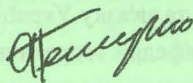


Т 37

✓

**МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

ТЕТЕРКО ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 629.423.02-192

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ
СИЛОВИХ КОНТАКТОРІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 - електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2008

✓

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичних основ електротехніки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДПТУ) Міністерства транспорту та зв'язку України.

**Науковий
керівник:**

доктор технічних наук, професор
КОСТИН Микола Олександрович,
Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В.Лазаряна Міністерства
транспорту та зв'язку України,
завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки.

**Офіційні
опоненти:**

доктор технічних наук, професор
ТАРТАКОВСЬКИЙ Едуард Давидович,
Українська державна академія залізничного транспорту
Міністерства транспорту та зв'язку України, м. Харків,
завідувач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу;

кандидат технічних наук, доцент
ГІЛЕВИЧ Олег Ілліч,
Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В.Лазаряна Міністерства
транспорту та зв'язку України,
доцент кафедри автоматизованого електропривода.

і засіданні спеціалізо-
нальному університеті
ною: 49010, м. Дніпро-
ського національного
яна.

М.Б. Курган

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Більшість електровозного парку залізниць України складають електровози змінного струму серій ВЛ80^Т, ВЛ80^К, ВЛ80^С, ВЛ60, ВЛ40, керування якими здійснюється за допомогою контактних комутаційних апаратів. Аналіз несправностей вузлів та агрегатів цих електровозів показує, що найбільша кількість відмов, до 50%, припадає на електрообладнання. При цьому, до 60...70% всіх відмов електровозів складають відмови електроапаратури і від 10 до 35% приходить на незадовільний стан власне контактних з'єднань електроапаратури, на огляд і ремонт якої витрачаються значні матеріальні та трудові ресурси. Крім цього, проведений аналіз впливу можливих факторів на надійність силових контакторів електровозів змінного струму на залізницях України дозволив виявити, що: до 36% всіх відмов виникає через недоліки конструкції; 36% – за рахунок некоректних умов експлуатації; 28% – за рахунок недостатнього рівня надійності контактних елементів, що застосовують в даних апаратах. Особливо це стосується контакторів групового перемикача ЕКГ-8Ж та індивідуальних електропневматичних контакторів ПК-96-101. В якості матеріалів силових контактів зазначених контакторів використовують: для головних контактів – СОК-15 (КМК-А10-М); для розривних контактів – МВ-70 (КМК-Б25, Б21). Ці матеріали є дефіцитними на території України, а оскільки контакти після технологічного та експлуатаційного зношень потребують заміни, то виникає проблема відсутності запасних частин, що, в свою чергу, призводить до неякісного здійснення ремонтів різних обсягів. Особливо гострим питання заміни та відновлення зношених контактів стало після набуття Україною незалежності, коли "базові виробники" залишилися за кордоном. На їх місце претендують сучасні підприємства, надійність і вартість продукції яких далеко не відповідає встановленим вимогам. Тому для уникнення можливих наслідків використання таких матеріалів, що пропонуються залізничному транспорту в якості контактів силових контакторів електропневматичного складу, потрібні дослідження.

Враховуючи вищевикладене, актуальною постає задача вибору електропровідного матеріалу, як альтернативи срібному та мідно-вольфрамовому сплавам, для використання в якості силових контактів контакторів ЕКГ-8Ж та пневматичних контакторів ПК-96-101 (як найбільш навантажених струмом) електровозів змінного струму. Водночас, дослідження експлуатаційної надійності силових контакторів, відновлених контактами з різних матеріалів, є також актуальною та важливою задачею ремонту тягового рухомого складу електричного транспорту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності з планом науково-дослідних робіт Укрзалізничі на 2006-2008 рр. (наказ № 119 від 10.02.06) за темою "Створення основ та розробка технологій відновлення композиційними матеріалами (псевдосплавами) зношених силових контактів із кольорових металів електроапаратури рухомого складу", шифр 21.03.06.08, № держреєстрації 0106U006489, та згідно договору № 10/03/04 СНЦ та 34-03/176 ЮК "Розробка і впровадження технології відновлення зношених мідних та срібломістких силових контактів електропневматичних контакторів та контакторів ЕКГ електровозів ВЛ80" між ВАТ "Львівський локомотиворемонтний завод" та

Східним науковим центром Транспортної академії України (СНЦ ТАУ), державний реєстраційний номер 0104U003103.

Результати дисертаційних досліджень також узгоджуються з планом Національної ради НАН України з комплексної проблеми "Наукові основи електроенергетики" за тематикою "Розробка та удосконалення пристроїв та систем електричного транспорту".

Мета роботи. Метою роботи є підвищення рівня експлуатаційної надійності та здешевлення ремонту силових електроконтактних з'єднань контакторів електроапаратури електровозів змінного струму шляхом заміни чи відновлення мідно-вольфрамових та срібломістких контактів композиційними матеріалами (псевдосплавами).

Для досягнення поставленої мети в дисертації розв'язані такі основні задачі.

1. Аналіз особливостей роботи та видів відмов контакторів ЕКГ-8Ж та ПК-96 електровозів змінного струму.
2. Попередній вибір електропровідникових матеріалів для напайок на контакти та дослідження їх технологічних характеристик.
3. Отримання аналітичного виразу контактного опору електроконтактних з'єднань контакторів.
4. Дослідження зміни контактного опору, температури і процесу зношування контактів із різних матеріалів в реальних умовах експлуатації електровозів.
5. Розробка методик і чисельна порівняльна оцінка технологічної та експлуатаційної стабільностей, а також показників параметричної надійності контактів із різних матеріалів за критеріями контактного опору та температури.
6. Розробка методик і чисельна порівняльна оцінка показників параметричної надійності контактів із різних матеріалів за критерієм їх зносу.
7. Порівняльний техніко-економічний аналіз при заміні існуючих матеріалів контактних напайок силових контактів контакторів на композиційний (псевдосплав).
8. Розробка технологічної інструкції по підготовці та заміні зношених контактів напайками із найбільш надійного матеріалу; використання результатів досліджень.

Об'єкт досліджень – процеси експлуатації та ремонту тягового електро рухомого складу залізниць України.

Предмет досліджень – електрична апаратура електрорухомого складу.

Методи досліджень – При оцінці показників надійності контактів застосовували методи математичного моделювання, математичної статистики та надійності. Фазовий склад, структуру та механічні властивості електроконтактних матеріалів досліджували металофізичними методами на приладах ДРОН-2, МІМ-8, ПІМТ-3. Шорсткість поверхні напайок контактів оцінювали профілометром типу А1. Температуру нагрівання контактів вимірювали за допомогою термопари типу ТХК, опір контактного з'єднання – за методом вольтметра-амперметра. Вимірювання величини зношування контактів здійснювали інструментальними методами. Обробку експериментальних даних проводили на ПЕОМ.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується адекватно обраним класичним математичним апаратом з теорії імовірностей і надійності, позитивними результатами використання розробок на діючому електрорухомому складі, проведенням в умовах експлуатації експери-

ментальних досліджень з достатньою збіжністю одержаних теоретичних та практичних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Одержано аналітичний вираз контактного опору для розривних контактних з'єднань силових кіл електровозів змінного струму, який відрізняється від існуючого більш точним співвідношенням величин мікротвердості матеріалу, контактного натиску та шорсткості поверхні контактів у виразі їх опору стягування, чим враховуються особливості конструкції та умов роботи контакторів й тим самим уточнюються показники їх експлуатаційної надійності.
2. Розроблено імовірнісні модель і методику оцінки високої (екстремальної) параметричної надійності силових електроконтактних з'єднань електрорухомого складу за критеріями їх контактного опору та зношення, які відрізняються від існуючих моделі та способу тим, що базуються на використанні імовірнісних законів розподілення екстремальних, тобто крайніх, значень статистики вихідної вибірки контактного опору та товщини контактів, що дозволило більш точно оцінити показники надійності контактних з'єднань.
3. Вперше встановлено закономірності зношування силових контактів електроконтактних з'єднань апаратури електровозів змінного струму, відновлених різними композиційними матеріалами, і зміни їх контактного опору від пробігу, сили і тривалості протікання тягового струму, кількості переключень контакторів в реальних умовах експлуатації електровозів.
4. Знайшов подальший розвиток імовірнісно-статистичний метод оцінки стабільності величини контактного опору, в основу якого вперше покладено використання нелінійної функції контактного опору від ряду корельованих величин, що дозволило більш точно оцінити технологічну стабільність контактних з'єднань на стадії їх зборки.

Практичне значення одержаних результатів.

1. За результатами натурних випробувань ресурсу контактів головного контролера ЕКТ-8Ж та електропневматичних контакторів ПК-96-101 електровозів змінного струму ВЛ80Г відпрацьовано і надано Львівській залізниці технологічні рекомендації по заміні мідно-вольфрамових та стрібломістких контактів контактами з напайками із матеріалу МДК-3.
2. Розроблена в роботі інженерна методика може бути застосована для оцінки показників параметричної надійності контактних з'єднань за критерієм зносу, контактного опору та температури нагрівання контактів.
3. Запропоновано Укрзалізниці ввести до Правил ремонту електровозів змінного струму розроблені в дисертації технологічні інструкції по підготовці та напайці напайок із композиційних матеріалів.
4. Виробникам композиційних матеріалів, а саме, акціонерному товариству (АТ) "Геконт" (м. Вінниця), ДП "Аргентум" (м. Львів), ТзОВ ІНТЦ "Диском" (м Чебоксари), ПП "Власов" (м. Запоріжжя) надано рекомендації по удосконаленню технологій виробництва матеріалів для напайок для силових контактів електровозів.
5. В локомотивному депо "Львів-Захід" Львівської залізниці та на ВАТ "Львівський локомотиворемонтний завод" впроваджена технологія відновлення зношених силових контактів контакторів електровозів змінного струму напайками із псевдосплаву МДК-3.

Особистий внесок автора у роботах, опублікованих у співавторстві. Автор самостійно сформулював мету та задачі досліджень, наукові положення. В публікаціях, де відображено основні результати дисертаційної роботи та які написано у співавторстві, автору належать: в [1, 3, 6, 7] – проведення досліджень, систематизація і аналіз результатів, [4] – розробка моделі екстремальної надійності. Роботи [2, 5] виконано автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та одержали схвалення на таких Міжнародних науково-практичних конференціях: 3-ій “Информационная техника и электромеханика”, Луганськ, 2005р.; 66-тій “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”, Дніпропетровськ, 2006р.; 1-ій “Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті”, Дніпропетровськ, 2007р.; “Электрические контакты и электроды”, Крим, Кацивелі, 2007р.; на Міжнародному симпозиумі “Проблеми совершенствования электрических машин и аппаратов”, Харків, 2006р.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 9 наукових працях, у тому числі 7 – у фахових виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, що викладено на 159 сторінках машинописного тексту і які містять 57 рисунків і 26 таблиць, переліку літературних джерел із 116 найменувань на 12 сторінках, 4 додатків на 38 сторінках. Ілюстрації (рисунки) і таблиці, які розміщені на окремих сторінках дисертації, займають 33 сторінки. Повний об'єм дисертації складає 209 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету роботи та основні задачі, які необхідно вирішити для досягнення мети, сформульовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, подано дані про апробацію роботи та публікації.

У першому розділі розглянуто сучасний стан проблеми зношування та надійності контактів електроапаратів, вивчено пропозиції щодо використання матеріалів для електроконтактних з'єднань. Виявлено, що дослідження роботи і надійності комутуючих розривних сильнострумових контакторів високої напруги дуже обмежені; при цьому найчастіше обмежуються стендовими випробуваннями. Оцінку показників надійності здійснюють лише визначенням термінів служби апаратів за аналітичними виразами швидкості зношування контактів. Існуючі математичні моделі та методики оцінки параметричної надійності, у тому числі й електроапаратури електрорухомого складу, базуються на використанні даних повної (вихідної) вибірки значень контрольованих параметрів.

У другому розділі викладено методики експериментальних досліджень, визначено кількість необхідних спостережень, місце та умови проведення експлуатаційних випробувань, а також методи дослідження технологічних характеристик електропровідних матеріалів для напайок на електроконтакти. Приведено методики та прилади вимірювання контактного опору, спаду напруги, температури та величини зношування контактів.

У *третьому розділі* наведено результати аналізу відмов силових контакторів електроапаратури, що виникають при експлуатації електровозів змінного струму на ділянках залізниць України. Найбільш вразливими є розривні контакти контакторів з дугогашенням головного контролера ЕКГ-8Ж та електропневматичних контакторів ПК-96-101, матеріалами контактів яких є дефіцитні срібло, мідь і вольфрам. Аналіз показав, що до бракувальної товщини (2 мм – ЕКГ-8Ж, 0,5 мм – ПК-96-101) зношуються лише 30% напайок на контакти ЕКГ-8Ж і 60% для ПК-96-101. Решту контактів вибраковують через оплавлення контактної поверхні – 10%; порушення профілю робочої поверхні – 25%; утворення раковин на поверхні контакту – 15%; відпадання напайок – 20% для ЕКГ-8Ж. І відповідно для ПК-96: 10% – через відпадання напайок; 8% – оплавлення; 12% – порушення профілю; 10% – утворення раковин. Ці види порушень в роботі електричного контакту підвищують технологічний знос і тим самим зменшують термін служби (ресурс) контакту.

Зазначені вище ненадійна робота контактних матеріалів, їх дефіцит та відносно велика вартість спонукають до пошуку матеріалу для покращення експлуатаційних властивостей електроконтактних з'єднань. З цією метою для натурних випробовувань в реальних умовах експлуатації в якості матеріалів для напайок на розривні контакти ЕКГ-8Ж та ПК-96-101 було вибрано такі композиційні матеріали (за номерами): №3 – КМК-Б25 (КМК-Б21) виробництва "Електроконтакт", м. Кінешма, Росія (постачальник на території України – ТзОВ "Союз Інвест", м. Луганськ); №4 – МВ-70 виробництва "Інтер-Контакт-Пріор", м. Київ; №5 і 6 – КМК-Б21 виробництва приватного підприємства "Власов", м. Запоріжжя, виготовлений двома способами: з просочуванням та без просочування; №9 – МДК виробництва акціонерного товариства "Геконт", м. Вінниця, Україна; №10 – Дискон С16104 на основі дисперсно-зміцненої міді виробництва ТзОВ ІНТЦ "Дискон", м. Чебоксари.

Для використання в якості напайок на головні контакти було вибрано такі композиційні матеріали: №1 – КМК-А10М 321630ПП виробництва Державного підприємства "Аргентум", м. Львів; №2 – КМК-А10М виробництва "Електроконтакт", м. Кінешма, Росія; №8 – МДК виробництва АТ "Геконт", м. Вінниця, Україна (аналогічний використовувався на розривних контактах); №11 – Дискон С16104 виробництва ТзОВ ІНТЦ "Дискон", м. Чебоксари.

В локомотивному депо Львів-Захід в якості напайок на розривні контакти використовують матеріал №6, а на головні контакти – матеріал №1. Отже, саме експлуатаційні властивості цих матеріалів порівняно з іншими матеріалами.

Дослідження основних технологічних характеристик вибраних матеріалів показали, що їх величини є випадковими. При цьому максимальні значення мікротвердості H_μ (≈ 2580 МПа) притаманні молібденовим напайкам (№8, 9). В свою чергу, найменші значення мікротвердості (700...1300 МПа) мають напайки із срібломістких матеріалів, які використовують на головних контактах. Шорсткість поверхні контактів, у вигляді величини середнього кроку нерівностей мікропрофілю поверхні контактів, зменшується від контактного натиску за експоненціальним законом. Виміряне середнє значення натиску F_k по всіх контакторах ЕКГ-8Ж складає 125,3Н як для розривних контактів, так і для головних при необхідних для розривних контактів 120...130Н, а для головних – не менше 120Н. Середнє значення

натиску у контакторів ПК-96-101 для головних контактів складає 154,7Н при нормі не менше 150Н.

В якості контрольованих параметрів при визначенні працездатності контактних з'єднань були прийняті: контактний опір R_k , температура нагрівання контактів T_k та товщина b напайок (губок) на контакти. Встановлено їх допустимі значення.

У *четвертому розділі* викладено результати досліджень технологічної та струмової стабільностей, а також визначена параметрична екстремальна надійність контактних з'єднань контакторів ЕКГ-8Ж і ПК-96-101 за критерієм контактного опору.

Для цього було отримано аналітичний вираз контактного опору контактних з'єднань, який для "ненагрітих" контактів має такий вигляд:

$$R_k(T_0) = \rho_0 \left[1,39 \cdot \frac{l}{F_{np}} \cdot \ln \left(1,43 + 1,43 \frac{\delta}{l} \right) + \frac{\sqrt{H_{\mu_0}} \cdot S_{m0} \cdot \exp[-(bF_k + \gamma \ln l)]}{\alpha \cdot F_k^m} \right] + \frac{\sigma}{\left[1 - 0,4 \cdot \left(\frac{R_a}{S_m} \right)^{2/3} \right] \cdot c \cdot \Delta}, \quad (1)$$

де δ, l, F_{np} – товщина, довжина та переріз провідника (контактного з'єднання);

T_0 – температура "ненагрітих" контактів (+20°C);

ρ_0 – питомий електричний опір матеріалу контактів при T_0 ;

H_{μ_0} – мікротвердість матеріалу контактів при T_0 ;

R_a, S_m – середнє відхилення та середній крок нерівності мікропрофілю поверхні (після виготовлення, до вмикання контактів);

γ – постійна, що характеризує матеріал контактів;

α – коефіцієнт, що враховує металеві ділянки поверхонь, які вступають у контакт;

F_k – контактний натиск з'єднання;

σ – поверхневий опір півки на контактах;

Δ, c – ширина та довжина "контактного" прямокутника контактів (губок) контакторів.

Формула для R_k при довільній температурі приведена в дисертації.

За виразом (1) виконано числову оцінку контактного опору R_k при $T = T_0$ для силових контактів групового перемикача ЕКГ-8Ж та електропневматичних контакторів ПК-96-101 електровозів ВЛ80^Т. Розрахунки здійснено для контактів із різних матеріалів за середніми значеннями величин, що входять у вираз (1) і наведено в таблиці 1, із якої випливає, що найменшим \bar{R}_k володіють контакти із матеріалу Дискон, а найбільшим із МДК.

Згідно з виразами для R_k , величина R_k залежить від багатьох, у свою чергу, випадкових величин і тому сама є випадковою функцією: $R_k = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$. Тоді в імовірісно-статистичній трактовці оцінка технологічної нестабільності R_k , як відхилення фактичних його значень від його номінальних значень, полягає у знаход-

Таблиця 1 – Середні значення контактної опору \bar{R}_k при $T_0 = +20^\circ\text{C}$ контактів контакторів ЕКГ-8Ж та ПК-96-101 електровозів змінного струму

Матеріал контактів	Контактний опір, \bar{R}_k , мОм	
	ЕКГ-8Ж	ПК-96-101
Розривні контакти		
№3, Союз Інвест	0,4868	0,4209
№4, Інтер-Контакт-Пріор	0,5145	0,5108
№5, Власов з просоч.	0,4648	0,4929
№6, Власов без просоч.	0,4804	0,4650
№9, МДК	0,5328	0,5554
№10, Дискон	0,4204	0,4346
Головні контакти		
№1, Аргентум	0,0346	0,0169
№2, Союз Інвест	0,0329	0,0370
№8, МДК	0,0394	0,0381
№11, Дискон	0,0322	0,0378

женні міри розсіювання випадкових величин, наприклад, ρ_0 , l , F_k , R_0 , S_m (згідно (1)), тобто, полягає у визначенні їх дисперсій D або середньоквадратичного відхилення σ за наступним виразом, що враховує нелінійність функції контактної опору:

$$D[R_k] = \sigma_{R_k}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \bigg|_{x_i=m_{x_i}} \cdot D_{x_i} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right) \bigg|_{x_i=m_{x_i}} \cdot (\mu_4[X_i] - D_{x_i}^2) +$$

$$+ \sum_{i < k} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_k} \right) \bigg|_{x_i=m_{x_i}, x_k=m_{x_k}} \cdot D_{x_i} \cdot D_{x_k} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \bigg|_{x_i=m_{x_i}} \cdot \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right) \bigg|_{x_i=m_{x_i}} \cdot \mu_3[X_i], \quad (2)$$

де рівності " $x_i = m_{x_i}$ " у вертикальних межах означають, що у виразі часткових похідних замість аргументів X_i підставляють очікування m_{x_i} ; $\mu_3[X_i]$ і $\mu_4[X_i]$ – третій і четвертий моменти випадкових аргументів X_i .

На основі (2) чисельно визначено власні допуски величин – аргументів функції R_k , які чинять найбільший вплив на відсотковий допуск $\sigma_{R_{k0}} = \sigma_{R_k} / \bar{R}_k$ контактної опору R_k від його номінального значення на стадії монтажу, тобто на його технологічну нестабільність. Встановлено, що найбільший вплив на технологічну стабільність R_k , оцінену за новим запропонованим підходом, спричиняють відхилення величин питомого опору матеріалу, опору поверхневої плівки та середнє відхилення мікропрофілю поверхні. Отже, на стадії технологічної зборки особливу увагу необхідно звернути на стан контактної поверхні, а в якості матеріалу контактної напайки необхідно використовувати матеріали з найменшим відхиленням їх питомого опору.

Забезпечення найбільшої (екстремальної) параметричної надійності контактних з'єднань необхідно на двох етапах: на стадії їх технологічної зборки (монтажу) та безпосередньо під час експлуатації. Процес зборки здійснюється новими, повноцінної товщини, губками-напайками і при нормальному значенні температури T_0 . Тому із трьох прийнятих в роботі контрольованих параметрів потрібно враховувати лише один, що змінюється – контактний опір R_k контактного з'єднання, який є різним (випадковим) для різних з'єднань і який не повинен перевищувати свого допустимого значення R_{kd} . Таким чином, на етапі зборки стоїть задача: визначити, який відсоток наданих нових контактних з'єднань задовольняє вимозі, що поточне значення R_k не перевищує R_{kd} . Для розв'язування цієї задачі в дисертації побудовано імовірнісні моделі оцінки високої (екстремальної) параметричної надійності з'єднань.

Як відомо, оцінка параметричної надійності систем базується на використанні класичної моделі відмов типу "навантаження – міцність", згідно з якою надійність визначають як імовірність безвідмовної роботи P деталі за даним контрольованим параметром X як

$$P = \text{Iмов}[x_n \leq x \leq x_o] = \int_{x_n}^{x_o} f(x) dx, \quad (3)$$

де x_n та x_o – відповідно нижнє та верхнє значення випадкової величини X , тобто контрольованого параметра, який характеризує працездатність деталі; $f(x)$ – густина розподілу імовірнісних значень цього параметра.

Існуючі математичні моделі та методики оцінки P за формулою (3) базуються на використанні статистичних даних повної (вихідної) вибірки значень усіх параметрів працездатності досліджуваної деталі. Останнє, за нашою думкою, обмежує шляхи підвищення надійності деталей. При розрахунках екстремальної надійності потрібно виходити із найменш сприятливих комбінацій фактичних значень контрольованого параметра X та його допустимих значень X_o . Отже, при розрахунках надійності за критеріями контактного опору R_k контактного з'єднання потрібно враховувати їх найбільші фактичні значення і найменші допустимі величини. Тому для використання розроблених схем моделей екстремальної параметричної надійності потрібно знати імовірнісні закони розподілення крайніх (екстремальних) значень вибірки контрольованих параметрів. Допустима величина контактного опору у нашому випадку є дискретною.

Задача визначення законів розподілу екстремальних значень вибірки базується на використанні отриманої раніше вихідної функції розподілення $F(x)$ усього об'єму вибірки (чисельністю " n ") із генеральної сукупності значень випадкового параметру. У цьому випадку функцію розподілення максимальних значень $F_m(x)$ визначають як

$$F_m(x) = F^n(x), \quad (4)$$

а мінімальних – $F_n(x)$:

$$F_n(x) = 1 - [1 - F(x)]^n, \quad (5)$$

де n – кількість виміряних значень випадкової величини X .

Відповідно густини розподілу імовірностей будуть мати вигляд:

$$f_{nn}(x) = \frac{dF_{nn}(x)}{dx} = nF^{n-1}(x), \quad (6)$$

$$f_{n1}(x) = \frac{dF_{n1}(x)}{dx} = n[1 - F(x)]^{n-1} \cdot f(x). \quad (7)$$

Аналіз статистичного матеріалу за експериментальним вимірюванням контактного опору R_k контактних з'єднань електропроводів змінного струму свідчить про те, що випадкова величина R_k в залежності від матеріалу контактів розподіляється за нормальним законом. Тому можна довести, що у якості граничного розподілення найменших (мінімальних) значень x (у нашому випадку R_k) можна використати перше граничне розподілення з функцією розподілення вигляду

$$F_{n1}(x) = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{x - m_{n1}}{\sigma_{n1}}\right)\right] \quad (8)$$

та густиною імовірності

$$f_{n1}(x) = \frac{1}{\sigma_{n1}} \cdot \exp\left[\frac{x - m_{n1}}{\sigma_{n1}}\right] \cdot [1 - F_{n1}(x)], \quad (9)$$

де

$$m_{n1} = m_1 - \sigma_1 \left(\sqrt{2 \ln n} - \frac{\ln \ln n + \ln 4\pi - 2c}{2\sqrt{2 \ln n}} \right), \quad (10)$$

$$\sigma_{n1}^2 = \sigma_1^2 \cdot \frac{\pi^2}{12 \ln n}, \quad (11)$$

де m_1 і σ_1^2 – математичне сподівання та дисперсія для вихідного розподілення; $c = 0,5772$ – число Ейлера.

В якості граничного розподілення максимальних значень використано також перше граничне розподілення з функцією

$$F_{nn}(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - m_{nn}}{\sigma_{nn}}\right)\right]\right\} \quad (12)$$

та густиною імовірності

$$f_{nn}(x) = \frac{1}{\sigma_{nn}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x - m_{nn}}{\sigma_{nn}}\right)\right] \cdot F_{nn}(x), \quad (13)$$

де:

$$m_{nn} = m_1 + \sigma_1 \left(\sqrt{2 \ln n} - \frac{\ln \ln n + \ln 4\pi - 2c}{2\sqrt{2 \ln n}} \right), \quad (14)$$

$$\sigma_{nn}^2 = \sigma_1^2 \cdot \frac{\pi^2}{12 \ln n}, \quad (15)$$

де m_1 і σ_1^2 – математичне сподівання та дисперсія вихідного розподілення величини X .

Побудувавши по (9), (13) закони розподілення мінімальних і максимальних значень контрольованого параметра і, знаючи допустимі значення R_{kb} , можна визна-

чити імовірність відмови електроконтактного з'єднання за критерієм контактного опору R_k . При цьому в залежності від того, яку допустиму границю має контрольований параметр (верхню (праву) чи нижню (ліву), чи обидві, детерміновану чи імовірнісну) існують і в дисертації побудовано і приведено 6 варіантів імовірнісної моделі, за якими потрібно визначати екстремальну параметричну надійність контактних з'єднань. Наприклад, на рис. 1 наведено варіант 1, коли величина контактного опору, як контрольованого параметра, має праву (верхню) детерміновану границю R_{k0} , тоді імовірність відмови V визначають заштрихованою площею.

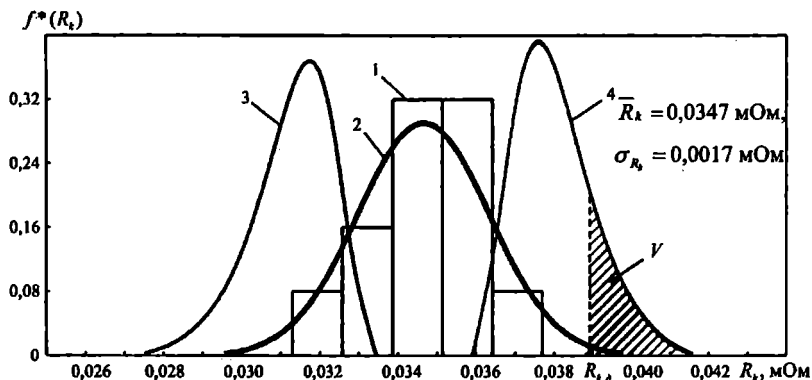


Рис. 1 – Розподілення контактного опору контактів із матеріалу №1 контакторів ЕКГ-8Ж: 1 – гістограма розподілення вихідної вибірки R_k ; 2 – теоретичне розподілення вихідної вибірки R_k ; 3 – розподілення мінімальних значень R_k ; 4 – розподілення максимальних значень R_k

Отримані значення імовірності відмови V показують, що висока надійність контактних з'єднань на стадії зборки за критерієм контактного опору забезпечується для всіх контактів за виключенням контактів контакторів ЕКГ-8Ж з напайками із матеріалу №2 виробництва заводу "Електроконтакт", імовірність безвідмовної роботи яких становить лише 0,6. Це обумовлено недостатньою контактною поверхнею, оскільки напайки виконані з опуклою робочою поверхнею, і, як наслідок, більшим контактним опором, ніж у контактних з'єднань з плоскими напайками. Імовірності безвідмовної роботи для напайок на контакти ПК-96-101 (матеріал №1, 2, 8, 11) близькі 1. Аналогічні значення для матеріалів №8, 11 на контакти ЕКГ-8Ж. Для матеріалу №1 "Аргентум" імовірність становить 0,81. При розрахунках оцінювали надійність за критерієм контактного опору тільки для головних контактів ЕКГ-8Ж і ПК-96-101, оскільки саме вони є струмонесучими.

В роботі досліджено експлуатаційні стабільність величин R_k і T_k , і надійність контактного з'єднання за критеріями R_k і T_k .

Під експлуатаційною стабільністю контактного опору R_k та температури T_k контактного з'єднання розуміється характер їх зміни від величини тягового струму I , що протікає через контакти, та спаду напруги U_k між контактами. В ході вимірювань виявлено, що при поступовому збільшенні струму I через контакти, що відрегульовані згідно нормативних вимог ЦТ-0038 (тривалість кожної точки виміру ~ 60 с), величина спаду напруги U_k і температури поверхні T_k контактного з'єднання

безперервно збільшуються (рис. 2а), а контактний опір R_k на початкових ділянках майже експоненціально зменшується, проте надалі це зменшення несуттєве (рис. 2б). Температура, наприклад, при $I = 700$ А, досягає значень $47...48^\circ\text{C}$ у головних контактів і $200...240^\circ\text{C}$ – розривних контактів. І у той же час величина U_k є лінійною зростаючою функцією від I , при цьому $U_k = 12...40$ мВ при $I = 400$ А для головних і $350...450$ мВ – розривних контактів.

Також було виміряно контактний опір розривних і головних контактів контакторів ЕКГ-8Ж після експлуатації. Суттєвих змін у функціональній поведінці спаду напруги U_k і контактного опору R_k не помічено. Отримані залежності було апроксимовано лінійними функціями та поліномами.

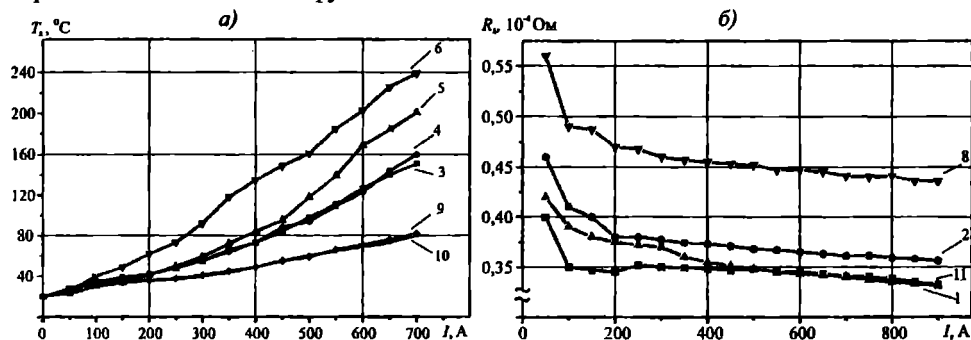


Рис. 2 – Залежності температури (а) та контактного опору (б) контактного з'єднання від струму через контакти ЕКГ-8Ж (нумерація матеріалів згідно прийнятих)

Під експлуатаційною надійністю контактного з'єднання за критеріями R_k і T_k розуміємо його параметричну надійність за певний термін експлуатації електровоза. Оскільки величини R_k і T_k є випадковими, для визначення цієї надійності в роботі використано двомірну модель типу "навантаження-міцність". Згідно цієї моделі контактне з'єднання нормально функціонує, якщо одночасно за визначений термін експлуатації виконуються умови:

$$R_k \leq R_{k0}, \quad T_k \leq T_{k0} \quad (16)$$

$$\text{або} \quad R_{k0} - R_k = S_1 > 0, \quad T_{k0} - T_k = S_2 > 0, \quad (17)$$

де R_{k0} , T_{k0} – допустимі значення контактного опору та температури з'єднання.

Імовірність P_{12} безвідмовної роботи контактного з'єднання визначено за виразом:

$$P_{12} = \Phi(\gamma_1) \cdot \Phi(\gamma_2) + [\Phi(\gamma_*) - \Phi(\gamma_1) \cdot \Phi(\gamma_2)] \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin \rho_{12}, \quad (18)$$

де $\gamma_* = \min(\gamma_1, \gamma_2)$; $\Phi(\gamma)$ – табульована функція Лапласа; γ_1 , γ_2 – так звані характеристики резерву величин S_1 , S_2 , що визначаються за формулами:

$$\gamma_1 = \frac{\bar{R}_{k0} - \bar{R}_k}{\sigma_{S_1}} = \frac{\bar{R}_{k0} - \bar{R}_k}{\sqrt{\sigma_{R_{k0}}^2 + \sigma_{R_k}^2 + 2r_{R_{k0} \cdot R_k} \cdot \sigma_{R_{k0}} \cdot \sigma_{R_k}}}, \quad (19)$$

$$\gamma_2 = \frac{\bar{T}_{k\delta} - \bar{T}_k}{\sigma_{S_2}} = \frac{\bar{T}_{k\delta} - \bar{T}_k}{\sqrt{\sigma_{T_{k\delta}}^2 + \sigma_{T_k}^2 + 2r_{T_{k\delta} \cdot T_k} \cdot \sigma_{T_{k\delta}} \cdot \sigma_{T_k}}}, \quad (20)$$

де ρ_{12} – коефіцієнт кореляції величин S_1, S_2 , рівний

$$\rho_{12} = \lambda_2 \cdot r_{R_k \cdot T_k}; \quad (21)$$

$r_{R_{k\delta} \cdot R_k}, r_{T_{k\delta} \cdot T_k}, r_{R_k \cdot T_k}$ – коефіцієнти парної кореляції відповідних величин; λ_2 – величина, що дорівнює:

$$\lambda_2 = \frac{\sigma_{R_k} \cdot \sigma_{T_k}}{\sqrt{\sigma_{R_{k\delta}}^2 + \sigma_{R_k}^2} \cdot \sqrt{\sigma_{T_{k\delta}}^2 + \sigma_{T_k}^2}}. \quad (22)$$

Результати розрахунків величини P_{12} при імовірнісній за законом Гауса зміні в експлуатаційних умовах тягового струму I в межах 0...1000 А приведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Значення імовірності безвідмовної роботи P_{12} контактів за критеріями R_k і T_k

Матеріал контактів	Контактори	
	ЕКГ-8Ж	ПК-96-101
	Значення P_{12}	
№1, Аргентум	0,938	0,929
№2, Союз Інвест	0,934	0,929
№8, МДК	0,939	0,927
№11, Дискон	0,941	0,928

Із аналізу цієї таблиці витікає, що кількість відмов контактів за критерієм одночасного виконання контактного опору і температури контактного з'єднання у термін міжремонтного пробігу приблизно однакова для всіх матеріалів (відповідно контакторів) і складає: 5,7...6,2% для ЕКГ-8Ж і 7,1...7,3% – ПК-96-101. Дещо менша імовірність відмови, що рівна 0,059, для контактів ЕКГ-8Ж із матеріалу Дискон. Це обумовлено меншою швидкістю зростання температури контактного з'єднання при збільшенні тягового струму контактів: вона дорівнює 0,854°C/А, у той час як для матеріалів Аргентум і МДК – 1,2°C/А. Зауважимо, що в реальних умовах експлуатації струм контактів може бути менший 900А і тому імовірність P_{12} буде мати більші значення.

У *п'ятому розділі* визначено експлуатаційну надійність контактних з'єднань за критерієм їх зношування. Приведено результати візуальних спостережень за особливостями зношування контактів із різних матеріалів в реальних умовах експлуатації.

Процес зношування контактів обумовлений факторами технологічного та експлуатаційного характеру. Технологічне зношування досить значне і становить 1...2,5 г металу при незначних ушкодженнях контактної поверхні. Що ж стосується контактів з напайками, які суттєво руйнуються під впливом електричної дуги, то технологічна обробка призводить до значного зменшення ресурсу контакту (близько

30...40%) і вилучення контакту з експлуатації задовго до його стирання до нормованої товщини.

Під час експлуатації комутуючі контакти піддаються механічному і електричному зношуванню. Притому визначальним є зношування під дією електричної дуги, тобто електрична дугова ерозія. Під час експлуатації контакторів ЕКГ-8Ж з дослідними напайками візуально було виявлено найбільш характерні ушкодження для деяких матеріалів. Зношування напайок із композиційного матеріалу виробництва ТзОВ ІНТЦ "Диском" супроводжується значним розбризкуванням металу, значними порушеннями профілю робочої поверхні та сильним оплавленням. При експлуатації матеріалу МВ-70 виробництва "Інтер-Контакт-Пріор" було виявлено утворення раковин, глибина яких сягала 2...2,5 мм. У композиційного матеріалу МДК виробництва АТ "Геконт" після певного часу експлуатації (≈ 50000 км. пробігу) помічаються відшарування матеріалу на контактній поверхні. Матеріали виробництва інших підприємств не мали явно виражених характерних дефектів, що виникали під час експлуатації. Їх робота супроводжувалась виникненням малих тріщин, раковин, оплавлень, порушенням робочого профілю, яке викликалось переважно неправильним розташуванням рухомого контакту відносно нерухомого.

Що стосується головних контактів контакторів з дугогашенням ЕКГ-8Ж, то вони знаходяться в експлуатації значно довше, ніж розривні. Зменшення товщини напайок відбувається дуже повільно: близько 0,3...0,5 мм на 100 тис. км. і більше. Помічено невеликі оплавлення на поверхні контакту, причому оплавлення чітко окреслюють саме ті зони, де протікає струм.

Для електропневматичних контакторів також переважає механічне зношування над електричним. Головні контакти зношуються приблизно на 0,1...0,2 мм на 100 тис. км. Розривні контакти дещо інтенсивніше, а саме, на 0,2...0,4 мм на 100 тис. км.

Для порівняння інтенсивності зношування розривних контактів ЕКГ-8Ж з напайками із різних матеріалів визначено залежності математичного очікування \bar{b} і середньоквадратичного відхилення σ_b товщини напайки від пробігу електровоза

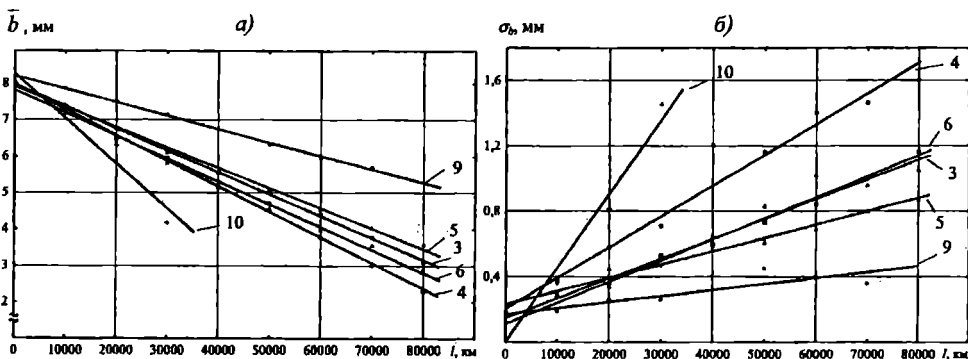


Рис. 3 – Залежності математичного очікування (а) та середньоквадратичного відхилення (б) товщини напайки b від пробігу електровоза для різних матеріалів розривних контактів ЕКГ-8Ж

(рис. 3). Ці залежності для різних матеріалів є лінійно спадаючими з найменшою швидкістю зменшення, рівною $0,375 \cdot 10^{-4}$ мм/км, для матеріалу МДК-3. Найбільша інтенсивність зношування ($1,15 \cdot 10^{-4}$ мм/км) спостерігається для контактів із Дискама.

Безвідмовність контактних з'єднань з контактами із різних матеріалів оцінено за значенням імовірності безвідмовної роботи $P(l)$ для різних лінійних пробігів L_p за відомою формулою:

$$P(l) = I_{\text{мов}}(l > L_p) = \int_{L_p}^{\infty} f(l) dl, \quad (23)$$

де $f(l)$ – густина розподілення випадкової величини пробігу l до відмови.

Для визначення імовірнісного теоретичного закону $f(l)$ для різних матеріалів, користуючись реалізаціями зношування $b(l)$, в роботі одержано пробіги l контактів до відмови, тобто їх ресурс (табл. 3). Під останнім в цій роботі прийнято повне зношення напайки контакту до товщини 4мм для всіх матеріалів за виключенням МДК (№9), для яких повне зношування прийнято до 5мм (через те, що напайки з цього матеріалу виробляють лише товщиною 3 мм). Встановлено, що для контактів із матеріалів №№ 3, 4, і 9 законом розподілення є гама-розподілення, із матеріалів № 5 і 10 – логарифмічно-нормальне розподілення, а з матеріалу № 6 – розподілення Гауса.

Таблиця 3 – Параметри статистичних розподілень пробігів електровозів до параметричної відмови контактних з'єднань

Матеріал контактів	Математичне очікування, \bar{l} , км	Середньоквадратичне відхилення, σ_l , км	Асиметрія, As	Експес, Ex
СоюзІнвест (№3)	70159,58	17551,9	0,75	0,25
Інтер-Контакт-Пріор (№4)	63758,74	23505,27	1,49	2,08
Власов з прос. (№5)	73943,8	12775,27	-0,60	0,16
Власов без прос. (№6)	63438,77	16248,69	0,34	-0,57
МДК (№9)	124565,63	21996,03	1,05	1,68
Диском (№10)	31280,18	5200,15	-0,49	0,27

Визначені за виразом (23) імовірності безвідмовної роботи P при різних пробігах L_p електровоза (від 20 до 100 тис. км) дозволили встановити, що під час експлуатації до 50 тис. км майже всі матеріали, за виключенням матеріалу №4 ($P=0,62$) і №10 ($P=0,01$), зберігають достатньо високий рівень надійності ($P>0,81$). При експлуатації протягом 100 тис. км високу надійність показує матеріал №9, МДК ($P=0,93$).

Також знайдено значення гама-відсоткового ресурсу L_γ контактних з'єднань (табл. 4); величина L_γ – пробіг, при якому імовірність безвідмовної роботи $P(l)$ дорівнює заданому значенню γ (в %).

Таблиця 4 – Значення γ -відсоткового ресурсу L_γ контактів

Рівень надійності, P , $\gamma, \%$	40	50	60	70	95
Матеріал контактів	Пробіг L_γ (тис. км)				
СоюзІнвест (№3)	65,88	61,76	57,64	53,52	39,11
Інтер-Контакт-Пріор (№4)	65,0	60,0	56,67	51,00	33,33
Власов з прос. (№5)	69,46	65,12	62,95	60,78	52,1
Власов без прос. (№6)	67,05	61,68	57,39	53,64	37,55
МДК (№9)	116,73	112,84	108,95	105,06	85,6
Диском (№10)	27,88	25,90	23,86	21,90	15,93

Аналіз ресурсу та імовірності безвідмовної роботи, показав, що найбільш надійні і довговічні (за критерієм зносу) контакти з напайками із матеріалу №9, МДК: імовірність їх безвідмовної роботи при пробігу в 100 тис. км дорівнює 0,93. Тоді як для інших матеріалів вона знаходиться в межах 0,01...0,05, а для матеріалу №10 взагалі – 10^{-6} . Значення γ -відсоткового ресурсу L_γ контактів показують, що, наприклад, 5% контактів матимуть товщину менше 4 мм після пробігу в 85,6 тис. км для матеріалу №9 (МДК). Найменший 5%-ий ресурс у матеріалу №10 (Диском), який становить 15,93 тис. км.

В роботі також виконано прогнозування величини параметричної надійності контактних з'єднань за критерієм зношування напайок контактів в області $b_0 \leq b < b_{\text{дон}}$ за пробіг $L_0 - L_P$. Для цього отримано такий вираз відмови V_b контактного з'єднання:

$$V_b = 1 - \int_0^{b_{\text{дон}}} f_\Sigma(b) db = 1 - \int_0^{b_{\text{дон}}} \left[\frac{1}{\delta \cdot \gamma (L_P - L_0)^2 \cdot 2\pi} \times \right. \\ \left. \times \int_{L_0}^{L_P} \frac{1}{\sigma_b(l)} \cdot \exp\left(-\frac{(b - \bar{b}(l))^2}{2\sigma_b^2(l)}\right) dl \right] db. \quad (24)$$

Проведене прогнозування надійності контактних з'єднань показало, що імовірність відмови V_b напайки контактного з'єднання, тобто вихід її товщини за допустиме $b_{\text{дон}}$ (граничне) значення, після 100 тис. км. пробігу електровоза найменша для напайок із матеріалу МДК (№9) і дорівнює 0,014. Для інших матеріалів вона становить: Союз Інвест – 0,35; Інтер-Контакт-Пріор – 0,46; Власов з прос. – 0,19; Власов без прос. – 0,25; Диском – 0,92.

У шостому розділі приведено результати розрахунку економічного ефекту від впровадження запропонованого матеріалу контактів, технологічну інструкцію з підготовки та заміни зношених контактів, рекомендації по експлуатації та виготовленню контактів. Встановлено, що при впровадженні на ВАТ "Львівський локомотиворемонтний завод" технології відновлення зношених контактів напайкою з псевдосплаву МДК при ремонті одного електровоза серії ВЛ80^Т заощаджуватиметься ~11500 грн.

Впровадження нового псевдосплаву МДК зменшує витрати як на закупівлю напайок, так і на експлуатацію та ремонт, оскільки пробіг контактів з напайками МДК збільшується у порівнянні з контактами, що відновлені мідно-вольфрамовими напайками, приблизно у 2 рази. Масове виготовлення і впровадження контактів з напайками МДК приведе до економії витрат на ремонт і утримання локомотивного парку в цілому. При врахуванні виробником напайок МДК зауважень і рекомендацій надійність контактів, що відновлені МДК, підвищиться.

В додатках подано акти про використання результатів дисертаційної роботи; розрахунок законів розподілення максимальних та мінімальних значень контактного опору; залежності контактного опору та температури нагрівання контактів із різних матеріалів від струму, апроксимовані поліномами другого порядку, та залежності маси розривних контактів ЕКГ-8Ж від пробігу електровоза.

ВИСНОВКИ

На основі проведених експериментальних та теоретичних досліджень у дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна задача підвищення ефективності роботи електрифікованого залізничного транспорту за рахунок підвищення експлуатаційної надійності та зменшення вартості ремонту електричної апаратури діючих електровозів змінного струму. Основні наукові результати та висновки дисертації полягають у наступному.

1. Натурні дослідження експлуатаційної надійності комутуючих розривних сильнострумівих контакторів високої напруги тягових електроапаратів електровозів змінного струму практично відсутні. Існуючі дослідження обмежувались лише стендовими випробуваннями заради визначення термінів служби апаратів за аналітичними виразами швидкості зношування контактів в умовах, що лише моделюють роботу контакторів.

2. Електроконтактні з'єднання силових комутуючих контакторів електровозів змінного струму є найненадійнішим вузлом: близько 10...35% відмов електроапаратури викликано незадовільним станом якраз контактних з'єднань через низьку комутаційну здатність матеріалів, що використовують в якості напайок на контакти контакторів. Особливо це стосується групового перемикача ЕКГ-8Ж та індивідуальних контакторів ПК-96-101.

3. Найбільш об'єктивними контрольованими параметрами при дослідженні працездатності контактів із різних матеріалів в реальних умовах експлуатації електровозів є контактний опір R_k , температура нагрівання T_k та товщина напайки b контактів, поточні і допустимі значення яких є випадковими величинами.

4. Величини основних технологічних характеристик вибраних електроконтактних матеріалів є випадковими. При цьому максимальні значення мікротвердості (~2580 МПа) притаманні молібденовим напайкам, а мінімальні (~700...1300 МПа) – срібломістким на головних контактах; нормативні значення величини контактного натиску контактів (більше 120...150 Н), від якого залежить інтенсивність їх зношування витримується лише на 68% контакторів обох розглядуваних типів.

5. Розраховані за отриманим в роботі аналітичним виразом числові значення контактного опору R_k відрізняються від експериментально одержаних не більше, ніж

(10...11)%. При цьому найменшим R_k володіють контакти із матеріалу Дискон, для них $\bar{R}_k = (4,204...3,346) \cdot 10^{-6}$ Ом, а найбільшим – контакти МДК: $\bar{R}_k = 5,328 \cdot 10^{-6}$ Ом для ЕКГ-8Ж і Інтер-Контакт-Пріор $\bar{R}_k = 41,08 \times 10^{-5}$ Ом для ПК-96-101.

6. Найбільший вплив на технологічну стабільність контактного опору як контакторів ЕКГ-8Ж, так і ПК-96-101, чинять відхилення величин питомого опору матеріалу, опору поверхневої плівки та мікропрофілю поверхні (коефіцієнти ваги яких складають 4,48; 0,171 та 43,6), що спонукає на стадії технологічної зборки звертати особливу увагу на стан контактної поверхні, а в якості матеріалу контактної напайки бажано використовувати матеріали з найменшим відхиленням їх питомого опору.

7. За розробленою моделлю екстремальної надійності визначено імовірність безвідмовної роботи P за критерієм контактної опору контактів із різних матеріалів на стадії монтажу контакторів ЕКГ-8Ж та електропневматичних контакторів ПК-96-101 електровозів змінного струму. За виключенням контактів з напайками на контакти ЕКГ-8Ж із матеріалу №2 "Союз Інвест" ($P = 0,6$), забезпечується високий рівень надійності ($P > 0,81$) електроконтактних з'єднань.

8. Характер залежностей контактної опору R_k , спаду напруги U_k і його температури T_k в функції збільшення струму I через контакти різних: криві $U_k(I)$ та $T_k(I)$ лінійно зростають, $R_k(I)$ – експоненціальний, круто спадаючий при зростанні I до 150 А, а при $I \geq 200$ А величина R_k майже не залежить від тягового струму.

9. Експериментально підтвердженими розрахунками за двомірною моделлю встановлено, що в експлуатаційних умовах протікання через контакти струму в діапазоні $I = 50...1000$ А (при $I_n = 1300$ А) імовірність безвідмовної роботи контактних з'єднань із досліджуваних матеріалів і досліджуваних контакторів за критеріями контактної опору і температури контактів достатньо висока і складає 0,927...0,943.

10. Технологічне зношування контактів, поверхня яких ушкоджена незначно, становить 1...2,5 г металу; в той же час в контактах, суттєво зруйнованих електричною дугою. Технологічна обробка призводить до зменшення на (30...40)% їх ресурсу і вилучення контакту з експлуатації задовго до зношування їх до нормованих товщин.

11. Згідно регресійних залежностей $\bar{\delta}(I), \sigma_s(I)$, отриманих за результатами порівняльних експлуатаційних випробувань розривних контактів контакторів ЕКГ-8Ж з різних матеріалів, встановлено наступне:

– найбільш довговічним матеріалом за критерієм зношування напайки є матеріал МДК-3, інтенсивність зношування якого складає $0,37 \text{ мм}/10^4 \text{ км}$;

– матеріалом не придатним в якості напайок є матеріал Дискон, через значні оплавлення контактної поверхні під дією електричної дуги та високу інтенсивність зношування, яка складає $1,24 \text{ мм}/10^4 \text{ км}$.

12. Визначено імовірності безвідмовної роботи напайок із різних матеріалів за критерієм їх зношування при різних пробігах електровоза (від 20 до 100 тис. км). До 50 тис. км майже всі матеріали зберігають достатньо високий рівень надійності ($P > 0,81$), за виключенням матеріалу №4 ($P = 0,62$) і №10, "Дискон" ($P = 0,08$), які

негативно зарекомендували себе вже після 20 тис. км. При експлуатації протягом 100 тис. км високу надійність зберігає матеріал №9, МДК-3 ($P=0,93$). Імовірність безвідмовної роботи для інших матеріалів коливається в межах 0,01...0,05, а для матеріалу №10 взагалі дорівнює 10^{-6} .

13. Найбільшим значенням γ -відсоткового ресурсу L_γ володіють напайки на контакти з матеріалу №9, "МДК" (наприклад, при $\gamma = 95\%$ $L_\gamma = 85,6$ тис. км). Для інших матеріалів значення L_γ коливається в межах 33...52 тис. км, що в 1,6...2,6 рази менше, ніж для МДК. Напайки на контакти з матеріалу №10 "Диском" вже через 50 тис. км майже 100-відсотково виходять з ладу.

14. Згідно з розрахунками за моделлю і методикою імовірнісного прогнозування, імовірність відмови V_b напайки на контакт, тобто вихід її товщини за допустиме $b_{\text{дон}}$ (граничне) значення, після 100 тис. км. пробігу електровоза найменша для напайок із матеріалу МДК (№9) і дорівнює 0,014. Для інших матеріалів вона становить: Союз Інвест – 0,35; Інтер-Контакт-Пріор – 0,46; Власов з прос. – 0,19; Власов без прос. – 0,25; Диском – 0,92.

15. В локомотивному депо Львів-Захід Львівської залізниці та на ВАТ "Львівський локомотиворемонтний завод" використано розроблену в дисертації нову технологію відновлення зношених електроконтактних з'єднань контакторів ЕКГ-8Ж та електропневматичних контакторів ПК-96-101 електровозів змінного струму серії ВЛ80^Т.

16. Порівняльний техніко-економічний аналіз при заміні існуючих матеріалів контактних напайок силових контактів контакторів на запропоновані композиційні матеріали показав, що при впровадженні на ВАТ "Львівський локомотиворемонтний завод" технології відновлення зношених контактів напайкою з псевдосплаву МДК-3 заощаджуватиметься ~11500 грн. на ремонті одного електровоза серії ВЛ80^Т. Впровадження нового псевдосплаву МДК-3 зменшує витрати як на закупівлю напайок, так і на експлуатацію і ремонт, оскільки пробіг контактів з напайками МДК збільшується в порівнянні з контактами, що відновлені мідно-вольфрамовими напайками, приблизно у 2 рази. Масове виготовлення і впровадження контактів з напайками МДК приведе до економії витрат на ремонт і утримання локомотивного парку в цілому. При врахуванні виробником напайок МДК зауважень і рекомендацій надійність контактів, що відновлені МДК, підвищиться.

Основні положення та результати дисертації опубліковано у таких працях:

1. Тетерко О.А. Експлуатаційна надійність контактних з'єднань електропневматичних контакторів та контакторів ЕКГ-8Ж електровозів змінного струму / О.А. Тетерко, М.О. Баб'як, М.О. Костін // Вісник ДНУЗТ. – 2007. – Вип. 18. – С. 41–45.

2. Тетерко О.А. Результати експлуатаційних випробувань відновлених електричних контактів контакторів ЕКГ-8Ж електровозів змінного струму / О.А. Тетерко // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №4. – С. 53–56.

3. Баб'як М.О. Види відмов та знос розривних контактів контакторів з дугогашенням головного контролера ЕКГ-8Ж / М.О. Баб'як, О.А. Тетерко // Вісник

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 14. – С. 24–27.

4. Костін М.О. Імовірнісна модель екстремальної надійності силових електроконтактних з'єднань електрорухомого складу / М.О. Костін, О.А. Тетерко // Гірничі електромеханіка та автоматика: Наук.-тех. зб. – 2006. – Вип. 77. – С. 42–46.

5. Тетерко О.А. Заміна зношених силових контактів електроапаратури електровозів змінного струму / О.А. Тетерко // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації: Науковий журнал. – 2005. – Вип. 2 (11). – С. 94–96.

6. Баб'як М.О. Дослідження структури та деяких властивостей контактних матеріалів контакторів електровозів змінного струму / М.О. Баб'як, О.А. Тетерко, Р.В. Мінакова // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 1. – С. 93–96.

7. Тетерко О.А. Впровадження нового матеріалу напайок на контакти контакторів ПК-96 та ЕКГ-8 електровозів змінного струму ВЛ80 / О.А. Тетерко, О.В. Гладичук, М.О. Баб'як, Т.Й. Синявський // Электрические контакты и электроды. Труды Института проблем материаловедения НАН Украины. – К., 2004. – С. 52–61.

Додаткові праці:

1. Костін М.О. Контактний опір сильнострумових комутаційних контактних з'єднань електроапаратури електричного транспорту / М.О. Костін, О.А. Тетерко, О.Г. Шейкіна // Гірничі електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. збірник – 2006. Вип. 77. – С. 9–14.

2. Баб'як М. О. Використання композиційних матеріалів для силових контактів контакторів електровозів змінного струму / М. О. Баб'як, О.А. Тетерко, Р. В. Мінакова, М. В. Мінакова, Г. Є. Копилова // Тези Міжнародної конференції "Електричні контакти та електроди". – К., 2007. – С. 66.

АНОТАЦІЯ

Тетерко О.А. Підвищення надійності електроконтактних з'єднань силових контакторів електровозів змінного 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, 2008.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню експлуатаційної надійності силових електроконтактних з'єднань контакторів головного контролера ЕКГ-8Ж та електропневматичних контакторів ПК-96-101 електровозів змінного струму шляхом заміни мідно-вольфрамових та срібломістких контактів новими композиційними матеріалами (псевдосплавами).

У роботі проведено аналіз особливостей роботи та видів відмов контакторів ЕКГ-8Ж та ПК-96-101 електровозів змінного струму. Досліджено технологічні характеристики обраних електропровідникових матеріалів для напайок на контакти. Розроблено імовірнісну модель і методику оцінки екстремальної параметричної надійності контактних з'єднань за критерієм контактного опору.

Вперше встановлено закономірності зношування контактів контакторів ЕКГ-8Ж та ПК-96. Досліджено зміну контактного опору і температури контактів із різних матеріалів в реальних умовах експлуатації електровозів. Розроблено методику і проведено чисельну порівняльну оцінку технологічної та експлуатаційної стабіль-

ностей, а також показників параметричної надійності контактів за критерієм зношування контактів.

Ключові слова: надійність, контакт, контактор, напайка, електричний апарат, контактний опір, ресурс, зношування, стабільність, псевдосплав.

АННОТАЦИЯ

Тетерко А. А. Повышение надежности электроконтактных соединений силовых контакторов электровозов переменного тока. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2008.

Диссертационная работа посвящена повышению эксплуатационной надежности силовых электроконтактных соединений контакторов электроаппаратуры электровозов переменного тока путем замены медно-вольфрамовых и серебро-содержащих контактов новыми композиционными материалами (псевдосплавами), а именно – контакторов главного контролера ЭКГ-8Ж и электропневматических контакторов ПК-96-101 электровозов переменного тока серий ВЛ80, ВЛ60, ВЛ40.

В работе проведен анализ особенностей работы и видов отказов контакторов ЭКГ-8Ж и ПК-96-101 электровозов переменного тока. Выбраны материалы для использования в качестве напаяк на контакты исследуемых контакторов. Исследованы основные технологические характеристики электропроводниковых материалов – удельное сопротивление, шероховатость контактной поверхности, микротвёрдость. Получено аналитическое выражение контактного сопротивления электроконтактных соединений с учётом условий эксплуатации контакторов и характеристик материалов, которые используются в качестве контактных напаяк. Разработана методика и проведена численная сравнительная оценка технологической и эксплуатационной стабильности контактного сопротивления, в результате которой определены основные параметры наиболее значимо влияющие на технологическую стабильность сопротивления электроконтактных соединений контакторов ЭКГ-8Ж и ПК-96-101, а именно: шероховатость поверхности, сопротивление поверхностной плёнки контактов и удельное сопротивление материала. Исследовано изменение контактного сопротивления, температуры и процесса изнашивания контактов из разных материалов в реальных условиях эксплуатации электровозов.

Разработана вероятностная модель и методика оценки экстремальной параметрической надежности силовых электроконтактных соединений электроподвижного состава по критериям их контактного сопротивления и износа, которые отличаются от существующих тем, что основаны на использовании вероятностных законов распределения экстремальных, то есть крайних, значений статистики исходной выборки контролируемых параметров. Это позволило более точно оценить показатели надежности контактных соединений.

Впервые установлены закономерности изнашивания контактов контакторов ЭКГ-8Ж и ПК-96-101. Визуально определены основные повреждения контактных напаяк из разных материалов, которые возникают в условиях реальной эксплуатации контакторов. Получены реализации изнашивания контактных напаяк

из разных материалов, то есть, зависимости изменения толщины напаяек от пробега электровоза. Определены интенсивности изнашивания для разных материалов напаяек и пробег электровозов до параметрического отказа электроконтактных соединений. Разработана методика и проведена численная сравнительная оценка показателей параметрической надежности контактов из разных материалов по критерию изнашивания. Определено, что до 50 тыс. км пробега электровоза почти все материалы хранят достаточно высокий уровень надежности ($P > 0,81$), за исключением материала №4 ($P=0,62$) и №10, "Диском" ($P=0,08$), которые негативно зарекомендовали себя уже после 20 тыс. км. А при эксплуатации в течение 100 тыс. км пробега высокую надежность сохраняет только материал №9, МДК-3 ($P=0,93$). Вероятность безотказной работы для других материалов колеблется в пределах 0,01...0,05.

Сравнение значений γ -процентного ресурса L_γ контактных соединений показывает, что наибольшим ресурсом владеют напайки на контакты из материала №9, МДК-3 (например, при $\gamma=95\%$ $L_\gamma = 85,6$ тыс. км). Для других материалов значения L_γ колеблется в пределах 33...52 тыс. км, что в 1,6...2,6 раза меньше, чем для МДК-3.

В работе также выполнено прогнозирование величины параметрической надежности контактных соединений по критерию изнашивания напаяек контактов за 100 тыс. км. пробега электровоза. Наименьшим значением вероятности отказа обладают напайки на контакты из материала №9 МДК-3.

В результате сравнения эксплуатационных свойств материалов напаяек, было предложено использовать в качестве напаяек на контакты контакторов с дугогашением ЕКГ-8Ж и электропневматических контакторов ПК-96-101 материал №9 – МДК-3.

Проведен сравнительный технико-экономический анализ замены существующих материалов контактных напаяек силовых контактов контакторов ЕКГ-8Ж и ПК-96-101 на композиционные (псевдосплавы). Разработана технологическая инструкция по подготовке и замене изношенных контактов напайками из наиболее надежного материала.

В локомотивном депо Львов-Запад Львовской железной дороги и на ОАО "Львовский локомотиворемонтный завод" использована технология восстановления изношенных электроконтактных соединений контакторов ЭКГ-8Ж и электропневматических контакторов ПК-96-101 электровозов переменного тока серии ВЛ80^Т. Определено, что использование нового псевдосплава МДК позволяет уменьшить расходы не только на закупку напаяек, но и на эксплуатацию и ремонт контакторов ЭКГ-8Ж и ПК-96-101. Массовое изготовление и внедрение контактов с напайками МДК приведет к экономии расходов на ремонт и содержание локомотивного парка в целом. А при учете производителем напаяек МДК поданных замечаний и рекомендаций надежность контактов, которые возобновлены МДК, повысится.

Ключевые слова: надежность, контакт, контактор, напайка, электрический аппарат, контактное сопротивление, ресурс, износ, стабильность, псевдосплав.

ABSTRACT

Teterko A .A. Increase of reliability of electrocontact connections of power contactors of alternating current electric locomotives. – The manuscript.

The dissertation for candidate degree in technical sciences by speciality 05.22.09 – electric transport. – Dnepropetrovsk national university of railway transport named by academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2008.

Dissertation work is devoted to increasing of operational reliability of power electrocontact connections of contactors of main controller EKG-8G and electropneumatic contactors PC-96-101 of alternating current electric locomotives by the means of replacement or restoration of copper-tungsten contacts and silver containing contacts by new composition materials (pseudoalloys).

The analysis of features of work and types of refuses of contactors EKG-8G and PC-96-101 of alternating current electric locomotives was conducted. Technological characteristics of selected conducting materials for contacts brazing was investigated. The probabilistic model and method of estimation of extreme parametrical reliability of contact connections by the criterion of contact resistance was developed.

The regularity of wear of contacts of contactors EKG-8G and PC-96-101 was revealed. The changing of contact resistance and temperature of contacts from different materials in the real terms of exploitation of electric locomotives was investigated. The methodic of technological and operating stabilities was developed and numerical comparative estimation ones was conducted and also parametrical reliability of contacts by the criterion of wear.

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

ТЕТЕРКО Олександр Анатолійович

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ
СИЛОВИХ КОНТАКТОРІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ**

Автореферат

**на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Підписано до друку 02 вересня 2008 р.

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

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

Замовлення № 992. Безкоштовно.

**Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.**

ДК №1315 від 31.03.03

Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:

49010, Дніпропетровськ, вул. Ак. В.А.Лазаряна 2.

www.diitrvv.dp.ua

admin@diitrvv.dp.ua