовності тепловозів на 0,1%, скоротити час їх непродуктивного простою на 4% і підвищити безвідмовність в експлуатації на 7%.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено у технологічному процесі поточного ремонту тепловозів локомотивного депо Лозова Південної залізниці, а також у навчальному процесі УкрДАЗТ при вивченні дисциплін "Основи надійності та технічної діагностики", "Технологія технічного обслуговування та поточного ремонту локомотивів", при виконанні науково-дослідних робіт студентів та ФПК і ІППК при УкрДАЗТ при підготовці магістрів. Результати роботи підтверджені відповідними матеріалами про впровадження, які наведені у додатках до дисертаційної роботи.

**Особистий внесок здобувача.**

Під час наукових досліджень усі положення та результати роботи отримані автором особисто.

У роботах, що опубліковано у співавторстві, автору безпосередньо належить: у статті [1] - запропонований метод визначення технічного стану підшипників тягових електричних машин під час проведення їх випробувань на підставі отримання вібраційних характеристик; у статті [2] - проаналізовані фактори, та отримана залежність їх впливу на технологію обслуговування й ремонту тепловозів; у статті [3] - за допомогою тополого-ймовірносного методу визначені граничні значення параметрів енергетичної установки тепловоза, які безпосередньо впливають на технічний стан тягових електричних машин; у статті [4] - запропоновано вдосконалення технології випробувань тягових електричних машин та отримані залежності, які визначають скорочення часу на їх проведення.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися та були схвалені на наступних конференціях та семінарах:

- 62 – 66 міжнародних науково-технічних конференціях кафедр УкрДАЗТ та працівників залізничного транспорту, 2000-2005 рр.;

- засіданні 16-ї Міжнародної школи-семінару "Перспективні системи управління на залізничному, промисловому та міському транспорті", 2003 р. (м. Алушта);

- 1-й Міжнародній науково-практичній конференції "Наука в транспортному вимірі", Міністерства транспорту та зв'язку України, 2005 р. (м. Київ).

Повністю дисертаційна робота доповідалась на розширеному засіданні кафедри "Експлуатація та ремонт рухомого складу" УкрДАЗТ з участю членів спеціалізованої вченої ради Д64.820.04 (2005 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано п'ять наукових робіт (одна є одноосібною) у виданнях, що затверджені ВАК України, як фахові.

**Структура роботи.** Дисертація складається з вступу, п'яťох розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи містить 153 сторінки, з них обсяг основного тексту 107 сторінок; додатків, списку використаних джерел, рисунків та таблиць на 46 сторінках. Робота ілюстрована 29 рисунками, наведено 11 таблиць. Список використаних джерел складається з 143 найменувань.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, розкрита її наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Сформульовано мету дослідження, подано стисло характеристику результатів досліджень, ступеню їх апробації, публікації та структуру роботи.

У **розділі 1** здійснено аналіз існуючих методів контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо. Він містить матеріали з інформаційного і методичного забезпечення оцінки експлуатаційної ефективності існуючих технологій при технічному обслуговуванні та поточному ремонті тягового рухомого складу (ТРС).

Дослідження з удосконалення системи технічного обслуговування та поточного ремонту ТРС проводяться в Україні та країнах СНД під керівництвом відомих вчених: Бабаніна О.Б., Бодняря Б.Є., Бутько Т.В. Володіна О.І., Головка В.Ф., Голубенка О.Л., Дьоміна Ю.В., Зайончковського В.М. Кельріха М.Б., Кисельова В.І., Коссова Є.Є., Кудряша А.П., Кузьміна В.В., Маслієва В.Г., Сінчука О.М. Тартаковського Е.Д., Четвергова В.О.

Аналіз показав, що існуюча система планово-попереджувального ремонту, яка постійно корегується, на сьогодні забезпечує достатній рівень технічного стану ТРС. Однак, інтенсивність старіння парку локомотивів, підвищення обсягів експлуатаційної роботи, поява в на залізницях ТРС нового покоління вимагає

здійснення та реалізації упереджуючих заходів із забезпечення необхідної надійності ТРС при мінімізації витрат на його утримання.

Запропонований математична модель технологічного процесу поточного ремонту тягових електричних машин тепловозів, де ремонт представлений як динамічний об'єкт, на який впливають різноманітні фактори (проведення контролю і діагностування, оцінка характеристик обслуговуючого персоналу і ін.). Модель розглядалася як регресійна залежність у вигляді

$$y_i = b_j x_{i1} + \dots + b_k x_{ik} + e_i, \quad (1)$$

де  $x_i$  - незалежні не випадкові змінні, значення яких визначалися для кожного  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k}$ ;  $b_j$  - невідомі постійні параметри (коефіцієнти регресії),  $j = \overline{1, k}$ ;  $e_i$  - невідома випадкова помилка;  $y_i$  - залежна змінна.

Уся сукупність параметрів, зафіксованих у процесі їх збирання і реєстрації узагальнювалася у вигляді матриць спостереження

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

Відповідно до даної методики в локомотивному депо Лозова Південної залізниці проводилися експериментальні дослідження. Через однакові інтервали часу визначалися фактори, що впливають на поточний ремонт тягових електричних машин. Вони враховували час на проведення незапланованих контрольних операцій та зміну вузлів, стаж роботи обслуговуючого персоналу і його розряд роботи, а також дані наробітки від часу проведення останнього ремонту. За вихідні приймалися параметри випробувань тягових електричних машин на стенді.

Проведені експериментальні перевірки показали достатню адекватність їх запропонованим регресійним моделям. Так було отримано рівняння регресії

з помилкою, що склала для цього випадку 12,8%.

Отримане рівняння достатньо добре описує технологічний процес. Значущими факторами згідно їх вагомості у цьому випадку стали:  $X_1$  – стаж роботи обслуговуючого персоналу (43%);  $X_2$  – розряд роботи обслуговуючого персоналу (27%);  $X_3$  – наробіток від останнього виду ремонту (21%). Аналогічно були отримані регресійні рівняння, що досить адекватно описують залежності вихідних параметрів від контрольованих перемінних (з розбіжністю не більше 8,7-15,4%). Але ця методика не в повній мірі розкриває впливання цих, а також дію інших факторів на оцінку роботоздатності відремонтованої тягової машини.

Як розвиток даної задачі в роботі запропоновано побудувати комплекс моделей, на підставі яких визначити здатність тягової електричної машини забезпечити її надійність у експлуатації.

У **другому** розділі виконана формалізація задачі щодо визначення ефективних ризиків прийняття рішень, для більш якісної оцінки тягових електричних машин, які пройшли ремонт та випробування на спеціальних станціях. Якщо прийняти, що вірогідність відмови тягового електродвигуна за період роботи  $T$  дорівнює  $z$ , то (якщо  $z \in K$ ), електродвигун відповідає вимогам по безвідмовності, а при  $z \notin K$  - не відповідає. Величина  $z$  прийнята як бракувальний рівень. Ураховуючи те, що при виборі  $z \in K$  (де  $K$  імовірність прийняття рішення прийняти або забракувати тягову електричну машину після

проведення випробувань) вирішується статистична задача отримання відмінних від нуля ризиків сторін  $\alpha^{(K)}$  і  $\beta^{(K)}$ , які, із врахуванням безвідмовності випробуемого зразка, визначаються як

$$\beta(K, z) = \begin{cases} 0, & z < z^* \end{cases}, \quad (3)$$

$$\alpha(K, z) = \begin{cases} 1 - P(z), & z < z^* \end{cases}, \quad (4)$$

де  $\alpha$  - ризик забракувати справний тяговий електродвигун;  $\beta$  - ризик прийняти несправний тяговий електродвигун;  $z$  - ймовірність відказу тягового електродвигуна при проведенні контролю;  $z^*$  - бракувальний рівень ймовірності відмови;  $P(z)$  - ймовірність прийомки двигуна, безвідмовність якого характеризується  $z$ .

Вважаючи  $z$  величиною випадковою, визначимо функцію  $f(z)$  як ймовірну щільність розподілу цієї величини. В цьому випадку, коли  $z^*$  заданий рівень складає

$$P(z \leq z^*) = \int_0^{z^*} f(z) dz, \quad (5)$$

можна планувати відповідний об'єм випробувань не за малоінформативними умовними ймовірностями  $\alpha$  і  $\beta$ , а за реальним ризиком, який усереднений за багатьма значеннями  $z(T)$ . Цей ризик, визначається, як ефективний і являє собою наступні його ймовірності: ризик (ймовірність)  $\beta_{ef}$  прийняти тяговий електродвигун, який не відповідає вимогам щодо безвідмовності, тобто  $z(T) < z^*(T)$ ; ризик (ймовірність)  $\alpha_{ef}$  забракувати тяговий електродвигун, який відповідає таким вимогам, тобто  $z(T) \leq z^*(T)$ . Відповідно цього

$$\beta_{ef} = \int_{z^*}^1 P[z(T)] f[z(T)] dz, \quad (6)$$

$$\alpha_{ef} = \int_0^{z^*} [1 - P[z(T)]] [z(T)] dz. \quad (7)$$

При плануванні випробувань, коли випробується партія із  $N$  тягових електродвигунів протягом часу  $t$  і партію приймають (якщо число відмов  $n$  не перевищує деякої заданої величини  $n^*$ ) запропоновано ймовірність прийняття електродвигунів визначати за виразом

$$P[z(t)] = P[n = n^*] = \sum_{i=0}^{n^*} \binom{N}{i} z^i (1-z)^{N-i}. \quad (8)$$

Враховуючи те, що сумарна наробітка, за час якої параметри тягового електродвигуна повинні знаходитися у граничних межах та відповідати заданному гама-відсотковому ресурсу, її ймовірнісну щільність запропоновано описувати  $\beta$  - розподілом

$$f[z(t)] = \frac{\Gamma(k+\gamma)}{\Gamma(k)\Gamma(\gamma)} z^{k-1}(1-z)^{\gamma-1} \quad (9)$$

де  $\Gamma(k)$ ,  $\Gamma(\gamma)$ ,  $\Gamma(k+\gamma)$  - гама-функції відповідних аргументів.

Після перетворень було отримано

$$\beta_{ef} = \frac{\Gamma(\gamma+2)}{\Gamma(\gamma)} \int_0^1 z(1-z)^{\gamma-1} \sum_{i=0}^n \binom{N}{i} z^i (1-z)^{N-i} dz; \quad (10)$$

$$\alpha_{ef} = \frac{\Gamma(k+2)}{\Gamma(\gamma)} \int_0^z z(1-z)^{\gamma-1} \left[ 1 - \sum_{i=0}^n \binom{N}{i} z^i (1-z)^{N-i} \right] dz. \quad (11)$$

Інтегрування цих виразів було виконано для важливого практичного випадку, коли повинна бути реалізована умова про відсутність відмов в процесі випробувань, тобто при  $n = 0$

$$\beta_{ef} = \frac{\gamma(\gamma+1)(1-z^i)^{N+\gamma}}{N+\gamma} \left( z^i + \frac{1-z^i}{N+\gamma+1} \right), \quad (12)$$

$$\alpha_{ef} = 1 - \gamma(\gamma+1) \left[ \frac{1}{(N+\gamma)(N+\gamma+1)} + \left( z^i + \frac{1-z^i}{\gamma+1} \right) \times \frac{(1-z^i)^\gamma}{\gamma} - \left( z^i + \frac{1-z^i}{N+\gamma+1} \right) \frac{1-z^i}{N+\gamma} \right]. \quad (13)$$

Розрахункові графічні залежності  $\beta_{ef}$ , за формулою (12) наведені на рис. 1.

На підставі виконаних розрахунків були визначені чисельні значення ризиків при випробуванні тягових електричних машин, які стали підставою для створення моделі самонавчання системи контролю.

За вищевикладеним була реалізована модель самонавчання системи контролю тягових електродвигунів при випробуваннях. При цьому, було покладено два напрямки спостережень.

При спостереженнях за умови відсутності відмов (прийнято, що функція надійності електричної частини тягових електродвигунів являє собою експоненту) позначивши  $A(t)$  подією, що полягає у відсутності відмови, будемо мати

$$P[A(t)] = P[T \geq t] = e^{-\lambda t}. \quad (14)$$

Запровадимо до розгляду повну групу неспільних гіпотез про рівень надійності тягового двигуна  $Q_i [i = (\bar{1}, \bar{n})]$ . Тоді кожна з  $n$  гіпотез буде полягати в тому, що ймовірність безвідмовної роботи його за час  $t$  буде дорівнювати  $P_i(t)$ , тобто

$$P[A(t)] = P[T \geq t] = e^{-\lambda t}. \quad (15)$$

Рисунок 1 – Залежність ефективного ризику  $\beta_{ef}$  від відмови тягового електродвигуна під час випробувань

Якщо неможливо диференційовано визначити рівень правдоподібності кожної гіпотези  $Q_i$  (тобто імовірнісну щільність  $\theta(Q_i)$ ), то всі їх значення вважаються рівноймовірносними. На підставі цього, приймаючи на першому кроці



$$\theta(Q_i) = \frac{1}{n}, \quad (16)$$

визначаємо апіорні ймовірності, для уточнення яких надалі й проводиться процедура самонавчання.

Нехай випробовуваний тяговий електродвигун проробив безвідмовно час  $t_1$ . Ймовірність його безвідмовної роботи протягом  $t_1$  за умови, що правильна гіпотеза  $Q_i$ , буде дорівнювати

$$P(T \geq t_1 / Q_i) = e^{-\lambda_i t_1} = [P_i(t)]^{\frac{t_1}{t}}. \quad (17)$$

Відповідно до байєсівського підходу одержимо апостеріорні значення ймовірності (правдоподібності) гіпотез

$$\theta(Q_i / A(t_1)) = \frac{[P_i(t)]^{\frac{t_1}{t}} \theta(Q_i)}{\sum_{i=1}^n [P_i(t)]^{\frac{t_1}{t}} \theta(Q_i)}. \quad (18)$$

Таким чином реалізується перший крок. На другому кроці після чергового спостереження за випробуємим зразком або випробуванням наступного (при цьому залучається і експлуатаційна інформація) апіорними ймовірностями гіпотез приймаються ймовірності  $\theta(Q_i / A(t_1))$ . Якщо на другому кроці має місце період безвідмовної роботи, рівний  $t_2$ , то

$$\theta(Q_i / A(t_2)) = \frac{\theta(Q_i / A(t_1)) [P_i(t)]^{\frac{t_2}{t}}}{\sum_{i=1}^n [P_i(t)]^{\frac{t_2}{t}} \theta(Q_i / A(t_1))}. \quad (19)$$

Після  $n$  уточнюючих контрольних спостережень будемо мати

$$\theta(Q_i / A(t_m)) = \frac{\theta(Q_i) [P_i(t)]^{(t_1+t_2+\dots+t_m)/t}}{\sum_{i=1}^n [P_i(t)]^{(t_1+t_2+\dots+t_m)/t} \theta(Q_i)}. \quad (20)$$

Спостереження з фіксацією відмов. Якщо в процесі випробувань тяговий електродвигун має відмову в проміжку  $[t_1 + \Delta t]$  (позначимо цю подію  $B(t_1, \Delta t)$ ), ймовірність, що правильна гіпотеза  $Q_i$ , визначиться залежністю

$$F(t_1 \leq T < t_1 + \Delta t / Q_i) = e^{-\lambda_i t_1} - e^{-\lambda_i (t_1 + \Delta t)} = \lambda_i \Delta t e^{-\lambda_i t_1}. \quad (21)$$

Апостеріорні ймовірності гіпотез  $Q_i$  у випадку появи події  $B(t_1, \Delta t)$  при  $\Delta t \rightarrow 0$  визначається як

$$\theta(Q_i / B(t)) = \frac{\theta(Q_i) [P_i(t)]^{\frac{t_1}{t}} \ln P_i(t)}{\sum_{i=1}^n \theta(Q_i) [P_i(t)]^{\frac{t_1}{t}} \ln P_i(t)}. \quad (22)$$

На другому кроці, тобто при реалізації події  $B(t_2)$ , аналогічно одержимо

$$\theta(Q_i / B(t_1) \wedge B(t_2)) = \frac{\theta(Q_i) [P_i(t)]^{\frac{t_1+t_2}{t}} [\ln P_i(t)]^2}{\sum_{i=1}^n \theta(Q_i) [P_i(t)]^{\frac{t_1+t_2}{t}} [\ln P_i(t)]^2}. \quad (23)$$

За допомогою цих моделей був виконаний розрахунок самонавчання системи контролю. Для підвищення достовірності та об'єктивності якості інформації визначені основні малоінформативні параметри, які потребують

додаткового розширення при проведенні випробувань тягових електричних машин.

У третьому розділі наведені результати експериментальних досліджень вібромоніторингу тягових електричних машин. Після виконання поточного ремонту ТР-3 тягові електродвигуни піддаються випробуванням на спеціальній станції, однак їх підшипники при проведенні цих випробувань, залишаються без відповідного контролю.

Виходячи з цього на випробувальній станції тягових електричних машин після капітального ремонту співробітниками УкрДАЗТ спільно із спеціалістами локомотивного депо Лозова був упроваджений мікропроцесорний аналізатор спектру 795М, що дозволяє вимірювати динамічні сигнали з наступним їх записом в енергонезалежну пам'ять, переглядати, аналізувати і передавати їх у базу даних на персональний комп'ютер з подальшою обробкою по спеціальній програмі.

На підставі дослідження великої кількості отриманих даних за допомогою аналізатора спектра 795М, послідууючої їх обробки на ПЕОМ і порівнянні з реальними характеристиками були визначені типи найбільш характерних спектрів вібросигналів, які можна поєднати в три основних стадії розвитку дефектів.

**Стадія 1.** Перші ознаки дефектів на спектрі вібросигналів виникають тоді, коли дефект підшипника, виникнувши, розвіється до такого рівня, що виділяема ним енергія стане порівняно помітною в загальній енергії вібрації підшипника. У цьому спектрі, поряд з першими, механічними, гармоніками частоти обертання ( $F_1$ ), з'являються піки на характерній частоті дефекту того чи іншого елемента підшипника ( $F_H$ ). На цій стадії характерна гармоніка вже добре помітна на спектрі і дозволяє досить точно виявляти дефектний елемент. По амплітуді пік характерної гармоніки вже порівнюється з амплітудою першої або другої гармонік обертової частоти ротора, але по своїй потужності ще багато їм поступається. На спектрі це виражається тим, що пік підшипникової гармоніки є дуже вузьким. Таким чином, дефект з'явився, але ще не є сильно розвинутим. На підставі проведених досліджень було визначено, що перша стадія завершується тоді, коли амплітуда характерної гармоніки вже не зростає, а поруч з нею, дуже близько, з'являються бічні гармоніки ліворуч і праворуч. Це говорить про те, що почався етап розширення зони дефекту в підшипнику.

**Стадія 2.** На цій стадії значно збільшується внесок у загальну вібрацію складової від дефекту підшипника. Підшипникова гармоніка збільшує свою потужність до такого значення, що її можна порівняти з основними механічними гармоніками - першою ( $F_H$ ) і другою ( $2F_H$ ). Результатом наявності у вібросигналі двох (як мінімум) гармонік - синхронної й несинхронної приблизно однакової потужності збуджує в агрегаті частоти биття. Ці частоти биття виявляються на спектрі у вигляді бічних смуг поблизу характерної підшипникової гармоніки. Подальший розвиток дефекту приводить до появи гармонік від характерної підшипникової частоти. Проведеними дослідженнями було встановлено - чим більш розвинутий дефект, тим більше бічних гармонік у гармоніках частоти дефекту.

**Стадія 3.** Це остання стадія розвитку дефектів, коли підшипник, як правило, вже цілком деградував і перестав виконувати свої прямі функції по забезпеченню обертання вала при мінімальних витратах на тертя. При цьому знос підшипника досягає такого рівня, коли характерна частота дефекту з-за зносу стає нестабільною. Така ж доля спіткає бічні гармоніки. Накладення багатьох сімейств гармонік, кожне з яких складається з основної частоти і бічних гармонік, створює досить складну картину. Якщо в цих сімействах основні гармоніки розрізняються по частоті небагато, то сума всіх частот являє собою загальне підняття спектру, (так називаний "енергетичний горб", що захоплює такий діапазон частот, куди

входять усі гармоніки всіх сімейств від усіх уже існуючих дефектів підшипника кочення). Однак як було встановлено, усі вони носять чисто випадковий характер і вже практично нічого не відбивають. На рис. 2 показані особливості діагностування третьої стадії розвитку дефекту.

Рисунок 2 – Спектр вібрації на третій стадії діагностики дефекту підшипника якоря тягового електродвигуна

На підставі проведених досліджень був розроблений перелік дефектів, які представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Примітка.  $F_1$  – механічна гармоніка частоти обертання;  
 $F_H$  – гармоніка зовнішнього кільця підшипника;  
 $F_B$  – гармоніка внутрішнього кільця підшипника;  
 $F_{TK}$  – гармоніки тіл кочення.

У **четвертому** розділі наведені експериментальні результати вимірювання температури нагрівання тягових електричних машин. Виходячи із цього спеціалістами локомотивного депо Лозова Південної залізниці разом зі співробітниками кафедри "Експлуатація та ремонт рухомого складу" УкрДАЗТ були проведені дослідження й виконані розробки по вдосконаленню теплового контролю тягових електродвигунів тепловозів при їх випробуваннях. За апаратну основу був прийнятий інфрачервоний пірометр, який приймає тепловий потік інфрачервоного випромінювання від нагрітого тіла, перетворює його в електричний сигнал і видає результат на цифровий індикатор.

На підставі даної методики були отримані залежності зміни температури нагрівання тягового електродвигуна ЕД-121 при вимірі існуючим і пірометричним методом. Проведеними дослідженнями було встановлене, що при вимірюванні температури нагрівання тягового електродвигуна в процесі проведення випробувань необхідно, відповідно до нормативної документації, через 15÷20 хвилин його зупиняти, вимірювати опір обмоток, а потім знову запускати й продовжувати випробування. На підставі цього була отримана залежність 2 наведена на рис. 5. Із графіка видно, що в інтервалах часу  $t_1$  (ділянка **a-b**),  $t_3$  (ділянка **c-d**) і  $t_5$  (ділянка **e-k**) відбувається зростання температури нагрівання. В інтервалах  $t_2$  (ділянка **b-c**)  $t_4$  (ділянка **d-e**)  $t_6$  (ділянка **k-l**) відбувається вимірювання опору обмоток тягового електродвигуна.

**1 - температура нагрівання, яка вимірювалась за допомогою пірометра, без урахування його погрішності; 2 - температура нагрівання, яка вимірювалась за допомогою існуючого методу (вимірювання опору); 3 - температура нагрівання з урахуванням виправлення на погрішність вимірювання пірометром.**

Рисунок 5 - Залежності нагрівання тягового електродвигуна ЕД-121 при випробуваннях

Отримані дані були апроксимовані наступними залежностями:

- ділянка **a-b**  $f_1 = 73,1419 t^{0,268464} - 74,5448$  ;
- ділянка **b-c**  $f_2 = 0,0035834 t^2 - 0,3716456 t + 93,98595$  ;
- ділянка **c-d**  $f_3 = 20,49964 t^{0,360971} + 17,27137$  ;
- ділянка **d-e**  $f_4 = -0,0004131 t^2 - 0,177408 t + 110,4507$  ;
- ділянка **e-k**  $f_5 = 6,65602 t^{0,420395} + 61,2353$  ;

- ділянка  $k-l$   $f_6 = 0,0101034 t^2 - 1,95253 t + 194,932$ .

Крива нагрівання  $m-n$ , обмірювана за допомогою пірометра була апроксимована наступним рівнянням

$$f_{nup} = 100,1893 (1 - e^{-0,1222256 t})$$

На підставі отриманих результатів запропонований коефіцієнт прискорення випробувань, який визначається як

$$K_y = \frac{\int_m^n f_{nup}(t) dt}{\int_a^b f_1(t) dt + \int_b^c f_2(t) dt + \int_c^d f_3(t) dt + \int_d^e f_4(t) dt + \int_e^k f_5(t) dt + \int_k^l f_6(t) dt} \quad (25)$$

Як показали дослідження значення цього коефіцієнту знаходяться у межах  $0,65 \div 0,72$ .

В **п'ятому** розділі запропоновані організаційно-технічні заходи щодо впровадження методів вдосконалення ефективності контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо.

Сформовано схему надходження і передачі інформаційних потоків при проведенні контролю і діагностування за допомогою АРМ, які встановлюються на випробувальній станції, у інженерів-технологів та інших структурних підрозділах депо. Запропонований перелік технічних засобів для оснащення випробувальної станції тягових електричних машин, на основі сучасних мікропроцесорних приладів.

Впровадження результатів дисертаційної роботи у технологічний процес дозволило покращити якість випробувань тягових електричних машин, а також підвищити коефіцієнт готовності тепловозів на 0,1%, скоротити час їх непродуктивного простою на 4% і підвищити їх безвідмовність в експлуатації на 7%.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі комплексно вирішена науково-технічна задача вдосконалення ефективності контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо, яка забезпечує зменшення експлуатаційних витрат і поліпшення технічного стану локомотивного парку.

На підставі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. На підставі проведення аналізу визначено, що з ростом старіння парку локомотивів на залізницях України особливу актуальність викликає передчасна заміна зношених деталей не тільки при проведенні капітальних ремонтів на ремонтних заводах, але й при виконанні поточних ремонтів в умовах депо, чого раніше кілька років тому назад не спостерігалось. Це потребує додаткових заходів (особливо для тягових електричних машин), щодо поліпшення якості їх ремонту та вихідного контролю, яким є випробування після ремонту на спеціальних стендах.

2. На підставі регресійного аналізу визначені та відкориговані фактори, які пов'язані з організаційно-технічними причинами впливаючими на якість проведення ремонту і випробувань тягових електричних машин в умовах депо.

3. Формалізована задача вдосконалення системи вихідного контролю технічного стану тягових електричних машин на основі запропонованої моделі її самонавчання. Межі отриманої залежності визначення виробничого ризику

$$\beta_{ef} = 0,6 \div 0,8$$

дозволяють коректувати ефективність процесу випробувань і визначати пошагову глибину контролю в залежності від технічного стану конкретної випробовуваної тягової електричної машини.

4. Визначені та науково обґрунтовані нові додаткові параметри, які визначаються при випробуваннях. Визначення вібраційних, теплових та ряду інших параметрів значно розширює оцінку технічного стану перевіряємої тягової електричної машини, а також дозволяє зробити обґрунтовані висновки про подальшу її роботоздатність у експлуатації.

5. Проведені дослідження дозволили встановити, що кожен конкретний підшипник тягової електричної машини має свої особливості й описується своєю вібраційною характеристикою. У результаті проведення досліджень, отриманий діагностичний процес зародження дефекту в підшипнику тягового електродвигуна у вигляді частотного викиду спектра в частотному діапазоні  $f=15\text{Гц}$  із середньою частотою  $42\text{Гц}$ . Визначено, що наявність руйнування в підшипнику характеризується значним збільшенням амплітуди третьої гармоніки до величини  $11,4\text{ мм/с}$ , що значно перевищує норму. У цьому випадку відбувається сильне зростання потужності сигналу в частотному діапазоні  $f=15\text{Гц}$  в околиці третьої гармоніки якоря до величини  $30\text{ мм/с}$ . Проведена ліфтрація, яка поєднує вібраційні сигнали та резонансні гармоніки у частотному діапазоні  $f=14\text{Гц}$  із центром  $3f_p=41\text{Гц}$ . Пікове значення огинаючої цього сигналу наочно демонструє діагностичну ознаку скорочасного руйнування підшипника.

6. Розроблена методика контролю температури нагрівання електричних частин тягової електричної машини під час її випробувань на основі застосування інфрачервоних пірометрів, яка дозволяє дистанційно вимірювати температуру обертаючогося якоря, а також значно прискорювати весь процес випробувань. Запропонований коефіцієнт прискорення випробувань, разом із застосуванням сучасних апаратних засобів дає змогу на  $25\div 30\%$  скоротити час проведення випробувань тягових електродвигунів на стенді.

7. Виконана оцінка запропонованих заходів. Встановлено, що впровадження результатів дисертаційної роботи у технологічний процес дозволило покращити якість випробувань тягових електричних машин, а також підвищити коефіцієнт готовності тепловозів на  $0,1\%$ , скоротити час їх непродуктивного простою на  $4\%$  і підвищити їх безвідмовність в експлуатації на  $7\%$ .

#### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Бабанін О.Б., Артеменко В.В. Вібромоніторинг підшипників тягових електричних машин при капітальному ремонті // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2003. - №4. – С. 9-12.

2. Бабанін О.Б., Артеменко В.В. Застосування регресійного аналізу для моделювання технологічних процесів обслуговування і ремонту // Зб. наук. праць. – УкрДАЗТ. – 2003. – Вип. 53. – С.35-40.

3. Бабанін О.Б., Артеменко В.В., Тараканов А.Л. Визначення граничних значень параметрів при збільшенні терміну служби локомотивів // Зб. наук. праць. – УкрДАЗТ. – 2003. – Вип. 55. – С.71-77.

4. Бабанін А.Б., Артеменко В.В. Совершенствование технологии испытаний тяговых электрических машин // Коммунальное хозяйство городов. – Харьков: Техника, 2004. - №55. – С.171-177.

5. Артеменко В.В. Планування випробувань тягових електричних двигунів тепловозів з урахуванням ефективного ризику // Зб. наук. праць. – УкрДАЗТ. – 2005. – Вип. 68. – С.119-126.

#### **АНОТАЦІЯ**

Артеменко В.В. Вдосконалення ефективності контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.22.07 - "Рухомий склад залізниць і тяга поїздів", Українська державна академія залізничного транспорту; Харків, 2006 р.

Дисертація присвячена питанням удосконалення ефективності контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо.

Проведений аналіз несправностей і відмов тягових електричних машин, які пов'язані із подовженням їх терміну служби. На підставі регресійного аналізу визначені та відкориговані фактори, які пов'язані з організаційно-технічними причинами та впливаючими на якість проведення ремонту і випробувань. Формалізована задача вдосконалення системи вихідного контролю технічного стану тягових електричних машин на основі запропонованої моделі її самонавчання. Визначені та науково обґрунтовані нові додаткові параметри, які вимірюються при випробуваннях. В результаті проведення досліджень, отриманий вібродіагностичний процес зародження дефекту в підшипнику тягового електродвигуна. Розроблена методика контролю температури нагрівання електричних частин тягової електричної машини на основі застосування інфрачервоних пірометрів. Запропонований перелік технічних засобів для оснащення випробувальної станції тягових електричних машин, на основі сучасних мікропроцесорних приладів.

Ключові слова: вібрація, діагностування, контроль, параметри, прогнозування, температура, тепловоз, технологія, тяговий електродвигун

### **АННОТАЦІЯ**

Артеменко В.В. Совершенствование эффективности контроля при ремонте тяговых электрических машин в условиях депо. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – "Подвижной состав железных дорог и тяга поездов", Украинская государственная академия железнодорожного транспорта; Харьков, 2006 г.

Проведен анализ неисправностей и отказов тяговых электрических машин, которые связаны с удлинением их срока службы.

На основании проведения анализ определен, что с ростом старения парка локомотивов на железных дорогах Украины особую актуальность вызывает преждевременная замена изношенных деталей не только при проведении капитальных ремонтов на ремонтных заводах, но и при выполнении текущих ремонтов в условиях депо, чего раньше несколько лет тому назад не наблюдалось. Это требует дополнительных мероприятий (особенно для тяговых электрических машин), по улучшению качества их ремонта и выходного контроля, в качестве которого являются испытания после ремонта на специальных стендах.

На основании регрессионного анализа определены и откорректированы факторы, которые связаны с организационно-техническими причинами, непосредственно влияющими на качество проведения ремонта и испытаний тяговых электрических машин в условиях депо.

Формализованная задача совершенствования системы выходного контроля технического состояния тяговых электрических машин на основе предложенной модели ее самообучения. Границы полученной зависимости определяющей производственный риск позволяют корректировать эффективность процесса испытаний и определять пошаговую глубину контроля в зависимости от технического состояния конкретной испытываемой тяговой электрической машины.

В работе определены и научно обоснованы новые дополнительные параметры, которые определяются при проведении испытаний. Определение

вибрационных, тепловых и ряда других параметров значительно расширяет оценку технического состояния испытываемой тяговой электрической машины, а также позволяет сделать обоснованные выводы о дальнейшей ее работоспособности в эксплуатации.

Проведенные в диссертационной работе исследования позволили установить, что каждый конкретный подшипник тяговой электрической машины имеет свои особенности и описывается своей вибрационной характеристикой. В результате проведения исследований, получен диагностический процесс зарождения дефекта в подшипнике тягового электродвигателя в виде частотного выброса спектра в частотном диапазоне  $f=15\text{Гц}$  со средней частотой  $42\text{Гц}$ . Определено, что наличие разрушения в подшипнике характеризуется значительным увеличением амплитуды третьей гармоники с величиной  $11,4\text{ мм/с}$ , что значительно превышает норму. В этом случае происходит сильный рост мощности сигнала в частотном диапазоне  $f=15\text{Гц}$  в окрестностях третьей гармоники якоря до величины  $30\text{ мм/с}$ . Проведена лифтрация, которая объединяет вибрационные сигналы и резонансные гармоники в частотном диапазоне  $f=14\text{Гц}$  с центром  $3f_p=41\text{Гц}$ . Пиковое значение огибающей этого сигнала наглядно демонстрирует диагностический признак скоротечного разрушения подшипника.

На основании проведенных исследований разработана методика контроля температуры нагревания электрических узлов тяговой электрической машины во время ее испытаний. На основе применения инфракрасных пирометров, разработан технологический процесс, который позволяет дистанционно измерять температуру вращающегося якоря, а также значительно ускорять весь процесс испытаний. Предложен коэффициент ускорения испытаний, который вместе с применением современных аппаратных средств дает возможность на 25-30% сократить время проведения испытаний тяговых электродвигателей на стенде.

## THE SUMMARY

Artemenko V.V. Perfecting of effectiveness of monitoring at repair of traction electrical computers in conditions of depot. - the Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of candidate technical science on a specialty 05.22.07 - "The rolling stock of railways and to pull of trains ", Ukrainian state academy of a railway transportation; Kharkov, 2006.

The thesis is devoted to problems of perfecting of effectiveness of monitoring at repair of traction electrical computers in conditions of depot. Malfunction analysis and refusals of traction electrical computers which are connected to an elongation of their life is conducted. On the foundation multiple regressions the analysis factors which are connected to the organizational - engineering reasons influential in quality of realization of repair and test are defined and adjusted. The problem of refinement of a system of a final inspection of availability index of product of traction electrical computers is formalized on the basis of an offered model of her self-training. New additional parameters which are gauged at trials are defined and scientifically justified. As a result of realization of researches, it is obtained vibrational diagnostic process of origin of an imperfection in the bearing of the traction electric motor. The technique of monitoring of temperature of heat of electrical parts of the traction electrical computer is developed on the basis of application of infra-red pyrometers. The enumeration of means for equipment of test station of traction electrical computers is offered, on the basis of modern microprocessor instruments.

Keywords: vibration, diagnosing, monitoring, parameters, prediction, temperature, diesel locomotive, process engineering, the traction electric motor

Вдосконалення ефективності контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

ас. Ю.М. Дацун

---

Підписано до друку 15.02.2006р.  
Формат паперу 64x84 1/16. Папір офсетний  
Умовн. – друк. арк. 0,9. Обл. – вид. арк. 1,0  
Замовлення № 148. Тираж 100 прим.

---

Видавництво УкрДАЗТу. Свідоцтво №112 від 06.07.2000р.  
61050, м. Харків, пл. Фейербаха, 7  
Друкарня УкрДАЗТу, 61050, м. Харків, пл. Фейербаха, 7