

**МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

БАБ'ЯК МИКОЛА ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 629.423.02-192

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИЛОВИХ КОНТАКТНИХ
З'ЄДНАНЬ ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНИХ КОНТАКТОРІВ
ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 - Електротранспорт

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

Дніпропетровськ – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичних основ електротехніки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДПіТу) Міністерства транспорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
КОСТІН Микола Олександрович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту України,
завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ТАРТАКОВСЬКИЙ Едуард Давидович,
Українська державна академія залізничного транспорту
Міністерства транспорту України, м. Харків,
завідувач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу.

кандидат технічних наук, доцент
ГЛЕВИЧ Олег Ілліч,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту України,
доцент кафедри автоматизованого електропривода.

Провідна установа: Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,
кафедра електромеханіки, Міністерство транспорту України
м.Луганськ.

Захист відбудеться 19.02.2004 р. о 14_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. В.А.Лазаряна, 2, ауд.314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розісланий 16.01.2004__ р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради,
д.ф.-м.н., проф.

В.І.Гаврилюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Аналіз несправностей вузлів та агрегатів електровозів постійного струму серій ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11 по залізницях України за останні 10 років показує, що до 50% відмов припадає на електрообладнання, до 35% причин яких є незадовільний стан контактних з'єднань електроапаратури, огляд і ремонт якої складає 15...25% від загальної працесмності ремонту всього електровоза.

На електропневматичних контакторах електровозів постійного струму в якості силових контактів традиційно використовують мідні контакт-деталі (губки). Основна причина їх відмов - це неякісний ремонт, головним фактором якого є дефіцит контактних елементів та міді. Як відомо, мідь, що застосовується при заводському виготовленні елементів і заміні зношених мідних губок на ремонтах, є не найкращим матеріалом за зносостійкістю і перехідним опором. До бракувального розміру допрацьовує лише 10% усіх контактів, решту вибраковують через оплавлення і порушення профілю контактної робочої поверхні, утворення раковин за рахунок електроерозії.

Враховуючи вищевикладене, а також великий дефіцит міді в Україні актуальною постає задача вибору надійного електропровідного матеріалу, як альтернативи "чистій" міді, для його використання в якості силових контактів найбільш навантажених струмом, а також домінуючих за кількістю електропневматичних контакторів електровозів постійного струму. Така задача в силовому апаратобудуванні ставиться вперше як у вітчизняній, так і в зарубіжній практиці ремонту та експлуатації рухомого складу залізниць. Тому дослідження експлуатаційної надійності силових електропневматичних контакторів з відновленими різними матеріалами силовими контактами є актуальною та важливою задачею ремонту тягового рухомого складу електричного транспорту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є складовою досліджень по виконанню галузевої програми №0.54.02.3 за наказом МШС №25 ЦЗ від 06.11.87 "Дослідження і розробка нової технології електроосадження гальванічних покриттів на контактні деталі електроапаратури електровозів", шифр 18.01.36.88.89.89 і виконана згідно з планом науково-дослідних робіт Придніпровської залізниці на 2000-2002р.р. за темою "Розробка і впровадження технології відновлення зношених мідних контактів електропневматичних контакторів електровозів ВЛ8", шифр НТО/Т-32-00/НЮ-349, державний реєстраційний номер 0101U002581, а також за планом Наукової ради НАН України з комплексної проблеми "Наукові основи електроенергетики" (1997-2002р.р.).

Мета роботи. Метою роботи є підвищення експлуатаційної надійності роботи та здешевлення ремонту силових контактних з'єднань електропневматичних контакторів електровозів постійного струму шляхом заміни чи відновлення мідних контактів композиційними матеріалами (псевдосплавами).

Задачі досліджень.

Провести аналіз особливостей роботи і видів пошкоджень електропневматичних контакто-

рів електровозів та виконати попередній вибір провідникових матеріалів для напайок на контакти.

Виконати експериментальні, в умовах реальної експлуатації електровозів ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, дослідження зміни контактного опору, температури і процесу зношення контактів із різних матеріалів.

Розробити математичні моделі та методики оцінки технологічної та експлуатаційної стабільностей, а також показників параметричної надійності контактів із різних матеріалів за критеріями контактного опору, температури та їх зносу.

Виконати порівняльний техніко-економічний аналіз працездатності різних матеріалів в якості контактних напайок силових контактів контакторів.

Розробити технологічну інструкцію по підготовці та заміні чи відновленню зношених мідних контактів напайками із найбільш надійного матеріалу. Впровадити результати досліджень в одному локомотивному депо залізниць України.

Об'єкт досліджень - процеси експлуатації та ремонту тягового електрорухомого складу залізниць України.

Предмет досліджень - ремонт електричної апаратури електровозів.

Методи досліджень - Для оцінки показників надійності контактів застосовували методи математичного моделювання, математичної статистики та надійності. Вимірювання величини зношення контактів здійснювали інструментальними методами. Фазовий склад, структуру та механічні властивості електроконтактних матеріалів досліджували металофізичними методами на приладах ДРОН-2, МІМ-8, ПМТ-3. Шорсткість поверхні напайок контактів вимірювали на профілометрі типу А1. Спад напруги на контактах вимірювали методом амперметра-вольтметра, температуру – за допомогою термометра ТТ-Ц016 з термопарою ХА(К)-10, контактний опір – компенсаційним методом. Обробку експериментальних даних проводили на ПЕОМ, використовуючи методи математичної статистики. Експериментальна перевірка основних положень роботи виконана на діючому електрорухомому складі (ЕРС).

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується адекватно обраним математичним апаратом, проведенням експериментальних досліджень з достатньою збіжністю одержаних теоретичних та практичних результатів, позитивними результатами використання розробок на діючому електрорухомому складі.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше одержано аналітичні вирази контактного опору і вольтамперних характеристик контактних з'єднань силових кіл електровозів з врахуванням температурної залежності, мікротвердості і питомих опорів матеріалів контактів і плівки на них, а також впливу контактного тиску на шорсткі поверхні контактів, чим враховуються особливості конструкції і умов роботи електропневматичних контакторів електровозів й тим самим уточнюються показники експлуатаційної надійності.

2. Запропоновано двомірну модель і новий спосіб оцінки показників параметричної надійності роботи сильноточкових контактів силових кіл електровозів за критеріями їх зносу і контактного опору, які відрізняються від існуючих моделі та способу врахуванням кореляційного зв'язку між контактним опором і температурою контактів.
3. Вперше встановлено закономірності зношування силових контактів, що відновлені різними матеріалами, електропневматичних контакторів електровозів постійного струму та зміни їх контактного опору від пробігу електровоза, сили і тривалості протікання тягового струму, кількості переключень контакторів в умовах реальної експлуатації електровозів.
4. Одержано аналітичний вираз температури власне поверхні контактної з'єднання контакторів в перехідному режимі роботи з врахуванням зміни за часом тягового струму і впливу температури контактів на питомий опір їх матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів.

На базі результатів натурних ресурсних випробувань контактів електропневматичних контакторів електровозів постійного струму ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11 відпрацьовано і надано Придніпровській залізниці технологічні рекомендації по заміні мідних контактів контактами з напайками із матеріалу МДК-3.

Розроблено інженерну методику оцінки показників параметричної надійності за критерієм зносу та контактного опору.

Розроблено і запропоновано Укрзалізниці ввести в Правила ремонту електровозів технологічні інструкції по підготовці та напайці напайок із композиційних матеріалів.

Виробникам електропровідних композиційних матеріалів, зокрема, акціонерному товариству "Теконт" (м. Вінниця), фізико-механічному інституту НАН України (м. Львів) та відкритому акціонерному товариству "Львівський локомотиворемонтний завод" (м. Львів) видано рекомендації по удосконаленню технологій виготовлення напайок для силових контактів електровозів.

У локомотивному депо Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці впроваджена нова технологія відновлення напайками із псевдосплаву МДК-3 зношених мідних силових контактів електропневматичних контакторів типу ПК електровозів постійного струму. Щорічний економічний ефект від впровадження складає 550...560 грн. на один електровоз без врахування митних витрат на закупівлю мідних контактів за кордоном. При врахуванні Виробником напайок з МДК-3 запропонованих в роботі зауважень і рекомендацій надійність контактів, що відновлені МДК-3, підвищиться, собівартість зменшиться, а економічний ефект від їх впровадження зросте.

Особистий внесок автора у роботах, опублікованих у співавторстві: Автор самостійно сформулював мету, задачі досліджень, наукові положення. Крім цього, в публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, автору належать: в [1,3,4,9] – розробка математичних моделей формування відмов за критерієм зносу для оцінки показників надійності контактів електропневматичних контакторів; [7,10] – виконання експериментальних

досліджень, визначення властивостей матеріалів, систематизація результатів; [8] – чисельна оцінка раціонального міжремонтного пробігу електровозів. Роботи [2,5,6,11] написані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати доповідались та одержали схвалення на таких Міжнародних науково-технічних конференціях: “Технологии ремонта машин, механизмов и оборудования (Ремонт-99)”, Київ, 1999р.; “Надежность машин, механизмов и оборудования”, Київ, 2000р.; 11-й “Проблеми розвитку рейкового транспорту”, Луганськ, 2001р.; 12-й “Проблеми розвитку рейкового транспорту”, Луганськ, 2002р.; на семінарах “Перетворювачі енергії в технологічних процесах транспорту” при Науковій Раді НАН України з комплексної проблеми “Наукові основи електроенергетики”.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 12 наукових працях, у тому числі: 8- у фахових виданнях, 3- у матеріалах конференцій, 1– у звіті про науково-дослідну роботу.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, що викладені на 181 сторінці машинописного тексту і які містять 100 рисунків і 23 таблиці, переліку літературних джерел із 90 найменувань, що викладений на 8 сторінках, 2 додатків на 10 сторінках. Ілюстрації (рисунки) і таблиці, які розміщені на окремих сторінках дисертації, займають 37 сторінок. Повний об’єм дисертації складає 199 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність досліджень, сформульована мета і завдання досліджень, приведені основні наукові положення та результати, що винесені на захист, а також відомості про практичне значення результатів роботи, їх апробацію і публікацію матеріалів дослідження.

У першому розділі розглянуті питання, що пов’язані з експлуатацією контактів електричних апаратів, проведено аналіз вітчизняних та зарубіжних публікацій на предмет дослідження зносу і відновлення контактів. Виявлено, що за останні 20...30 років силові контакти практично не були досліджені. Дослідження впливу надійності мідних силових контактів електропневматичних контакторів на надійність всього електровоза в умовах експлуатації не проводились взагалі.

Проведений в дисертації аналіз роботи електровозного парку постійного струму на ділянках залізниць України показує, що в силовій схемі електровозів найбільш вразливими є контакти лінійних і реостатних контакторів. Основним показником, що характеризує надійність роботи контакторів, є термін експлуатації контакт-деталей (губок) за критерієм швидкості їх зносу.

За отриманими даними до бракувального розміру (3,5 мм) при постановці нових мідних контактів (товщина в робочій зоні 10 мм) працює всього близько 10% контактів. До товщини 5 мм, при якій з ремонту електровоз видавати заборонено, працює близько 20% губок. Решту контактних губок вибраковують через оплавлення контактної поверхні - 10%; порушення профілю робочої поверхні – 15%. Останні види пошкоджень виявляють при ТО-2, 3 або при ПР-1 і такі контакт-

ні губки вибраковуюють через 10...18 тис. км. пробігу, що призводить до збільшення обсягу робіт.

Розглядаючи загальні причини виходу з ладу контакт-деталей, можна виділити три їх групи: підгоряння, стирання, злом губки, які обумовлені цілою низкою факторів: неякісним контактом губок; кріпленням контактних губок до контактотримача; площею прилягання; якості обробки та зачистки контактів; неправильного розташування рухомих контактів відносно нерухомих, вираженого в малій зоні протікання робочих струмів; та несправності притираючої пружини, від якої залежить величина контактного тиску, що також не завжди задовольняє вимогам правил ремонту.

Таким чином, як витікає з аналізу, ненадійна робота міді, як контактного матеріалу, вимагає її заміни більш якісним матеріалом.

У другому розділі викладено методики експериментальних досліджень, визначено місце випробовувань, кількість необхідних спостережень при експериментальних випробуваннях та методи досліджень технологічних характеристик електропровідних матеріалів і напайок з них.

Третій розділ присвячено вибору провідникового матеріалу для напайок на контакти, дослідженню важливих з точки зору якісної експлуатації характеристик напайок, а саме: шорсткості їх поверхні і мікротвердості матеріалу.

Для експлуатаційних випробовувань в якості матеріалів для напайок на контакти були взяті такі матеріали (за порядковими номерами): №1 - композиційний матеріал (псевдосплав) МДК-3 виробництва АТ "Теконт", м. Вінниця, Україна (співавторство - Баб'як М.О.); №2 – композиційний міднографітовий (порошковий) МГр, виробник - завод "Красная звезда", м. Стаханов, Україна; №3 – електролітичне композиційне покриття типу ФМІ виробництва фізико-механічного інституту НАН України, м. Львів (співавторство - Баб'як М.О.); №4 – мідь профільна тверда, типу М1, ГОСТ 859-66, згідно технічних вимог оловянована ГХ603-10, виробництва ЗАО НПФ "Металл-Комплект", Росія; №5 – мідь лита МЛ, виробництва ВАТ "Львівський локомотиворемонтний завод", Україна; №6 - мідь профільна тверда, типу М1 (в роботі М1зн), виробник - Росія. З цим матеріалом досліджували зношені контакти (для порівняння з новими).

У роботі встановлено що, нормативна величина тиску F_k головних (силових) контактів, що дорівнює 270Н, витримується лише на 50% контакторів; при цьому $\overline{F_k} = 274,4Н$, а $\sigma_{F_k}^2 = 32,11Н$. Зі збільшенням F_k поверхня контактів стає більш гладкою і шорсткість S_m зменшується. Помітний вплив на зменшення шорсткості чинить також кількість вмикання контактора.

Величина контактної опору R_k не є єдиною значущою характеристикою контактної з'єднання тому, що R_k залежить від температури T контактів, а теплові процеси в контактному з'єднанні визначають його працездатність. При збільшенні спаду напруги U_k контактної з'єднання збільшується T і досягається таке її значення, при якому починається розм'якшення (пластична деформація) матеріалу контактів, тобто структурна їх зміна, яка призводить до зміни механічних властивостей і далі до їх зварювання, що призводить до аварійної роботи контактної з'єднання. Тому температура контактної з'єднання повинна бути також (разом з R_k) обов'язково контрольованим параметром. Згідно з

ДСТУ 2773-94 для номінального режиму роботи комутуючих контактів з міді перевищення величини T відносно температури навколишнього середовища $T_{н.с.}$ не повинно бути більшим за $+75^{\circ}\text{C}$.

У четвертому розділі досліджено технологічну і струмову стабільності та параметричну надійність контактів за критеріями контактного опору і температури. Для цього вперше отримано аналітичний вираз контактного опору контактного з'єднання силових контакторів електровозів у вигляді:

$$R_k = 3,2 \cdot \lg \left[1,43 \left(1 + \frac{\delta}{\ell} \right) \right] \cdot \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \cdot \frac{\ell}{F} +$$

$$+ \frac{\pi \cdot \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \cdot H_{\mu_0} \cdot \left(T_{нл}^{2/3} - T^{2/3} \right) \cdot (S_{m0} - k_1 \cdot F_k)^{5/3}}{1 \cdot \left(T_{нл}^{2/3} - T_o^{2/3} \right) \cdot F_k \cdot 0,4 \cdot (R_{a0} - k_2 \cdot F_k)^{2/3}} +$$

$$+ \frac{\sigma}{\left(1 - 0,4 \frac{(R_{a0} - k_2 \cdot F_k)^{2/3}}{(S_{m0} - k_1 \cdot F_k)^{2/3}} \right) \cdot b \cdot \Delta} \cdot [1 - \alpha(T - T_o)] , \quad (1)$$

де T_0 – температура “ненагрітих контактів”, “кімнатна”, переважно $+20^{\circ}\text{C}$;

$T_{нл}$ – температура плавлення матеріалу контакт-деталей;

δ – товщина провідника (контактного з'єднання);

ℓ – довжина контактного з'єднання;

ρ_0 – питомий електричний опір матеріалу при T_0 ;

α – температурний коефіцієнт матеріалу контактів відносно електричного опору;

H_{μ_0} – мікротвердість матеріалу контактів при T_0 ;

S_{m0} – середній крок початкової нерівності мікропрофілю поверхні;

R_a – середнє арифметичне відхилення мікропрофілю поверхні нових контактів;

k_1, k_2 – постійні апроксимації, що визначають з експериментів;

F_k – контактний тиск;

Числова оцінка R_k при $T = T_0$ для контактів із різних досліджуваних в роботі матеріалів за середніми значеннями величин, що входять до (1), наведена в таблиці 1.

Таблиця 1 - Середні значення контактного опору $\overline{R_k}$ при $T_0 = +20^{\circ}\text{C}$ контактів електропневматичних контакторів електровозів постійного струму

Матеріал контактів	МДК-З	МГр	ФМІ	Мідь М1	Мідь МЛ	мідь М1зн
$\overline{R_k}(T_0), 10^{-6}, \text{Ом.}$	20,93	39,4	8,02	16,45	9,8	10,2

Оскільки середні значення $\overline{R_k}$ не характеризують усі можливі значення контактного опору, бо в формулах усі величини, за винятком $T_0, T_{нл}, k_1$ та k_2 , є випадковими, а отже і R_k носить імовірнісний характер, в подальшому проаналізовано технологічну стабільність R_k для усіх видів контактів для $T = T_0$ на основі формули (1), для чого одержано вираз дисперсії контактного опору:

$$\sigma_{R_{ko}}^2 = \left(\frac{\partial R_K}{\partial b}\right)^2 \cdot \sigma_{b_o}^2 + \left(\frac{\partial R_K}{\partial l}\right)^2 \cdot \sigma_{l_o}^2 + \left(\frac{\partial R_K}{\partial \Delta}\right)^2 \cdot \sigma_{\Delta_o}^2 + \left(\frac{\partial R_K}{\partial \rho}\right)^2 \cdot \sigma_{\rho_o}^2 +$$

$$+ \left(\frac{\partial R_K}{\partial H_\mu}\right)^2 \cdot \sigma_{H_\mu o}^2 + \left(\frac{\partial R_K}{\partial S_m}\right)^2 \cdot \sigma_{S_m o}^2 + \left(\frac{\partial R_K}{\partial F_K}\right)^2 \cdot \sigma_{F_K o}^2 + \left(\frac{\partial R_K}{\partial R_a}\right)^2 \cdot \sigma_{R_a o}^2 + \left(\frac{\partial R_K}{\partial \sigma}\right)^2 \cdot \sigma_{\sigma o}^2. \quad (2)$$

Для визначення власного допуску використані дані, які було одержано в результаті натурних дослідів над контактами електропневматичних контакторів типу ПК електровозів ВЛ8. Значення вагових коефіцієнтів у формулі (2) наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 - Числові значення вагових коефіцієнтів (знак квадрату опущено) у формулі (2) для $\sigma_{R_{ko}}^2$

Матеріал контактів	Вагові коефіцієнти при стандартних відхиленнях параметрів, тобто при:								
	$\sigma_{b_o}^2$	$\sigma_{l_o}^2$	$\sigma_{\Delta_o}^2$	$\sigma_{\rho_o}^2$	$\sigma_{H_\mu o}^2$	$\sigma_{S_m o}^2$	$\sigma_{F_K o}^2$	$\sigma_{R_a o}^2$	$\sigma_{\sigma o}^2$
МДК-3	0,441	0,44	0,821	0,98	0,158	0,257	0,247	0,012	0,0015
МГр	0,543	0,434	0,824	1,0	0,175	0,29	0,266	0,02	0,001
ФМІ	0,39	0,39	0,824	1,4	0,574	0,872	0,96	0,092	0,0016
М1	1,02	1,02	0,86	0,973	3,09	5,2	5,51	0,376	0,0042
МЛ	0,985	0,98	0,83	1,05	2,92	2,82	2,68	0,386	0,004
М13н	0,48	0,48	0,892	1,02	2,14	3,21	3,23	0,248	0,002

Основними параметрами, що характеризують працездатність електроконтактних пар, є їх контактний опір R_K , температура T і товщина губок b . Але на стадії технологічного монтажу (збирання) контакторів температура дорівнює “кімнатній” T_0 , а товщина – товщині нових, не зношених контактів. Тому контрольованим параметром приймається лише контактний опір R_K . І тоді для оцінки параметричної надійності контактів на стадії їх зборки була використана одномірна модель відмов типу “навантаження-міцність”, згідно з якою повинно бути

$$R_K \leq R_{KD}, \quad (3)$$

де R_K , R_{KD} - відповідно поточне (при $T = T_0$) і допустиме значення контактного опору.

Оскільки обидві величини в (3) є випадковими, абсолютна вимога використання нерівності (3) не має сенсу. Можливо лише поставити умову, щоб вона була виконана з тою чи іншою імовірністю. Таким чином, поставлена задача може бути розв’язана в імовірнісному трактуванні.

Введемо “функцію працездатності” F , яка дорівнює

$$F = R_{KD} - R_K > 0. \quad (4)$$

Тоді імовірність порушення нерівності (3) або, що те й саме, імовірність виходу з ладу контакт - деталі за допустиме значення опору R_{KD} визначиться:

$$V = \int_{-\infty}^0 f(F) dF = \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} f_1(F + R_K) \cdot f_2(R_K) dR_K. \quad (5)$$

Якщо випадкові величини R_K і R_{KD} розподіляються за Гауссом, то імовірність V визначається через функцію Лапласа $\Phi(\gamma)$:

$$V = \int_{-\infty}^0 f(F) dF = 1 - \Phi(\gamma), \quad (6)$$

де γ - характеристика резерву, що рівна

$$\gamma = \frac{\overline{R_{KD}} - \overline{R_K}}{\sqrt{\sigma_{R_{KD}}^2 + \sigma_{R_K}^2 + 2r_{R_{KD} \cdot R_K} \cdot \sigma_{R_{KD}} \cdot \sigma_{R_K}}}, \quad (7)$$

де $r_{R_{KD} \cdot R_K}, \sigma_{R_{KD}}^2, \sigma_{R_K}^2$ - коефіцієнти кореляції та дисперсії величин R_{KD} і R_K .

Ще одним показником надійності контакт-деталей в цьому випадку введено коефіцієнт запасу за опором:

$$K_R = \frac{\overline{R_{KD}}}{\overline{R_K}}. \quad (8)$$

Вищевикладені методи дають достатньо точне, але дуже трудомісне визначення імовірності V .

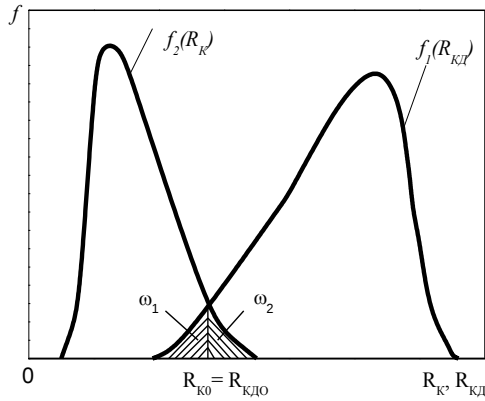


Рисунок 1 - Закони розподілення величин R_K, R_{KD} .

Нижче пропонується більш простий спосіб, до того ж він базується на довільних законах розподілень $f_1(R_{KD})$ і $f_2(R_K)$. Обриваючи криві цих розподілень в точці $R_{KD0} = R_{K0}$ і вводячи позначення для малих площ ω_1, ω_2 , маємо (рис.1):

$$\omega_1 = \int_0^{R_{KD0}} f_1(R_{KD}) dR_{KD}, \quad \omega_2 = \int_{R_{KD0}}^{\infty} f_2(R_K) dR_K. \quad (9)$$

Можна довести, що імовірності відмови V задовольняє нерівність

$$V > \omega_1 \omega_2$$

при будь-якому виборі значення $R_{K0} = R_{KD0}$. Дійсно, добуток $\omega_1 \omega_2$ є імовірністю того, що одночасно $R_K > R_{K0}$ і $R_{KD} < R_{KD0}$; при цьому із розгляду виключені випадкові події $R_K > R_{KD0}$ при $R_{KD} > R_{KD0}$ або при $R_K < R_{K0}$, котрі також відповідають відмовам.

Можна показати, що імовірність безвідмовної роботи Q контактної з'єднання оцінюється як

$$Q = (1 - \omega_1) \cdot (1 - \omega_2). \quad (11)$$

З'єднуючи оцінки V і Q , одержимо:

$$\omega_1 \cdot \omega_2 < V < \omega_1 + \omega_2 - \omega_1 \cdot \omega_2. \quad (12)$$

Введемо також величину, що характеризує гарантію безвідмовної роботи контакт – деталі:

$$Q = 1 - \omega_1 \cdot \omega_2 \quad (13)$$

Аналіз статистичного матеріалу по вимірюванням контактної опору (при $T = T_0$) на контактах електровозів ВЛ8 дозволив встановити, що розподілення R_K контактів із матеріалів МДК і М1 апроксимуються нормальним законом $f(R_K)$ з достатньо високою ймовірністю P (за критерієм Пірсона), що рівна відповідно 0,15; 0,2. Коефіцієнт асиметрії статистичних розподілень також свідчить про близькість емпіричних розподілень теоретичному закону Гаусса. Значення числових характеристик $\overline{R_K}$ і σ_{R_K} і показників надійності на стадії зборки контактів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3- Статистичні характеристики величини контактного опору та показники надійності за критерієм R_k

Матеріал	$\bar{R}_k$, 10^{-6} , Ом	σ_{R_k} , 10^{-6} , Ом	$\bar{R}_k^{max}$, 10^{-6} , Ом	$\sigma_{R_k^{max}}$, 10^{-6} , Ом	$\bar{R}_{KD}$, 10^{-6} , Ом	$\sigma_{R_{KD}}$, 10^{-6} , Ом	$\bar{R}_{KD}^{min}$, 10^{-6} , Ом	$\sigma_{R_{KD}^{min}}$, 10^{-6} , Ом	Показники надійності		
									K_R	γ	V
МДК-3	21,2	5,9	32,531	3,937	68,25	2,85	62,776	1,902	1,929	6,915	$8,1 \cdot 10^{-13}$
МГр	41,2	12,6	65,400	8,409	122,1	12,12	98,821	8,089	1,511	2,864	$5,95 \cdot 10^{-4}$
ФМІ	8,9	2,71	14,104	1,808	88,7	7,23	74,813	4,825	5,304	11,780	0
МІ	16,5	4,67	25,469	3,116	73,15	2,05	69,212	1,368	2,717	12,850	0
МЛ	10,1	2,91	15,689	1,942	51,2	2,13	47,109	1,421	3,002	13,054	0
МІзн	11,1	3,42	17,668	2,282	76,8	3,2	70,653	2,1355	3,998	16,949	0

Статистичні розподілення R_k із матеріалів ФМІ, МІзн, та МГр (рис. 2) з імовірністю $p = 0,12 - 0,26$ (за критерієм χ^2 – Пірсона) підкоряються теоретичному розподіленню імовірностей суттєво позитивних величин.

$$f(R_k) = \frac{1}{\sigma_{R_k} \sqrt{2\pi}} \left\{ \exp \left[-\frac{(R_k - \bar{R}_k)^2}{\sigma_{R_k}^2} \right] + \exp \left[-\frac{(R_k + \bar{R}_k)^2}{\sigma_{R_k}^2} \right] \right\} \quad (14)$$

У зв'язку з цим імовірність відмови V цих контактів знайдена за виразом (10) згідно з рис.1 і,

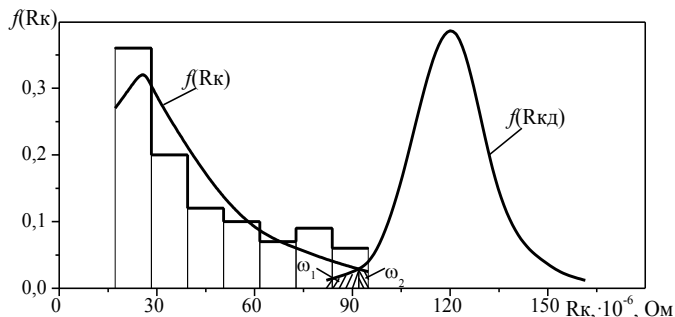


Рисунок 2 - Розподілення поточного (при $T=T_0$) значення контактної опору $f(R_k)$ та його допустимого значення $f(R_{kd})$ для контактів із матеріалу МГр. Визначення імовірності відмови ($V=\omega_1 \cdot \omega_2$) контактів за критерієм R_k на стадії технологічного складання контактів

як приклад, на рис.2 показано визначення V для контактів із МГр ($\omega_1 = 0,0085$; $\omega_2 = 0,0071$; $V = \omega_1 \cdot \omega_2 = 5,95 \cdot 10^{-4}$).

Чисельні результати V наведено в табл.3, із аналізу якої витікає, що досліджувані матеріали і існуюча технологія регулювання контактів забезпечують високі показники надійності на стадії технологічної зборки та монтажу: коефіцієнт запасу K_R дорівнює від ~ 2 до 5, а імовірність від-

мови V навіть для контактів з МГр складає незначну величину, рівну $5,95 \cdot 10^{-4}$, а для МДК-8, $8,1 \cdot 10^{-13}$. Зауважимо, що V для контактів з ФМІ та МІзн дорівнює нулю, бо площі під законами розподілень $f(R_k)$ і $f(R_{kd})$ не перетинаються і тому, згідно з рис.1, імовірності ω_1 і ω_2 дорівнюють нулю.

В роботі досліджено струмову та часову стабільності контактної опору та температури (рис.3 і 4). В процесі експлуатації було одержано залежності $R_k(I)$ при 80% і 100% площах торкання $S_{тор}$ губок, які свідчать про те, що, по-перше, загальний характер зміни $R_k(I)$ таких (зношених частково) контактів подібний до залежностей $R_k(I)$ для нових контактів.

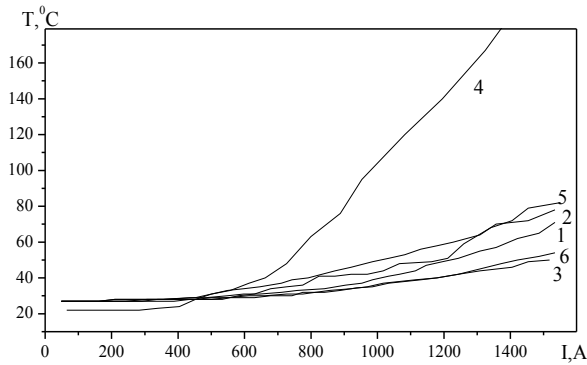


Рисунок 3 - Вплив сили робочого струму контактів на температуру поверхні контактного з'єднання. Номерація кривих згідно номерації матеріалів.

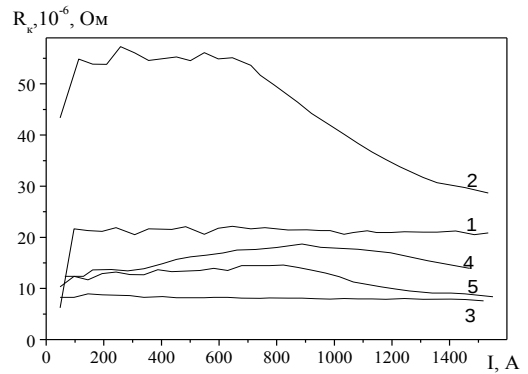


Рисунок 4 - Залежність контактної опору R_k від струму I . Площа поверхні взаємного прилягання 100%. Номерація кривих згідно номерації матеріалів.

По-друге, ступінь зростання R_k при зменшенні поверхні торкання $S_{тр}$ різна у різних матеріалів. Звідси витікає важливість правильного зачищення і регулювання положення контактів на ремонтах. Для контактів без дугогасної камери опір значно менший і приблизно у 1,5...1,8 рази зменшується при зносі контактів до 5 мм та 3 мм при роботі як з дугогасною камерою, так і без неї.

Були виконані дослідження зміни величини R_k при вмиканні електропневматичного контактора, коли контакти проходять три своїх положення: торкання, середнє і робоче.

Встановлено також, що опір контактів не залишається постійним в експлуатації. Аналіз показує, що зміна R_k за часом протікання струму ($I_n=500A$) для досліджених нами контактів відрізняється від якісних $R_k(t)$ при поступовому збільшенні спаду напруги U_k на контактах, які наведено в літературі. Одержані в наших дослідах $R_k(t)$ і $U_k(t)$ мають ступенево-спадаючий характер для контакторів з дугогасними камерами і майже незмінні – для контакторів без камер. Власне, і зростаючий, і спадаючий, і незмінний характер зміни R_k за часом при підвищенні температури T контактного з'єднання пояснюються перевагою тієї чи іншої протилежних дій нагріву матеріалу контактів: збільшенням опору металу контактів чи зменшенням опору поверхневої плівки. Тобто, спостерігається нове явище, яке треба назвати “ступеневим В-фрітінгом” на відміну від відомого (очевидно, одноступеневого) “В-фрітінга”.

Закономірності зміни R_k від температури контактного з'єднання T ідентичні кривим $R_k(I)$ і мають таке ж пояснення, бо підвищення температури здійснювали за рахунок підвищення теплових втрат при зростанні струму, що протікає через контакти.

У роботі виведено формулу зміни в перехідному режимі перевищення температури поверхні контакту над температурою навколишнього середовища у вигляді

$$\Theta_k(t) = T(t) - T_0 = \frac{17,8 \cdot 10^3 \cdot I^2 \cdot R_{ко}^2}{1 - 35,6 \cdot 10^3 \cdot I^2 \cdot R_{ко}^2 \cdot \alpha} + \frac{R_{то} I^2}{(B - \alpha R_{то} I^2)(1 - 35,6 \cdot I^2 \cdot R_{ко}^2 \cdot \alpha)} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (15)$$

де $R_{то}$ - опір тіла губок-контактів при температурі T_0 ;

Θ – перевищення температури тіла контактів над температурою навколишнього середовища $T_{н.с.}=T_0$, найбільше значення якої прийнято $40C^\circ$.

Формула (15) отримана без існуючих в літературі припущень, що $I = \text{const}$, а $\rho \neq f(T)$.

В табл. 4 наведено значення перегріву поверхні контактів із різних матеріалів в перехідному режимі, що знайдені при середньому (згідно статистики) і номінальному значеннях струму.

Таблиця 4 - Визначення перегріву контактів Θ_k для різних матеріалів

Тип матеріалу	I, А	τ, хв.	Θ _{к_у} , °С	Θ _{к_у} , °С	Θ _{к_у} , °С	Θ _{к_у} , °С	Θ _{к_у} , °С
	I _н , А		(t=0), хв.	(t=10), хв.	(t=40), хв.	(t=80), хв.	(t=100), хв.
МДК-3	307,8	8,87	0,73	18,18	26,24	26,53	26,53
	500	11,28	1,94	53,52	87,09	89,58	89,65
МГр	307,8	13,34	2,61	40,14	70,06	73,52	73,69
	500	30,48	6,90	132,6	333,5	422,3	446,31
ФМІ	307,8	9,40	0,10	6,45	9,66	9,80	9,80
	500	10,05	0,28	17,54	27,16	27,66	27,67
М1	307,8	8,90	0,45	13,01	18,86	19,06	19,07
	500	10,21	1,20	36,60	56,73	57,85	57,87
МЛ	307,8	8,63	0,16	7,51	10,78	10,88	10,88
	500	9,32	0,42	20,57	30,62	31,03	31,04
М13н	307,8	8,66	0,17	7,84	11,26	11,37	11,37
	500	9,40	0,46	21,52	32,16	32,61	32,62

Для оцінки параметричної надійності за критеріями контактний опір R_k та температура T (крім товщини) в роботі розроблено і застосовано двомірну імовірнісну модель типу „навантаження – міцність”, згідно з якою контакт – деталь нормально функціонує, якщо одночасно за визначений термін експлуатації:

$$R_k \leq R_{kd}, \quad T \leq T_d, \quad (16)$$

$$\text{або} \quad R_{kd} - R_k = H_1 > 0, \quad T_d - T = H_2 > 0. \quad (17)$$

Кількісною мірою працездатності контактного з'єднання у цьому випадку є імовірність одночасного виконання обох умов (17). Тобто задача полягає в знаходженні імовірності безвідмовної роботи контактів

$$P_{1,2} = \text{Iмов}(H_1 > 0, H_2 > 0) = \text{Iмов}[S_1 < H_1 < S_2; S_3 < H_2 < S_4] = \int_{S_1}^{S_2} \int_{S_3}^{S_4} f(h_1, h_2) dh_1 \cdot dh_2, \quad (18)$$

де $f(h_1, h_2)$ – густина сумісного розподілення величин H_1, H_2 в будь-який момент часу (чи пробігу).

Зокрема, при гауссовому розподіленні величин H_1, H_2 імовірність $P_{1,2}$ визначається за формулою:

$$P_{1,2} = \frac{1}{2} [\Phi(\gamma_1) + \Phi(\gamma_2)] - O(\gamma_1, \alpha_1) - O(\gamma_2, \alpha_2), \quad (19)$$

де $\Phi(\gamma)$, $O(\gamma, \alpha)$ – табульовані функції відповідно Лапласа і Оуена;

Імовірність $P_{1,2}$ можливо визначити і приблизно, користуючись виразом:

$$P_{1,2} = \Phi(\gamma_1)\Phi(\gamma_2) + [\Phi(\gamma_*) - \Phi(\gamma_1)\Phi(\gamma_2)] \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin \rho_{12}, \quad (20)$$

де $\gamma_* = \min(\gamma_1, \gamma_2)$;

ρ_{12} - коефіцієнт кореляції величин H_1 та H_2 .

Як показали результати експлуатаційних випробувань контактів, теоретичні розподілення

R_k і T підкоряються закону Гаусса зі значеннями параметрів, наведеними в таблицях 5 і 6.

Таблиця 5 – Статистичні характеристики розподілення контактної опору, визначеного під час стендових випробувань.

Тип матеріалу	МДК-3	МГр	ФМІ	М1	МЛ	М1зн
$\overline{R_k}, 10^{-6}, \text{Ом}$	43,67	70,05	19,55	19,38	13,13	27,92
$D_{R_k}, 10^{-12}, \text{Ом}^2$	721,85	957,15	97,07	145,10	6,23	251,1
$\sigma_{R_k}, 10^{-6}, \text{Ом}$	26,78	30,94	9,85	12,05	2,5	15,85
Коефіцієнт асиметрії	0,28	0,89	0,12	1,36	-0,37	0,82
Екссес	-1,53	0,55	-1,49	0,3	-1,23	-0,75

Таблиця 6 – Статистичні характеристики розподілення температури, визначеної під час стендових випробувань.

Тип матеріалу	МДК-3	МГр	ФМІ	М1	МЛ	М1зн
$\overline{T}, ^\circ \text{C}$	50,60	57,13	50,92	52,02	50,35	47,13
$D_T, (^{\circ} \text{C})^2$	285,02	355,96	458,28	2803,50	288,35	231,01
$\sigma_T, ^\circ \text{C}$	16,88	18,87	21,41	16,90	16,98	15,20
Коефіцієнт асиметрії	0,02	-0,37	0,82	-0,06	0,38	0,25
Екссес	-1,33	-1,43	-0,46	-1,49	-1,15	-1,32

Використовуючи статистичні дані було отримано параметри виразів (19), (20), які дозволили визначити шукану імовірність $P_{1,2}$ безвідмовної роботи контактів із різних матеріалів за критеріями контактної опору і температури (з врахуванням їх кореляції) при зміні в експлуатаційних умовах тягового струму через контакти в межах 50...1500 А. Результати розрахунків $P_{1,2}$ за формулами (19) (чисельник) і (20) (знаменник) наведено в табл. 7. В реальних умовах експлуатації електровозів ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11 тривалість роботи контактів навіть при $I_H=500\text{А}$ невелика, тому значення $P_{1,2}$ у номінальному тяговому режимі будуть вищі, ніж у табл.7.

Таблиця 7 – Імовірність безвідмовної роботи контактів за критеріями R_k і T .

Матеріал контактів	МДК-3	МГр	ФМІ	мідь М1	мідь МЛ	мідь М1зн
$P_{1,2}$	0,965	0,892	0,892	0,968	0,967	0,985
	0,971	0,890	0,890	0,970	0,961	0,981

П'ятий розділ присвячено дослідженню параметричної надійності контакторів при граничному стані за зносом контактів.

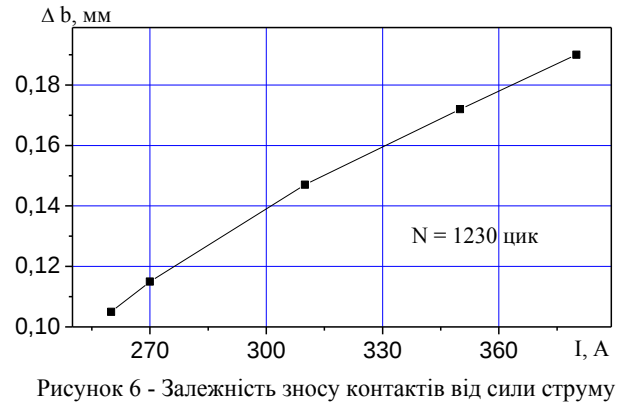
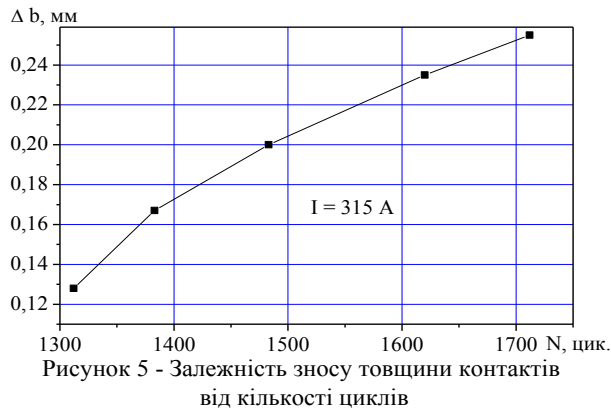
Встановлено, що під час експлуатації спостерігається технологічний та експлуатаційний знос контактів; технологічний знос занадто великий. Так, для міді М1 при обробці на верстаті під час капітального ремонту знімається шар металу товщиною 1...2,5 мм, що призводить до втрати 5...21г металу. При обробці напильником при технічних оглядах чи періодичних ремонтах знімається 0,2...1,3 мм (1,5...2г), а при обробці контактів, знятих з електровоза, - до 4...8 г міді.

Впродовж всього терміну експлуатації контактів велись спостереження за характеристикою зношення. При візуальному контролі стану контактних поверхонь вже після 8...12 тис.км. пробігу на мідно-графітових (МГр) та мідних литих (МЛ) контактах були помічені сліди ушкодження електричною дугою з утворенням ерозійних раковин. Після 12131км пробігу виявлено значне пошкодження електричним струмом робочої зони мідно-графітових контактів, що спонукало до їхньої заміни новими контактами. На мідних контактах (твердотянутих та з напайкою мідної пластини) процес утворення контактної плями (розширення лінії контакту) практично однаковий і в 2...2,5 рази протікає повільніше, ніж на литих мідних контактах. Електролітично осаджений композит ФМІ на першому етапі контролю (10129 км.) зарекомендував себе на рівні твердотянутої міді, а після 50 тис.км. пробігу середня інтенсивність зносу зросла, що викликано зменшенням на окремих контактах осащеного шару. Найкраще зарекомендував себе матеріал МДК-3, який при 82623 км. пробігу мав знос по масі 0,35 г., а по товщині в робочій зоні - 0,03 мм на 10000 км пробігу електровоза. На відполірованих контактних поверхнях пластин МДК-3 відсутні раковини від дії електричної дуги. Ширина контактної лінії становить 1...1,3 мм при відповідній лінії 9...23 мм на мідних контактах.

Аналіз реалізацій зміни товщини b контактів-губок в залежності від пробігу ℓ електровозів, свідчить що усі залежності $b(\ell)$ є монотонно-спадаючими і сильно переплітаються, до того ж зміна $(db/d\ell)$ носить випадковий характер і тому весь процес $b(\ell)$ може розглядатися, як нестаціонарний випадковий. Тому подальше опрацювання кривих зносу виконували імовірісно-статистичними методами.

Знос контактів також залежить від кількості їх переключень N та сили струму I , що комутується, тому в процесі випробувань були визначені ці величини. Встановлено, що в середньому на 10^4 км пробігу контактні елементи здійснюють приблизно 1100-1700 комутацій, а тягові струми мають розкид 89,3 А при середньому значенні 290 А. Залежності зносу по товщині від кількості переключень N і сили струму I практично лінійні (рис.5 і 6) з коефіцієнтом пропорційності $K = (2...2,2) \cdot 10^{-7} \text{ мм} / \text{А} \cdot \text{цикл}$, рівним для міді М1. Значення середньої інтенсивності зносу по масі і товщині наведено в табл.8, уже з якої витікає, що в середньому найбільш зносостійким є композит-сплав МДК-3.

В роботі виконано оцінку показників параметричної надійності контактів за критерієм зносу за відомим методом часу (в нашому випадку пробігу ℓ) безвідмовної роботи. Для цього, користуючись реалізаціями зносу, було одержано пробіги ℓ роботи контактів до параметричної відмови (тобто їх ресурси). Під останньою в цій роботі було прийнято повне зношення напайки контакту товщиною $b_{\text{гр}}=2\text{мм}$, виконаної із кожного матеріалу. Ці пробіги є випадковими величинами ℓ , результати статистичної обробки яких для кожного матеріалу наведено в таблиці 9.



Таблиця 8 - Результати випробовувань контактів, відновлених псевдосплавами

Матеріал контактної поверхні	Маса, г		Товщина, мм		Серед. пробіг, тис.км	Середня к-сть переключень	Інтенсивність зносу за	
	Початкова	Кінцева	Початкова	Кінцева			масою, г	товщиною, мм
МДК-3	117,71	114,88	10,3	10,1	82623	11000	0,343	0,03
МГр	83,39	82,62	9,87	9,23	13600	2029	0,566	0,3
ФМІ	100,92	96,73	9,57	8,84	82088	10929	0,51	0,141
М1	114,67	112,6	10,3	9,29	52241	6955	0,396	0,181
МЛ	108,8	105,69	9,8	8,7	70851	9953	0,439	0,151
М1зн	102,9	96,63	8,9	7,3	76265	10933	0,822	0,191

Апроксимацію статистичних розподілень пробігу ℓ до відмови контактів здійснювали за наступними теоретичними розподіленнями: нормальним, логарифмічно - нормальним, Вейбулла і гама-розподіленням. Перевірку відповідності теоретичних законів $f(\ell)$ гістограмам вели за критерієм Пірсона. В результаті встановлено, що з імовірністю $p=0,16...0,19$ для контактів з МДК, МГр і М1 та з імовірністю $p=0,14...0,17$ – для контактів із ФМІ, МЛ і М1зн теоретичним розподіленням $f(\ell)$ є гама-розподілення, для якого далі визначена імовірність безвідмовної роботи $P(\ell)$ контактів із різних матеріалів для пробігів L_p , відповідно до планових ТО-3 ($L_p = 11$ тис.км), ПР-1 ($L_p = 22$ тис. км), ПР-2 ($L_p = 165$ тис. км) і ПР-3 ($L_p = 330$ тис. км) електровозів постійного струму (табл. 9) за виразом:

$$P(\ell) = \text{Імов}(\ell < L_p) = \int_{L_p}^{\infty} \frac{\lambda^r \cdot \ell^{r-1} \cdot e^{-\lambda \cdot \ell}}{\Gamma(r)} d\ell, \quad (21)$$

де $\Gamma(r)$ – гама-функція Ейлера.

Також було визначено значення γ - відсоткового ресурсу L_γ контактів (табл. 10).

Як витікає з аналізу табл. 9 і 10, найбільш надійними (в 1,75...2,1 рази у порівнянні з мідними з М1), тобто найбільш зносостійкими, а отже довговічними, є контакти з МДК-3. Наприклад, 10% накладок контактів будуть зношені на товщину, більшу $\delta \geq 2$ мм, при пробігах (тис. км): для матеріалу МДК-172,0; ФМІ-73,3; М1-92,4; МЛ-78,0. Найменш придатними для контактів електропневматичних контакторів електровозів є напайки із мідно-графітової суміші.

Таблиця 9 - Імовірність безвідмовної роботи контактів за критерієм зносу

Матеріал контактів	Емпіричні дані пробігів до відмови		Параметри гама-розподілення		Імовірність безвідмовної роботи для пробігів до ремонтів (в тис.км)			
	$\bar{\ell}$, тис.км.	σ_{ℓ} , тис.км.	$\lambda, \times 10^{-3}$ 1/тис.км	r	ТО-3, 13,0	ПР-1, 26,0	ПР-2, 170,0	ПР-3, 340,0
МДК	517,716	304,637	5,579	2,89	1,0	0,9995	0,92	0,67
МГр	61,341	62,235	15,837	0,97	0,85	0,7	0,093	0,008
ФМІ	118,748	38,758	79,05	9039	1,0	0,9996	0,12	0,0001
М1	305,404	196,566	7,904	2,41	1,0	0,995	0,74	0,40
МЛ	142,975	57,267	43,60	6023	1,0	0,9996	0,35	0,0015
М13Н	92,059	37,780	64,50	5,94	0,9999	0,995	0,035	0,0001

Таблиця 10 - γ - відсоткові ресурси L_{γ} (тис.км) контактів електропневматичних контакторів електровозів ВЛ8.

Рівень надійності, $\gamma, \%$	97	95	90	80	70	60	50
Матеріал контактів	γ -відсоткові ресурси L_{γ} (тис.км)						
МДК	111,131	134,433	171,84	250,940	310,090	376,412	448,109
МГр	0	1,263	6,630	14,523	22,072	33,460	40,412
ФМІ	58,191	63,251	73,371	86,021	98,039	104,364	113,852
М1	50,607	63,291	92,41	132,911	177,215	221,407	265,690
МЛ	57,340	64,220	77,982	93,578	110,092	123,853	134,174
М13Н,	37,209	40,310	49,612	58,915	71,318	80,620	88,372

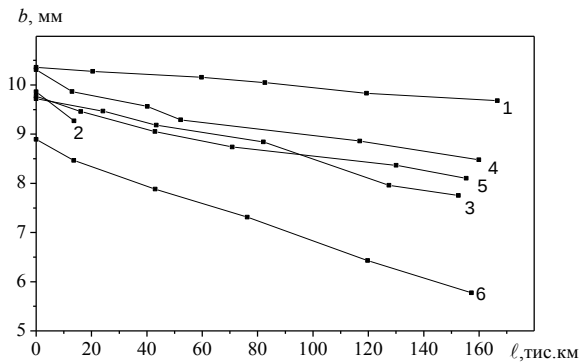
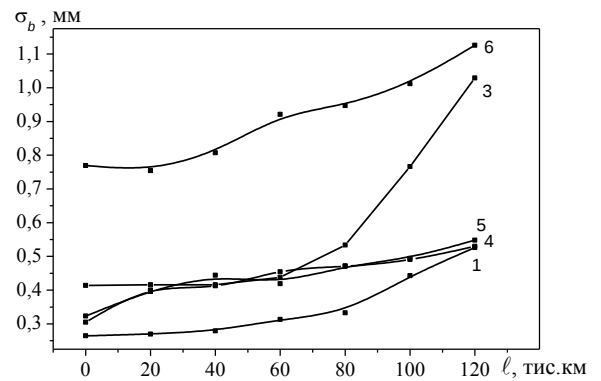
Рисунок 7 - Залежність середньої товщини b контактів від пробігу електровозів; номери кривих відповідають прийнятій нумерації матеріалів.

Рисунок 8 - Залежності середньоквадратичного відхилення товщини контактів від пробігу електровозів; номери кривих відповідають прийнятій нумерації матеріалів.

Користуючись експериментально одержаними залежностями зміни середнього $\bar{b}(\ell)$ та середньоквадратичного $\sigma_b(\ell)$ значень товщини контактів від пробігу ℓ (рис.7, 8) в дисертації розроблено методику і виконано чисельне імовірнісне прогнозування величини імовірності V_b виходу товщини b за встановлений допуск b_d за виведеною формулою

$$V_b = \int_{-\infty}^{b_d} f_{\Sigma}(b) db = \int_{-\infty}^{b_d} \left\{ \frac{1}{L_K - L_0} \int_{L_0}^{L_K} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_b(\ell)} \exp \left[-\frac{(b - m_b(\ell))^2}{\sigma_b^2(\ell)} \right] d\ell \right\} db. \quad (22)$$

Прогнозування величини відмови контактів із різних матеріалів виконано за пробіг до ПР-3, тобто за $L_K - L_0 = (340 \dots 0)$ тис.км. Пробіг до ПР-3 прийнято 340 тис. км як середнє значення норматив-

них періодів до ПР-3 електровозів ВЛ8 (330 тис.км) і ВЛ10, ВЛ11, ВЛ11м (350 тис. км) згідно наказу № 351-Ц від 14.12.99 Укрзалізниці Міністерства транспорту України. Чисельно зазначені імовірності відмови для контактів із основних матеріалів склали: 0,125 - з МДК-3; 0,478 - ФМІ і 0,471 - М1.

Таким чином, із прогнозування витікає, що контакти із псевдосплаву МДК-3 у порівнянні з контактами із базового матеріалу (профільної твердої міді М1) у 3,8 рази більш надійні за критерієм зношування. Аналіз також показує, що найменше зношення (по середньому $\bar{b}$) спостерігається для контактів з МДК: інтенсивність зношення дорівнює 0,03 мм/10⁴ км, а найбільше, на порядок більше, (0,3 мм/10⁴ км), для мідно-графітових контактів. Контакти з базового матеріалу, твердої профільної міді М1, зношуються скоріше, ніж з МДК у 6 разів (інтенсивність дорівнює 0,181 мм/10⁴ км).

В роботі запропоновано модель і методику раціонального діагностування товщини контактів, згідно яких для кожного другого ПР-1 в інтервалі 52...60 тис.км губки контактних з'єднань не діагностують і не відновлюють, а залишають до наступного ремонту; при цьому при відновленні чи заміні контактів їх товщина буде складати 7,5...8,5 мм.

У шостому розділі викладена технологічна інструкція, призначена для здійснення процесу відновлення зношених мідних контактів – губок електропневматичних контакторів типу ПК електровозів ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11. Нею передбачається в окремих випадках використання тонкіших контактних пластин псевдосплаву МДК-3, ніж повні мідні напайки, що передбачені кресленнями заводу-виробника.

Виконано аналіз економічної доцільності застосування нових псевдосплавів, особливо МДК-3, для контактних напайок, який переважає мідь за зносостійкістю. Розрахунки показують, що запровадження нового матеріалу передбачає економію матеріальних та технічних засобів, економію на утримання та експлуатацію рухомого складу в цілому. Завдяки своїм якостям застосування псевдосплаву дозволяє скоротити час на ремонт та обслуговування рухомого складу, робочу силу та засоби праці. Річний економічний ефект від впровадження псевдосплаву МДК-3 на кожен електровоз лише одного локомотивного депо становить 44054...56035 грн. в залежності від кількості обробок контактів напильником.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача підвищення рівня експлуатаційної надійності та здешевлення ремонту діючих електровозів постійного струму. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

Мідь в якості електропровідного матеріалу в силових розривних контактах електроапаратури електровозів постійного струму володіє низькою комутаційною зносостійкістю, обумовлює від 21 до 27% відмов електрообладнання, одночасно є дефіцитним матеріалом і тому потребує її заміни більш надійним і менш дефіцитним контактним матеріалом, зокрема, композиційним.

Нормативне значення (270 Н) величини контактного натиску силових контактів контакторів електровозів, від якого лінійно залежить шорсткість контактної поверхні і отже інтенсивність зносу контактів, витримується лише на 50% контакторів, при цьому навіть середнє значення натиску більше нормативного і складає 274,4 Н, а дисперсія – 32,11 Н².

Найбільш об'єктивними контрольованими параметрами силових контакторних з'єднань є контактний опір R_k , температура поверхні T і величина зношення Δb губок – контактів; їх поточні і допустимі значення є випадковими величинами.

Найбільший вплив на технологічну нестабільність контактного опору знеструмлених ненагрітих (при 20°C) силових контактів, особливо мідних, чинять відхилення величини мікротвердості матеріалу, шорсткість та контактний натиск (коефіцієнти ваги складають 2,14...5,51), тому при технологічній збірці контактора треба ретельно обробляти поверхні губок і точніше регулювати величину натиску.

Усі досліджувані контактні матеріали володіють властивостями, які забезпечують високі показники параметричної надійності на стадії технологічної зборки контакторів: коефіцієнт запасу, знайдений за імовірнісною моделлю “навантаження-міцність”, складає від 2 до 5, а імовірність відмови контактів за критерієм контактного опору незначна і дорівнює менше $6 \cdot 10^{-4}$.

Фактичні поточні значення R_k і T контактів, що одержані в умовах експлуатаційної зміни струму від 50 до 1500 А і часу його протікання до 20 хв, не перевищують допустимих значень і, наприклад, для контактів з базового матеріалу (мідь М1) і псевдосплаву МДК-3 складають відповідно $\sim 18,5 \cdot 10^{-6}$ Ом, $\sim 90^\circ\text{C}$ та $\sim 20 \cdot 10^{-6}$ Ом і $\sim 70^\circ\text{C}$. Виключення складають мідно-графітові порошкові контакти, для яких R_k в зазначених умовах наближається до $175 \cdot 10^{-6}$ Ом, що є нижньою допустимою границею опору для цього матеріалу.

Експериментально підтвердженими розрахунками по запропонованій двомірній імовірнісній моделі, яка враховує кореляційний зв'язок між R_k і T , встановлено, що в експлуатаційних умовах протікання тягового струму через контакти в межах 50...1500 А (при $I_n=500$ А) імовірність безвідмовної роботи контактів з МДК-3 та з базового матеріалу, міді М1 за критеріями їх контактбезвідмовної роботи контактів з МДК-3 та з базового матеріалу, міді М1 за критеріями їх контактного опору і температури дорівнює 96,5...97%. Найменш надійними за цими критеріями є мідно-графітові контактні з'єднання, для них імовірність безвідмовної роботи складає 89...89,2%.

Величина сумарного зносу обумовлюється факторами технологічного та експлуатаційного характеру. Технологічний знос великий: так під час капремонту при обробці мідних контактів на верстаті з них знімається шар металу товщиною 1...2,5 мм, тобто 5...21 г міді, а при ручній обробці на ТО-2,3 чи ПР-1,2,3 – відповідно 0,2...1,3 мм, тобто до 1,5...2,0 г.

Згідно регресійним залежностям $\bar{\delta}(l), \sigma_{\delta}(l)$, одержаним за результатами порівняльних експлуатаційних випробувань контактів з різних матеріалів:

найменше зношення (по середньому значенню $\bar{\delta}$) мають контакти з МДК-3, їх інтенсивність зносу складає 0,03 мм/10⁴ км, а найбільше – мідно-графітові з інтенсивністю 0,3 мм/10⁴ км;

контакти з міді М1 (базовий матеріал) зношуються швидше, ніж із МДК-3, в 6 разів (0,181 мм/10⁴ км), але дисперсія величини зносу σ_{δ} псевдосплаву після пробігу 80...100 тис. км зростає швидше, ніж для міді.

Найбільше значення γ -відсоткового ресурсу, наприклад, 250,9 тис. км пробігу при $\gamma=80\%$, за критерієм зносу мають контакти з МДК-3, далі – з М1, МЛ і ФМІ, які мають ресурс менший в 2...3 рази у порівнянні з контактами з МДК-3. Мідно-графітові контакти через 50...60 тис. км майже 100-відсотково виходять з ладу і тому є непридатними для електропневматичних контакторів.

Розрахунками за розробленими в роботі моделлю і методикою імовірнісного прогнозування (з підтвердженими випробуваннями дослідженнями) встановлено, що імовірність відмови контактів за критерієм зносу (до $\delta=8$ мм) за період пробігу 0...340 тис. км (до ПР-3) електровозів ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11 складає 0,125 для контактів з МДК-3, і 0,471 – М1.

В локомотиворемонтному депо Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці та на ВАТ “Львівський локомотиворемонтний завод” впроваджено нові технології ремонту – відновлення зношених мідних силових контактних з’єднань контакторів електровозів ВЛ8, ВЛ10 і ВЛ11 напайками з композиційного матеріалу МДК-3. Щорічний економічний ефект від цього впровадження складає 550...560 грн на кожний електровоз без врахування митних та транспортних витрат на закупівлю дефіцитних мідних контактів за кордоном.

Основні положення та результати дисертації опубліковані у таких працях:

1. Баб’як М.О. Костін М.О. Метод визначення надійності силових контактів електропневматичних контакторів електровозів. //Транспорт. Підвищення ефективності роботи пристроїв електричного транспорту: Міжвузівський зб. наук. пр. – Дніпропетровськ: Січ, 1999. - С. 107–111.
2. Баб’як М.О. Допуски і технологічна стабільність вольт-амперних характеристик комутуючих контактів силових кіл електровозів. //Гірничі електромеханіка та автоматика. Наук. тех. зб. НГУ. Дніпропетровськ, 2000,- вип. 65, - С. 16-21.
3. М.О.Баб’як, Ю.В.Михайленко, М.О.Костін Відновлення спрацьованих губок силових контактів електровозів. // Залізничний транспорт України., 2000, №1 - С. 37-38.
4. Баб’як М.О., Костін М.О. Контактний опір комутуючих контактів силових кіл електрорухомого складу.// Транспорт. Збірник наукових праць ДПТУ, 2001, №7 - С. 15–18.
5. М.О.Баб’як Надійність силових контактів електропневматичних контакторів електрорухомого складу, відновлених псевдосплавами //Вісн. Східноукр. нац. ун-т. – 2001, №7(41) - С. 26-31.
6. Баб’як М.О. Характеристика видів відмов електропневматичних контакторів електровозів.// Гірничі електромеханіка та автоматика. Наук.тех.зб. НГУ. Дніпропетровськ, 2001, вип. 34 (63),- С.77-86.

7. Баб'як М.О. Костін М.О. Експлуатаційне зношення силових контактів електровозів постійного струму // Вісн. Східноукр. нац. ун-т. – 2002, №6(52).-С. 68 - 72.
8. М.О.Костін, М.О.Баб'як, В.В.Артемчук. Модель раціонального діагностування деталей, що зношуються, рухомого складу залізниць.// Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. техн. зб. НГУ - 2001.- Вип. 67. – С. 144-151.

Додаткові праці:

9. Костин Н.А., Михайленко Ю.В., Бабяк Н.А., Сердюк Т.Н. Вероятностные модели оценки надежности контакт - деталей электроаппаратуры электроподвижного состава. ЛУЖЕЛ. The 5th International Scientific Conference of Railway Experts. 1998 - С. 334-336.
10. Бабяк Н.А., Костин Н.А., Гречанюк Н.И., Мардаревич Р.С. Восстановление силовых контактов электроаппаратуры электроподвижного состава псевдосплавами.// Надёжность машин, механизмов, оборудования: Материалы международной научно-технической конференции. Киев: АТМ Украины, 1999. – С. 9-10.
11. Баб'як М.О. Підвищення надійності силових електроапаратів електрорухомого складу залізниць.// Надёжность машин, механизмов, оборудования: Материалы международной научно-технической конференции - Киев: АТМ Украины, 2000.- С. 6-7.

АНОТАЦІЯ

Баб'як М.О. Підвищення надійності силових контактних з'єднань електропневматичних контакторів електровозів постійного струму. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – Електротранспорт. - Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2003.

Дисертація присвячена підвищенню експлуатаційної надійності роботи та здешевленню ремонту силових контактних з'єднань електропневматичних контакторів електровозів постійного струму шляхом заміни чи відновлення мідних контактів композиційними матеріалами (псевдосплавами). У роботі виконано аналіз особливостей роботи і видів пошкоджень електропневматичних контакторів електровозів.

Розроблено двомірну модель і новий спосіб оцінки показників параметричної надійності роботи сильнострумових контактів силових кіл електровозів за критеріями їх зносу і контактного опору з врахуванням кореляційного зв'язку між контактним опором і температурою контактів.

Вперше встановлено закономірності зношування силових контактів, що відновлені різними матеріалами, електропневматичних контакторів електровозів постійного струму і зміни їх контактного опору від пробігу, сили і тривалості протікання тягового струму, кількості переключень контакторів в умовах реальної експлуатації електровозів.

Розроблено модель формування поступових відмов за критерієм зносу, що враховує фізику явищ зношення. На основі результатів виконаних експлуатаційних випробувань розраховано ресурс контактних елементів, відновлених різними матеріалами. Методом імовірнісного прогнозування визначено імовірності відмов за критерієм зносу контактів, відновлених напайками з усіх типів досліджених матеріалів за пробіг до ПР 3.

Розроблено і впроваджено технологію відновлення контактів псевдосплавом МДК-3; подано основні операції технології пайки напайок; розраховано річний економічний ефект.

Ключові слова: надійність, контакт, електропневматичний контактор, напайка, електричний апарат, контактний опір, ресурс, електрорухомий склад, знос, стабільність, псевдосплав.

АННОТАЦИЯ

Бабяк Н.А. Повышение надежности силовых контактных соединений электропневматических контакторов электровозов постоянного тока. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – Электротранспорт. - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2003.

Диссертация посвящена повышению эксплуатационной надежности работы силовых контактных соединений электропневматических контакторов электровозов постоянного тока путем замены или восстановления медных контактов композиционными материалами (псевдосплавами). В работе проведен анализ особенностей работы и видов повреждений электропневматических контакторов электровозов.

Разработана двумерная модель и новый способ оценки показателей параметрической надежности работы силовых контактов силовых цепей электровозов по критериям их износа и контактного сопротивления с учетом корреляционной связи между контактным сопротивлением и температурой контактов.

Впервые определены закономерности изнашивания силовых контактов, восстановленных разными материалами, электропневматических контакторов электровозов постоянного тока и изменения их контактного сопротивления от пробега, силы и продолжительности протекания тягового тока, количества переключений контакторов в условиях реальной эксплуатации электровозов.

Разработана модель формирования постепенных отказов по критерию износа, который учитывает физику явлений износа. На основе результатов выполненных эксплуатационных испытаний рассчитан ресурс контактных элементов, восстановленных разными материалами. Методом вероятностного прогнозирования определены вероятности отказов по критерию износа контактов, восстановленных напайками из всех типов исследованных материалов за пробег до ТР 3.

Разработана и внедрена технология восстановления контактов псевдосплавом МДК-3; представлены основные операции технологии пайки напайки; рассчитан годовой экономический эффект.

Ключевые слова: надежность, контакт, электропневматический контактор, напайка, электрический

аппарат, контактное сопротивление, ресурс, электроподвижной состав, износ, стабильность, псевдосплав.

ABSTRACT

Babjak N.A. Increase of reliability of power contact connections electropneumatic contactor electric locomotives of a direct current. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.22.09 - "Electric Transport". - Dnipropetrovsk national university of railway transportation of name of academician V.Lazarjan, Dnipropetrovsk, 2003.

The dissertation is devoted to increase of operational reliability of work of power contact connections electropneumatic contactor electric locomotives of a direct current by replacement or restoration of copper contacts by composite materials (pseudo-alloys). In work the analysis of features of work and kinds of damages electropneumatic contactor electric locomotives is lead.

The two-dimensional model and new way of an estimation of parameters parametrical reliability work contacts of power circuits of electric locomotives by criteria of their deterioration and contact resistance is developed in view of correlation communication between contact resistance and temperature of contacts.

For the first time laws of wear process of the power contacts restored by different materials, electropneumatic contactor electric locomotives of a direct current and change of their contact resistance from run, force and duration of course of a traction current, quantity of switchings contactor in conditions of real operation of electric locomotives are determined.

The model of formation of gradual refusals by criterion of deterioration which takes into account physics of the phenomena of deterioration is developed. On the basis of results of the executed operational tests the resource of the contact elements restored by different materials is designed. The method of probable forecasting determines probabilities of refusals by criterion of deterioration of the contacts restored by plates from all types of investigated materials.

The technology of restoration of contacts is developed and introduced pseudo-alloy MDK-3; the basic operations of technology of the soldering brazing are submitted; annual economic benefit is designed.

Key words: reliability, contact, electropneumatic contactor, brazing, the electric device, contact resistance, a resource, a rolling stock, deterioration, stability, pseudo-alloy.

Баб'як Микола Олександрович

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИЛОВИХ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ
ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНИХ КОНТАКТОРІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Автореферат

Підписано до друку “ _____ ” _____ 2003 р.

Формат 60x84 1/16. Папір для множильних апаратів. Різограф.

Ум. др. арк. 1,0. Обл.-вид. л.1,0. Тираж 100 екз.

Замовлення № _____. Безкоштовно.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка в. Лазаряна

Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:
49010, Дніпропетровськ, вул. Ак. В.А.Лазаряна 2.