

УДК 629.423.33:621.336-048.24

Д. В. УСТИМЕНКО^{1*}, АЛЬ САІД АХМАД МОХАММАД АХМАД ДІАБ^{2*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{2*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ahmadesraa20@gmail.com, ORCID 0000-0003-4056-1040

Удосконалення методу стендових випробувань ковзних контактів електротранспорту

Мета. Основною метою цієї роботи є комплексне дослідження порядку проведення стендових випробувань сильнострумовевого ковзного контакту електротранспорту, що в комплексі створює підґрунтя для розробки рекомендацій щодо вдосконалення стандартного методу проведення таких випробувань. **Методика.** Дослідження ґрунтується на таких класичних наукових методах: перший – це спостереження та обробка результатів реального експерименту в лабораторних умовах; другий – розробка математичної моделі для визначення впливу температури в зоні ковзного контакту на знос контактного проводу, із подальшим визначенням ресурсу цього ковзного контакту. **Результати.** У ході дослідження розроблено перелік рекомендацій щодо порядку проведення та змісту програми-методики стендових випробувань вставок струмоприймачів електротранспорту. На підставі науково обґрунтованих результатів можна стверджувати, що їх упровадження дозволить скоротити часові, енергетичні та інші витрати під час проведення обов'язкових стендових випробувань нових зразків вставок струмоприймачів. **Наукова новизна.** За допомогою неруйнівного контролю температури в місці струмознімання сильнострумовевого ковзного контакту, з урахуванням граничного значення температури під час процесу струмознімання, уперше отримано значення сталої часу нагрівання системи «фрагмент вставки – кільце з контактного проводу» для різних типів матеріалів вставок, що дозволяє прогнозувати остаточний результат стендових випробувань як успішний або неуспішний уже на початковій стадії випробувань (перші 10 тис. проходжень диска). На основі статистичної обробки експериментальних даних отримано залежності величини зносу контактного проводу від кількості проходжень випробного стенда, що створює умови для прогнозування щодо еталонного зразка значення зносу контактного проводу під час стендових випробувань. **Практична значимість.** Експериментально доведено, що залежність величини зносу контактного проводу від кількості проходжень диска випробного стенда має лінійний характер, що дозволяє здійснювати прискорені ресурсні випробування елементів сильнострумовевого ковзного контакту зі збереженням адекватності отриманих результатів. У цілому комплексне застосування розроблених рекомендацій створює умови для заощадження часових, енергетичних та інших витрат під час проведення стендових випробувань ковзних контактів електротранспорту.

Ключові слова: електротранспорт; сильнострумовевий ковзний контакт; вставка струмоприймача; знос контактного проводу; стендові випробування

Вступ

Як відомо, для системи «пантограф – контактна мережа» основною функцією є передача електричної енергії електрорухомому складу залізниць. У цій системі найбільш відповідальний вузол – це силовий ковзний контакт, утворений контактною вставкою струмоприймача та контактним проводом.

Для підвищення ефективності експлуатації електрифікованих залізниць потрібно вдосконалити наявні та створювати нові пристрої й технології, які б забезпечили надійну й еко-

номну передачу електричної енергії електрорухомому складу [1, 2], а це передбачає зниження зносу контактного проводу та випадків його руйнування, підвищення ресурсу полозів струмоприймачів і зменшення втрат під час процесу струмознімання. У разі впровадження нових типів вставок, проведення періодичних та інших перевірок наявних типів вставок здійснюють комплекс випробувань, зокрема стендових, метою яких є визначення значення зносу контактного проводу після певної кількості проходжень диска випробного стенда.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Основними факторами, що визначають зношення сильнострумового ковзного контакту, є [10, 12, 13]:

- окислення металевого елемента пари тертя;
- окислення композиційного елемента пари тертя й ослаблення його міцності;
- посилення адгезії внаслідок дисоціації плівок води чи органічних речовин під дією електричного струму;
- утворення ударних термічних напруг у динамічному контакті через нерівномірність розподілу густини струму в ньому;
- електричне іскріння; дугоутворення і т. ін.

Усі названі фактори можуть діяти одночасно, їх головною причиною є тепловиділення на перехідному контактному опорі. Тому температура зони ковзного контакту може виступати деяким інтегральним показником, що досить точно відображає якість процесу струмознімання, відповідно, її можна використовувати під час порівняння різних типів контактних вставок, а також прогнозування їх ресурсу та ресурсу контактного проводу [12].

Велику увагу приділено тепловому стану ковзного контакту під час стендових випробувань у роботах [4, 15], оскільки питомий електричний опір матеріалу, твердість, коефіцієнт тертя безпосередньо залежать від температури та впливають на величину зносу матеріалу. Автори роботи [15] пов'язують температуру зони контакту з величиною зносу вуглецевих контактних вставок, а також указують на зміну мікроструктури поверхонь, що контактують. Результати [15] корелюються з отриманими результатами в роботі [4] під час експериментального дослідження роботи електричного ковзного контакту.

Таким чином, до наявних методик стендових ресурсних випробувань доцільно ввести контроль за температурою зони контакту.

Для перевірки відповідності контактних вставок пантографа вимогам стандарту ДСТУ ГОСТ 32680:2016 «Струмознімальні елементи контактні струмоприймачів електрорухомого складу. Загальні технічні умови» [3] проводять приймально-здавальні й типові випробування. До програми таких випробувань входять перевірки напрацювань контактних вставок та зносу контактного проводу. Напрацювання контактних вставок до граничного зносу визначають за

результатами експлуатаційних випробувань. Вставки вважають такими, що витримали випробування, якщо вони мають розрахунковий прогноз заміни за граничним зносом не менше ніж: для струмоприймачів легкого типу – $60 \cdot 10^3$ км і більше; для струмоприймачів важкого типу – $25 \cdot 10^3$ км і більше (пункт 5.1.5 ДСТУ ГОСТ 32680:2016) [3]. Перевірку величини зносу контактного проводу проводять на стенді. Методика лабораторних випробувань висуває такі вимоги до стенда: відрізок контактного проводу МФ – 100 закріплюють у вигляді замкнутої кривої на обертовому пристрої, що забезпечує необхідну лінійну швидкість будь-якої точки проводу, а місця стику контактного проводу повинні забезпечувати плавне ковзання по ньому вставки. На стенді встановлюють один напроти одного два однакових фрагменти контактної вставки, які притискаються під час роботи стенда до контактного проводу зусиллям (40 ± 8) Н. Величину зносу контактного проводу вважають допустимою, якщо після 500 тис. обертів обертового пристрою вона не перевищує 2 мм, або 40 мкм на 10 тис. обертів (пункт 8.3.13 ДСТУ ГОСТ 32680:2016) [3].



Рис. 1. Стенд для проведення випробувань із визначення зносу контактного проводу

Fig. 1. Test bench for determining the contact wire wear

Галузева науково-дослідна лабораторія (ГНДЛ) «Надійність та уніфікація електрообладнання рухомого складу залізниць» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна обладнана стендом (рис. 1) із визначення величини зносу контактного проводу [8], що забезпечує дотримання всіх вимог указанного стандарту. Подібні стенди використовує багато лаборато-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

рій світу під час вивчення властивостей не тільки ковзних, й рознімних контактів, контактів електричних апаратів [5, 9, 13], і здебільшого ці лабораторії обладнані вимірювальною апаратурою для контролю за температурою зони контакту. Під час проведення стендових випробувань автори цієї роботи для контролю температури контакту використовували тепловізор Testo 875 із комплексом програмного забезпечення IrSoft. Вибір тепловізора як вимірювального засобу пояснюється можливістю дистанційно та безконтактно проводити заміри, високою термочутливістю, поєднанням фактичного та інфрачервоного зображень контрольованої поверхні.

Дослідження [6, 11] демонструють результати математичного моделювання зносу контактних пар з урахуванням температури навколишнього середовища. Аналіз показує, що знос значною мірою визначається температурою тіл тертя, що впливає на твердість елементів контактної пари та фактичної площі контакту. Провідна роль електричної складової зносу в підвищенні температури пари тертя показана в [13].

Мета

Основною метою нашого дослідження є розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо вдосконалення стандартного методу стендових випробувань вставок струмоприймачів.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю зменшення часових, енергетичних та інших витрат під час проведення стендових випробувань силових ковзних контактів шляхом упровадження поетапності.

На першому (попередньому) етапі здійснюють контроль температурного стану ковзного контакту та порівнюють отримані значення з показниками еталонного зразка та нормативним значенням температури контактного проводу. Другий (основний, тривалий) етап проводять лише для зразків, які успішно пройшли перший етап. У стандартній методиці випробування проводять без поділу на етапи, що призводить до значних часових, енергетичних та інших витрат, неможливості прогнозування остаточного результату на початковому етапі випробувань.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконати такі завдання:

1. Провести експериментальні стендові дослідження температурного режиму ковзного сильнострумового контакту.

2. Дослідити вплив кількості проходжень на значення зносу контактного проводу та температуру в зоні контакту.

3. Розробити модель процесу зносу контактного проводу під час стендових випробувань.

4. Надати рекомендації щодо вдосконалення методу стендових випробувань.

Методика

У лабораторних умовах було досліджено понад 10 типів вставок пантографів, ідентифікованих як зразок 1, зразок 2 і т. д. Під час порівняльних випробувань здійснювали контроль за нагріванням контактного проводу та недопущення перевищення максимальної температури згідно з ГОСТ 2584 (95 °C) [2]. Виробники контактного проводу гарантують його якісні показники у разі неперевищення вказаного значення в 95 °C. У випадку перевищення цього значення погіршуються фізико-механічні властивості, зокрема щільність робочої поверхні ковзного контакту, що може призвести до збільшення зносу контактного проводу, тому за такого перевищення випробування зразка вважались неуспішними.

Перший етап випробувань зразків складає 10 тис. обертів диска випробного стенда, при цьому температуру в зоні контакту фіксували щохвилини, це дало змогу отримати динаміку зміни температури від початкового значення до усталеного. Тривалість першого етапу випробувань становить 50 хв.

Скриншот тепловізійної фотографії випробування зразка 1 представлено на рис. 2.

Під час випробувань зразка 1 усталене значення температури системи «вставка – контактний провід» не перевищує значення 45 °C. Процес досягнення усталеного значення є відносно тривалим, залежить від властивостей цього контакту, а тому може бути його своєрідним «паспортом».

На рис. 3 представлено графік зміни в часі температури нагрівання ковзного контакту під час випробувань зразка 1, окремо для лівого та правого тримача фрагмента вставки на стенді. Різниця температури нагрівання лівого та правого фрагментів вставки обумовлена конструк-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

тивними особливостями механізму тримача, що також було зафіксовано під час випробувань інших зразків.

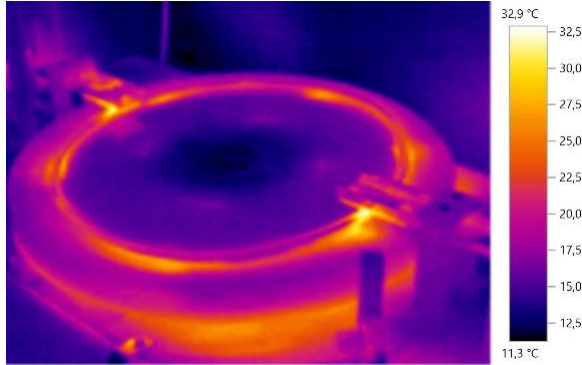


Рис. 2. Скриншот тепловізійної фотографії випробування зразка 1

Fig. 2. Screenshot of thermal imaging photograph of test sample 1

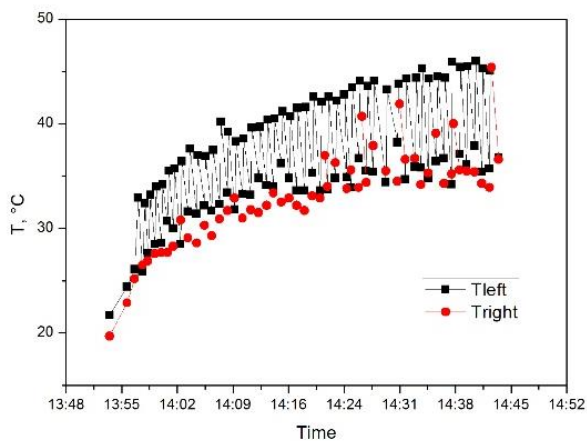


Рис. 3. Графік зміни в часі температури нагрівання ковзного контакту під час випробувань зразка 1 за частоти обертання 205 об./хв та струму 300 А

Fig. 3. Time base graph of the heating temperature change of the sliding contact during the sample 1 tests at a speed of 205 rpm and a current of 300 A.

Аналогічно були експериментально досліджені інші типи вставок.

Як бачимо, процес нагрівання є аперіодичним, тому визначимо сталу часу нагрівання досліджуваної системи «вставка – контактний провід» графічним методом, на прикладі зразка, 1 правий фрагмент вставки (рис. 4).

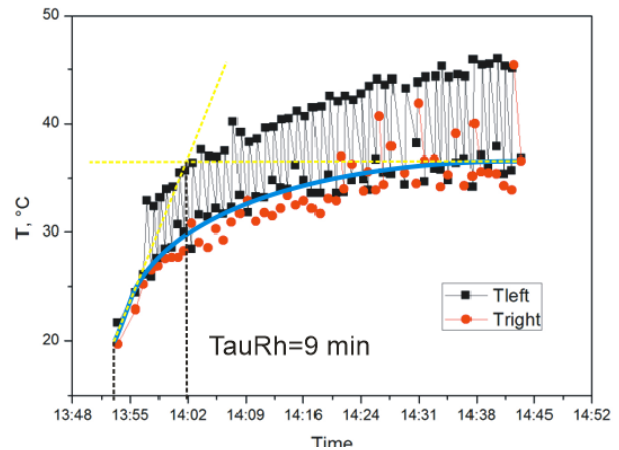


Рис. 4. Визначення сталої часу нагрівання правої (верхні позначки) та лівої (нижні позначки) вставки системи «вставка – контактний провід» під час стендових випробувань зразка 1

Fig. 4. Determination of the heating time constant of the right (upper marks) and left (lower marks) inserts of the system «insert – contact wire» during bench tests of sample 1

Таблиця 1

Значення сталих часу процесу нагрівання системи «вставка – контактний провід» під час стендових випробувань

Table 1

Time constant values of the heating process of the system «insert – contact wire» during bench tests

Номер зразка	1	2	3	4	5	6
Лівий тримач	9 хв	9 хв	10 хв	3 – 4 хв	9 – 10 хв	Не визначено
Правий тримач	9 хв	9 хв	10 хв	3 – 4 хв	9 – 10 хв	Не визначено



Рис. 5. Фотографія зразка 6

Fig. 5. Photograph of the sample 6

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Результати визначення сталої часу для перших шести зразків представлено в табл. 1.

Для вставок зразка 6 (рис. 5) визначення сталої часу неможливе, оскільки випробування були припинені вже через 3 хв, що збігається зі значенням сталої. Спостерігається ефект від роботи типу «мідь по міді», ковзний контакт заклинює.

Результати

Представлений хід досліджень із вдосконалення методу стендових випробувань має всі ознаки закінченого наукового дослідження. Автори й науковці галузевої науково-дослідної лабораторії «Надійність та уніфікація електрообладнання рухомого складу залізниць» провели комплекс випробувань, який містить:

1. Експериментальну частину – випробування ковзного контакту на спеціалізованому стенді. Метою цих випробувань є визначення величини зносу контактної провідності.

2. Установлення факту залежності зносу контактної провідності від температури в зоні сильнострумового ковзного контакту.

3. Безконтактний контроль температури в зоні ковзного контакту та визначення величини зносу контактної провідності з подальшою обробкою результатів за допомогою загально-відомих методів математичної статистики. Отримано аналітичні залежності між температурним режимом у зоні контакту та величиною зносу контактної провідності.

4. Розробку на основі отриманих залежностей зносу контактної провідності та кількості проходжень диска випробного стенда спрощеної ресурсної моделі ковзного контакту електротранспорту, за умови застосування конкретного типу вставок струмоприймачів.

Запропоновані зміни до стандартного методу проведення стендових випробувань не потребують додаткових витрат, збільшення часу та ускладнення процедури, а навпаки, сприятимуть зменшенню витрат як часу, так і енергетичних, та дозволять виробникам підвищити якість накладок за рахунок прискореного вихідного контролю, який доцільно доповнити процедурою стендових випробувань із визначення зносу контактної провідності в обсязі 10 тис. проходжень диска випробного стенда.

Після кожних 10 тис. проходжень випробного диска фіксувались значення зносу контактної провідності, як приклад такі результати для зразка 1 після 20 тис. проходжень представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати замірів зносу контактної провідності під час випробувань фрагмента накладки зразка 1 після 20 тис. проходжень

Table 2

The measurement results of contact wire wear during the tests of the plate fragment of sample 1 after 20 thousand passes

Контрольна точка	Значення зносу, мм
1	0,021
	0,022
	0,022
2	0,015
	0,016
	0,015
3	0,03
	0,028
	0,029
4	0,006
	0,005
	0,006
5	0,012
	0,015
	0,016
6	0,002
	0,001
	0,001

Аналіз замірів зносу контактної провідності для зразка 1 після 20 тис. проходжень (табл. 2) та інших зразків під час проведення стендових випробувань вказує на те, що вони мають нерівномірний, стохастичний, імовірнісний характер, а тому потрібно досліджувати залежності зносу контактної провідності від кількості обертів (проходжень) диска випробного стенда або інших показників.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Представимо результати замірів зносу контактної провуду під час випробувань зразка 1 у вигляді гістограми (рис. 6).

Визначати закон розподілу досліджуваної величини зносу контактної провуду немає сенсу, оскільки в остаточному підсумку потрібні тільки числові значення, які описують найбільш суттєві характеристики цього розподілу. Такою характеристикою, у нашому випадку, може бути математичне очікування.

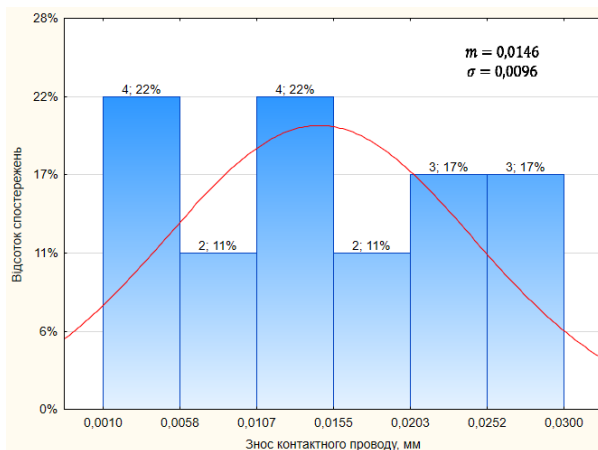


Рис. 6. Гістограма розподілу зносу контактної провуду під час випробувань накладок зразка 1 (після 20 тис. обертів)

Fig. 6. Histogram of the contact wire wear distribution during the tests of the plates of sample 1 (after 20 thousand revolutions)

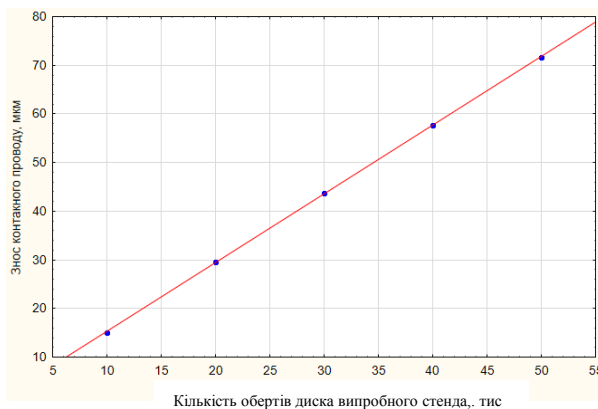


Рис. 7. Залежність значень математичного очікування величини зносу контактної провуду під час випробувань накладок першого типу від кількості проходжень диска стенда

Fig. 7. Dependence of mathematical expectation values of contact wire wear during the test of the first type plates on the number of test bench disk passes

Як відомо, за достатньої кількості вимірів середнє значення випадкової величини наближається за вірогідністю до свого математичного очікування (m) і тому під час практичних розрахунків може бути взято як розрахункове.

За отриманими значеннями математичного очікування величини зносу контактної провуду побудуємо залежність між величиною зносу $\Delta_{\text{КП}}$ та кількістю проходжень диска випробного стенда $n_{\text{диск}}$ (рис. 7).

Експериментальні точки позначені на рис. 7 синім кольором, а червоним – запропонована апроксимаційна залежність виду $y(x)=c+k(x)$.

Рівняння апроксимації буде мати вигляд:

$$\Delta_{\text{КП}}(n_{\text{диск}}) = 1,13 + 1,413 \cdot n_{\text{диск}},$$

де $n_{\text{диск}}$ – кількість обертів диска випробного стенда, тис.

Отримане співвідношення і є моделлю зносу контактної провуду під час проведення стендових випробувань.

Адекватність отриманого співвідношення методом апроксимації аналітичного виразу та вихідних даних доведена методом найменших квадратів – коефіцієнтом найменших квадратів на рівні 0,999 (повна відповідність).

За допомогою аналітичного виразу моделі зносу контактної провуду під час випробувань можна оцінювати нормативні показники, наприклад, за 500 тис. проходжень диска.

Так, після 500 тис. обертів використання накладок першого типу дає знос контактної провуду на рівні:

$$\Delta_{\text{КП}}(n_{\text{диск}}) = 1,13 + 1,413 \cdot 500 = 707 \text{ мкм.}$$

Для перевірки адекватності отриманої моделі зносу контактної провуду було проведено повний цикл випробувань в обсязі 500 тис. обертів для зразків вставок першого типу. Отримане експериментальне значення склало 723 мкм.

Різниця між очікуваним за моделлю зносом контактної провуду та його експериментальним значенням складатиме:

$$\frac{723 - 707}{707} \cdot 100\% = 2,3\%$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Отримане значення вказує на повну адекватність математичної моделі зносу контактного проводу процесу його зносу під час випробувань зразків вставок першого типу.

Аналогічно були опрацьовані експериментальні дані для вставок другого та третього типів. Представимо апроксимовані залежності для всіх трьох типів вставок в одній координатній площині (рис. 7).

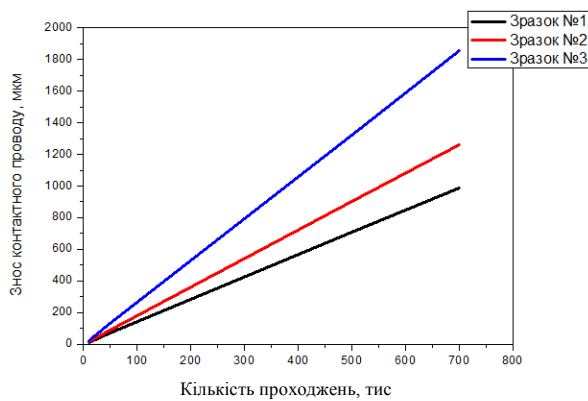


Рис. 8. Результати моделювання процесу зносу контактної провідності на випробному стенді

Fig. 8. The results of modeling the process of the contact wire wear on the test bench

Наукова новизна та практична значимість

До основних наукових результатів, отриманих авторами дослідження, слід віднести такі:

1. На основі статистичної обробки експериментальних даних уперше отримано залежності величини зносу контактної провідності від кількості проходжень випробного стенда, що створює умови для прогнозування щодо еталонного зразка значення зносу контактної провідності під час стендових випробувань.

2. За допомогою неруйнівного контролю температури в місці струмознімання сильнострумівового ковзного контакту, з урахуванням граничного значення температури під час процесу струмознімання, уперше отримано значення сталої часу нагрівання системи «фрагмент вставки – кільце з контактної провідності» для різних типів матеріалів вставок, що дозволяє прогнозувати остаточний результат стендових випробувань як успішний або неуспішний уже

на початковій стадії (перші 10 тис. проходжень диска).

3. Експериментально доведено, що залежність величини зносу контактної провідності від кількості проходжень диска випробного стенда має лінійний характер, що дозволяє здійснювати прискорені ресурсні випробування елементів сильнострумівового ковзного контакту зі збереженням адекватності отриманих результатів.

Удосконалення стандартизованого методу стендових випробувань полягає в додатковому контролі теплового стану ковзного сильнострумівового контакту за допомогою безконтактних технологій.

Висновки

Результатом проведення комплексного дослідження процесу зносу контактної провідності під час стендових випробувань вставок струмоприймачів електротранспорту є такі науково обґрунтовані рекомендації:

По-перше, здійснювати моніторинг значення температури в місці контакту за допомогою неруйнівних методів, зокрема з використанням тепловізорів або пірометрів.

По-друге, встановити максимально допустиме значення температури на рівні 95 °С, що обумовлено властивостями контактної провідності. У разі перевищення нормативного значення температури створюються умови для зміни фізико-механічних властивостей контактної провідності, а тому результати випробувань будуть сумнівними з точки зору значення його зносу.

По-третє, випробування доцільно проводити в два етапи: перший – попередній, другий – основні випробування. Під час попередніх випробувань здійснювати постійний моніторинг температури в зоні контакту через рівні проміжки часу, рекомендовано встановити проміжок в одну хвилину. За даними моніторингу температури визначити сталу часу нагрівання та порівняти її з аналогічним показником еталонного зразка накладки. Як еталонний зразок пропонується використовувати зразок 1. Крім того, у випадку перевищення температури 95 °С в зоні контакту подальші випробування зразків проводити недоцільно, тобто зразок не допускають до другого етапу випробувань. Зразки, під час випробування яких перевищення температури не фіксувалось, допускають до другого

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

етапу випробувань, що дозволить скоротити витрати часу, енергетичних та інших ресурсів.

По-четверте, встановити тривалість першого етапу випробувань 10 тис. обертів, а другого – від 10 тис. до нормативних 500 тис. обертів диска стенда.

По-п'яте, встановити кількість замірів зносу контактного проводу не менше трьох, у кожній з експериментальних точок, із подальшим визначенням середнього значення, яке і слід порівнювати з нормативним. Доцільність такого підходу обґрунтована відповідністю процесу зносу контактного проводу нормальному закону, що було доведено під час дисертаційного дослідження одного з авторів.

Виконання зазначених рекомендацій дозволить підвищити ефективність стендових випробувань у першу чергу за рахунок можливого зменшення часу на їх проведення.

Наприклад, якщо на першому етапі випробувань (10 тис. проходжень диска) встановлено, що подальші випробування зразків вставок у повному обсязі (500 тис. проходжень диска) є недоцільними через перевищення температури або підвищений знос контактного проводу,

тоді економія фонду часу на випробування

$$\text{складатиме: } \frac{500 - 10}{500} \cdot 100 \% = 98 \% .$$

Відповідні матеріальні витрати на оплату праці персоналу, витрати на електроенергію, утримання обладнання також складають 98 %. Таким чином, виконання запропонованих рекомендацій підвищує ефективність за рахунок вилучення зайвих витрат під час проведення потенційно невдалих випробувань, доцільність проведення яких у повному обсязі є сумнівною.

Другим фактором, який дозволяє підвищити ефективність стендових випробувань, є безконтактний контроль температури в зоні сильнотривомового контакту. Ця особливість особливо цінна для виробників вставок, оскільки допомагає, контролюючи температурні режими, вже на першому етапі випробувань визначати ті зразки, які можуть отримати максимально якісні показники струмознімання, тобто з'являється можливість створення новітніх матеріалів, композицій матеріалів на підставі порівняльного аналізу показників для відносно малих зразків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Большаков Ю. Л., Антонов А. В. Дослідження властивостей струмознімальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми «контактний провід – вугільна вставка». *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 6 (60). С. 35–44.
2. ГОСТ 2584-86. Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия. [Действует от 1988-01-01]. Москва : ИПК изд. стандартов, 1998. 9 с.
3. ДСТУ ГОСТ 32680:2016. Струмознімальні елементи контактні струмоприймачів електрорухомого складу. Загальні технічні умови (ГОСТ 32680-2014, IDT). [Чинний від 2016-10-01]. 2016. 16 с.
4. Паранин А. В., Акиншин Н. А., Батрашов А. Б. Экспериментальное исследование работы электрического контакта «контактный провод – токосъемная пластина» в статическом положении. *Транспорт Урала*. 2013. Вып. 4 (39). С. 93–96.
5. Сидоров О. А., Ступаков С. А. *Исследование и прогнозирование износа контактных пар систем токосъема с жестким токопроводом* : монографія. Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. 174 с.
6. Сидоров О. А., Филиппов В. М., Ступаков С. А. Исследования электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта. *Трение и износ*. 2015. Т. 36, № 5. С. 511–517.
7. Устименко Д. В. Сучасний стан проблеми струмознімання на електрифікованих залізницях. *Електрифікація транспорту*. 2016. № 12. С. 71–75.
8. Устименко Д. В. Установка для экспериментального дослідження зносу ковзного контакту «контактний провід – накладка». *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2017. № 14. С. 29–32.
9. Grandin M., Wiklund U. Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact. *Tribology International*. 2018. Vol. 121. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.004>

10. Janahmadov A. K, Javadov M. Y. *Synergetics and fractals in tribology*. Springer, 2016. 381 p.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28189-6>
11. Shimanovsky A. O., Kapliuk I. I. Finite Element Modeling of the Locomotive Pantograph – Contact Wire Interaction. *«MECHANIKA 2018»*. 2018. P. 145–149.
12. Ustymenko D. V. Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip». *Science and Transport Progress*. 2018. № 3 (75). P. 78–86.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/133323>
13. Wu G., Wei W., Gao G., Wu J., Zhou Y. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. *Journal of Modern Transportation*. 2016. № 24. P. 132–138.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0099-1>
14. Wu G., Wu J., Wei W., Zhou Y., Yang Z., Gao G. Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph/Contact Wire Systems in Electric Railways. *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 1. P. 1–17.
DOI: <http://doi.org/10.3390/en11010017>
15. Xuan G., Wenzheng L., Zhongping Y., Yifei W. The study on electrical temperature characteristics of high speed pantograph. *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. 2014. P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941014>

D.V. USTYMENKO^{1*}, AL SAID AHMAD MOHAMMAD AHMAD DIAB^{2*}

^{1*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustymenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{2*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ahmadesraa20@gmail.com, ORCID 0000-0003-4056-1040

Improving the Bench Testing Method of Sliding Contacts of Electric Transport

Purpose. The work is aimed to present the results of a comprehensive study of the bench testing procedure of high-current sliding contact of electric transport, which together provide a basis for proposals, recommendations for improving the standard method of these tests. **Methodology.** The research is based on two classical methods of scientific research. The first one is the observation and processing of the results of a real experiment in the laboratory; the second is the development of mathematical model for determining the temperature effect in the area of sliding contact on the wear of the contact wire, with subsequent determination of the resource of this sliding contact. **Findings.** The result of these studies is a list of recommendations on the procedure and content of the program-methodology of bench tests of inserts of current collectors of electric transports. The obtained scientifically substantiated results will allow to assert that their introduction will reduce time, energy and other expenses for performing obligatory bench tests of new samples of current collector inserts. **Originality.** By means of non-destructive temperature control at the point of current collection of high-current sliding contact, taking into account the temperature limit value during current collection process, for the first time the values of the heating time constant of the «insert fragment – contact wire ring» were obtained for different insert materials. This makes it possible to predict the final result of bench tests as successful or unsuccessful already at the initial testing stage (the first 10 thousand disk passes). Based on statistical processing of experimental data, the dependences of the contact wire wear on the number of test bench passes were obtained, which creates conditions for forecasting the value of contact wire wear during bench tests relative to the reference sample. **Practical value.** It is experimentally proved that the dependence of the contact wire wear on the number of passes of the test bench disk is linear, which allows accelerated resource testing of high-current sliding contact elements while maintaining the adequacy of the results. In general, the comprehensive application of the received recommendations creates conditions for saving time, energy and other costs when conducting bench tests of sliding contacts of electric transport.

Keywords: electric transport; high-current sliding contact; current collector insert; contact wire wear; bench tests

REFERENCES

1. Bolshakov, Y. L., & Antonov, A. V. (2015). Investigation of properties of current collector elements and their effect on the performance of tribosystem «contact wire–current collector element». *Science and Transport Progress*, 6(60), 35-44. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57006> (in Ukrainian)
2. *Provoda kontaknyye iz medi i ee splavov. Tekhnicheskie usloviya*, 9 GOST 2584-86. (1986). (in Russian).
3. *Strumoznimaljni elementy kontaktni strumopryjmachiv elektrorukhomogho skladu. Zaghaljni tekhnichni umovy (GhOST 32680-2014, IDT), 16 DSTU GhOST 32680:2016*. (2016). (in Ukrainian)
4. Pararin, A. V., Akinshin, N. A., & Batrashov, A. B. (2013). Eksperimentalnoe issledovanie raboty elektricheskogo kontakta «kontaktnyy provod – tokos'emnaya plastina» v staticheskom polozhenii. *Transport Urala*, 4(39), 93-96. (in Russian)
5. Sidorov, O. A., & Stupakov, S. A. (2012). *Issledovanie i prognozirovaniye iznosa kontaknykh par sistem tokosema s zhestkim tokoprovodom*: monografiya. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte». (in Russian)
6. Sidorov, O. A., Filippov, V. M., & Stupakov, S. A. (2015). Issledovaniya elektromehaničeskogo iznashivaniya kontaknykh par ustroystv tokosema elektricheskogo transporta. *Trenie i iznos*, 36(5), 511-517. (in Russian)
7. Ustyenko, D. V. (2016). Current state of the problem on current collection of electrified railways. *Electrification of transport*, 12, 71-75. (in Ukrainian)
8. Ustyenko, D. V. (2018). Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip». *Nauka ta prohres transportu. Science and Transport Progress*, 3(75), 78-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/133323> (in English)
9. Grandin, M., & Wiklund, U. (2018). Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact. *Tribology International*, 121, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.004> (in English)
10. Janahmadov, A. K., & Javadov, M. Y. (2016). *Synergetics and fractals in tribology*. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28189-6> (in English)
11. Shimanovsky, A. O., & Kapliuk, I. I. (2018). Finite Element Modeling of the Locomotive Pantograph- Contact Wire Interaction. «*MECHANIKA 2018*», 145-149. (in English)
12. Ustyenko, D. V. (2017). Ustanovka dlia eksperymentalnoho doslidzhennia znosu kovznoho kontakta «kontaktnyi provod – nakladka». *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, 14, 29-32. (in Ukrainian)
13. Wu G., Wei W., Gao G., Wu J., & Zhou Y. (2016). Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. *Journal of Modern Transportation*, 24(2), 132-138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0099-1> (in English)
14. Wu, G., Wu, J., Wei, W., Zhou, Y., Yang, Z., & Gao, G. (2018). Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph/Contact Wire Systems in Electric Railways. *Energies*, 11(1), 17. DOI: <http://doi.org/10.3390/en11010017> (in English)
15. Xuan, G., Wenzheng, L., Zhongping, Y., & Yifei, W. (2014). The study on electrical temperature characteristics of high-speed pantograph. In *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)* (pp. 1-4). DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941014>. (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 01.10.2021