

В.В. Козирський, В.Я. Бунько, П.М. Дарморіс

Визначення перехідного опору розбірних електричних контактів з активним мастилом Camital

Проблема. Надійність розбірних електричних контактів з'єднань істотно знижується внаслідок зростання перехідного електричного опору, спричиненого термомеханічними деформаціями, окисленням контактних поверхонь та зменшенням ефективної площі контакту в процесі експлуатації. За результатами експлуатаційних і експериментальних досліджень відмови, пов'язані з деградацією контактів, становлять до третини загальної кількості пошкоджень електроустановок. Традиційні способи, зокрема застосування пасивних електропровідних мастил, здебільшого лише сповільнюють окислювальні процеси та не забезпечують активного відновлення контактної поверхні. У зв'язку з цим актуальним є розроблення моделей і технічних рішень, здатних описувати та забезпечувати стабілізацію перехідного опору електричних контактів за рахунок керованих термомеханічних процесів у зоні контакту. **Мета.** Встановлення закономірностей і взаємозв'язків процесів в електричних контактах шляхом експериментального дослідження та математичного моделювання еволюції перехідного опору контактних з'єднань з композитним мастилом, модифікованим порошком сплаву Cu-Al-Mn (Camital) з пам'яттю форми, з урахуванням взаємодії електричних, теплових, термомеханічних і трибологічних процесів у нормальних та аварійних режимах роботи електроустановок. **Методика.** Експериментальні дослідження виконано на моделях болтових контактних з'єднань алюмінієвих шин з використанням композитного мастила з вмістом порошку Cu-Al-Mn 5 % і 10 % за об'ємом, а також на контрольних зразках без мастила. Проводилися довготривалі вимірювання перехідного опору за сталої температури та при періодичних теплових навантаженнях. Теоретичне дослідження базується на багаторівневій математичній моделі, чисельний розв'язок якої здійснювався неявними стійкими методами з ідентифікацією параметрів за експериментальними даними. **Результати.** Встановлено зниження та стабілізацію перехідного опору при використанні композитного мастила, найбільш виражену за вмісту порошку Cu-Al-Mn 10 % за об'ємом. Запропоновано редуковану модель еволюції перехідного опору. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає у розробленні та експериментальному обґрунтуванні нового типу композитного електротехнічного мастила для розбірних електричних контактів, що містить порошок сплаву Cu-Al-Mn з ефектом пам'яті форми, а також у встановленні фізичного механізму активної стабілізації перехідного опору контактних з'єднань за рахунок термомеханічного руйнування оксидних плівок у процесі циклічних теплових навантажень. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані для підвищення надійності розбірних електричних контактних з'єднань, прогнозування зміни перехідного опору в процесі експлуатації та обґрунтування вибору складу активних електроконтактних мастил. Бібл. 37, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: електричний контакт, перехідний опір, композитне електротехнічне мастило, Camital, сплав з пам'яттю форми, теплові, термомеханічні та трибологічні процеси.

Вступ. Стан контактів визначає ряд незалежних та взаємозалежних чинників, зміна яких у часі часто носить випадковий характер (рис. 1). У загальному вигляді чинники впливу можна розділити на дві умовні групи – внутрішні і зовнішні. Внутрішні чинники, утворені за рахунок функціонування самої системи електропостачання, дають кількісну та якісну харак-

теристику процесів (режимів). Зовнішні чинники переважно відображають характеристики довкілля: атмосферний тиск та перенапруги грозових розрядів; вологість та температуру повітря; сонячну радіацію; дії обслуговуючого персоналу та ін. Для розгляду різних рівнів системи електропостачання набір чинників може змінюватись кількістю та складом [1–6].

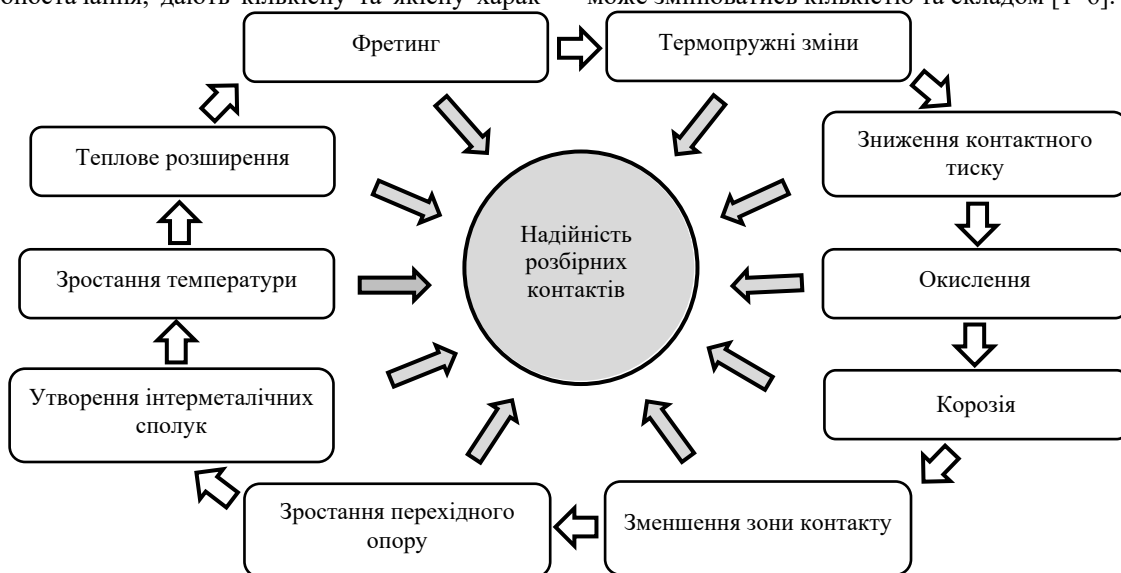


Рис. 1. Фізичні та хімічні чинники, що пов'язані з надійністю електричних розбірних контактів

Оксидні плівки, що утворюються на контактуючих поверхнях алюмінію та міді, мають значний питомий електричний опір і зменшують ефективну площу струмопровідного контакту, що призводить до зростання перехідного опору та локального перегрі-

вання. Накопичення оксидних шарів у процесі експлуатації прискорює деградацію контактної з'єднання, підвищує втрати електроенергії та знижує його довготривалу надійність. Невирішення цієї про-

© В.В. Козирський, В.Я. Бунько, П.М. Дарморіс

блеми може призводити до термічного руйнування контактів і відмов струмопровідних вузлів.

Для зменшення темпу росту оксидних плівок застосовують гальванічні покриття, різні способи обробки поверхонь, герметизуючі та електропровідні мастила [7–9]. Найпоширенішими електропровідними і герметизуючими мастилами є FOTU 571 Electrical Contact Grease, NO-OX-ID «A-Special» Electrical Contact Grease, Rheotemp™ 768G, CIATIM 221 та ін. [10–17]. Однак наведені технічні засоби лише сповільнюють ріст оксидних плівок і не забезпечують їх руйнування. У попередніх дослідженнях електротехнічні мастила розглядалися переважно як пасивний засіб герметизації контактного простору та зменшення впливу навколишнього середовища на процес окиснення контактних поверхонь. На відміну від відомих підходів, у даній роботі вперше досліджується композитне мастило, що містить порошок [18–23] сплаву Cu-Al-Mn (Camital) [8, 9] з ефектом пам'яті форми, який виконує активну функцію термомеханічного впливу на контактну поверхню та сприяє руйнуванню оксидних плівок у процесі експлуатації. За результатами аналізу наукових публікацій авторам не відомі роботи, в яких би описувалися аналогічні мастильні композиції або експериментальні дослідження такого механізму дії. До складу даного композитного мастила входять – електропровідне мастило і порошок інтерметаліду Camital, який забезпечує високу електропровідність мастила і руйнування оксидних плівок. Під час монтажу контактного з'єднання поверхні, що контактують, змащують композитним матеріалом. Затягування болтового кріплення до номінальних зусиль призводить до деформування внутрішньої поверхні контакт-деталей та частинок сплаву з ефектом пам'яті форми.

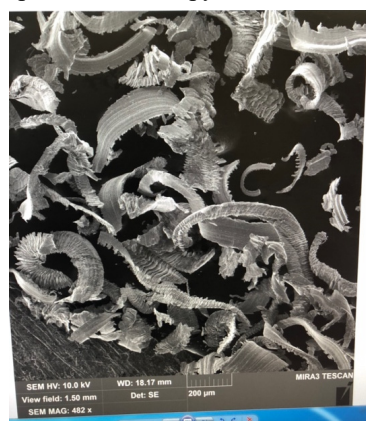


Рис. 2. Загальний вигляд електронного мікроскопу TESCAN Mira 3 LMU (a); дослідження фракцій порошку інтерметаліду Camital (b)

Дослідження впливу функціонального композитного мастила на електричний опір контактного з'єднання. Для перевірки впливу мастила на електричний опір контактного з'єднання проведено серію експериментальних досліджень на моделях розбірних болтових контактних з'єднань – алюмінієвих шинах з розмірами 100×50×5 мм, болтових з'єднаннях M12 (болт M12×30 мм, гайка шестигранна M12, дві шайби плоскі M12) (рис. 3). Використано шість зразків болтових з'єднань: на зразки №1 і №2 нанесено електропровідне мастило з порошком фракції 1 (v1), на зразки №3 і

Метою роботи є встановлення закономірностей та взаємозв'язків процесів у розбірних електричних контактах шляхом експериментального дослідження та математичного моделювання еволюції перехідного опору контактних з'єднань з композитним електротехнічним мастилом, модифікованим порошком сплаву Cu-Al-Mn (Camital) з ефектом пам'яті форми на основі розробленої багаторівневої математичної моделі, яка враховує взаємодію електричних, теплових, термомеханічних і трибологічних процесів у нормальних та аварійних режимах роботи електроустановок.

Матеріали та методи. У процесі довготривалої експлуатації відбувається ріст плівок на контактуючих поверхнях, що призводить до зростання перехідного опору та зменшення експлуатаційного ресурсу контакту. Цей процес інтенсифікується за рахунок нагрівання контакту струмами короткого замикання. Однак за наявності функціонального композитного мастила нагрівання частинок інтерметаліду з ефектом пам'яті форми призводить до відновлення ними початкової форми, яку вони мали до монтажу контакту. Деформуючись, частинки з інтерметаліду зміщуються відносно поверхні контакту та руйнують значну частину поверхні оксидних плівок, що забезпечує зменшення перехідного опору та збільшує експлуатаційний ресурс контакту.

Дослідження фракцій порошку інтерметаліду Camital здійснювали на скануючому електронному мікроскопі TESCAN Mira 3 LMU (рис. 2) призначеному для отримання зображення поверхні об'єкта з високою просторовою роздільною здатністю [24]. Даний мікроскоп застосовують для дослідження форм частинок та морфології їх поверхні, аналізу покриттів, шорсткості та хвилястості поверхні зразків, волокон із заданими властивостями та ін., при збільшеннях від 4 до 1000000 крат з прискорювальною напругою від 200 В до 30 кВ.

№4 нанесено мастило з порошком фракції 2 (v2), контрольні зразки №5 і №6 без мастила.

Електропровідне мастило з порошком фракції №1 (v1) містило 95 % (за об'ємом) CIATIM 221 і 5 % порошку інтерметаліду Camital. Мастило з фракцією порошку №2 (v2) містило 90 % CIATIM 221 і 10 % порошку інтерметаліду Camital. Мастило було нанесене тонким шаром на контактні поверхні алюмінієвих шин (рис. 4). Для контролю моменту затяжки болтового з'єднання, що становив 40 Н·м, було застосовано динамометричний ключ (Intertool XT-9003).



Рис. 3. Підготовка до проведення експерименту



Рис. 4. Нанесення функціонального композитного матеріалу на контактні поверхні

Проведення експерименту полягало в періодичному вимірюванні електричного опору зразків контактних з'єднань (рис. 5). Тривалість експерименту – з 11 березня 2024 року до 1 квітня 2025 року.



Рис. 5. Вимірювання опору контактного з'єднання

Зразки контактних з'єднань №1, №3 і №5 періодично піддавали нагріванню в печі до температури 120 °С, витримці при цій температурі 4 хв., і природному охолодженню до температури 21 °С. У такий спосіб було змодельовано перегрівання контактів. Зразки контактних з'єднань №2, №4 і №6 перебували постійно у приміщенні за температури 21 °С з вологістю повітря 45 %.

Результати та обговорення. Результати експериментальних досліджень представлені у табл. 1 і 2 (відповідно перші і останні експерименти), а на рис. 6 всі експериментальні вимірювання.

Таблиця 1

Результати вимірювання опору контактних з'єднань 11.03.2024 і 16.03.2024

Зразок №	Тип змащення	Значення опору контактного з'єднання. Вимірювання 11.03.2024, мкОм					Значення опору контактного з'єднання. Вимірювання 16.03.2024, мкОм				
		1	2	3	4	середнє значення	1	2	3	4	середнє значення
1	v1	22,37	22,54	22,92	22,54	22,59	22,05	22,16	22,27	22,48	22,24
2	v1	21,24	22,05	21,18	21,24	21,43	20,97	21,02	20,86	21,02	20,97
3	v2	19,01	18,96	18,91	19,07	18,99	19,07	19,34	18,69	18,85	18,99
4	v2	20,15	20,1	20,48	20,59	20,33	20,1	20,15	20,1	20,21	20,14
5	без змащення	31,75	31,8	30,72	31,15	31,36	31,64	31,69	31,75	31,75	31,71
6	без змащення	28,66	28,5	28,66	28,77	28,65	27,36	28,06	27,41	27,36	27,55

Таблиця 2

Результати вимірювання опору контактних з'єднань 04.03.2025 і 01.04.2025

Зразок №	Тип змащення	Значення опору контактного з'єднання. Вимірювання 04.03.2025, мкОм					Значення опору контактного з'єднання. Вимірювання 01.04.2025, мкОм				
		1	2	3	4	середнє значення	1	2	3	4	середнє значення
1	v1	25,74	25,72	25,67	25,78	25,73	25,73	25,79	25,79	25,81	25,78
2	v1	21,98	22,02	21,78	21,84	21,91	22,03	21,99	21,82	21,85	21,92
3	v2	20,68	20,86	20,84	20,9	20,82	20,71	20,84	20,82	20,79	20,79
4	v2	20,98	21,06	20,85	20,78	20,92	21,01	20,98	20,86	20,82	20,92
5	без змащення	39,05	39,15	39,12	39,07	39,10	39,04	39,2	39,15	39,06	39,11
6	без змащення	28,67	29,13	29,05	29,01	28,97	28,71	29,11	29,01	29,02	28,96

Аналіз результатів експериментальних досліджень. Наявність порошку інтерметаліду Camital підвищує електропровідність контактів – зменшує початковий опір контактів на 65 % (опір контактів №3 і №5).

Тривале перебування контактних з'єднань №2, №4 і №6 за сталої температури 21 °С і відносної вологості повітря 45 % не призводить до змін початкового опору контактного з'єднання протягом року (висновок з урахуванням відносної похибки вимірювань 5 %).

Суттєвим є вплив об'ємного вмісту порошку інтерметаліду у функціональному мастилі на початковий опір контакту і подальше зростання опору під час періодичних нагрівань контактів. Цей висновок підтверджує порівняння початкових опорів контактів №1 (вміст порошку 5 %) і №3 (вміст порошку 10 %) – різниця початкових опорів 19 %, а кінцевих 23 %.

Періодичні нагрівання контактів за відсутності порошку інтерметаліду Camital у мастилі призводять

до зростання опору контактного з'єднання – контакт №5 на 25 %.

Наявність порошку інтерметаліду Samital у масилі об'ємом 10 % практично виключає вплив періодичних змін температури на опір контактного з'єднання.

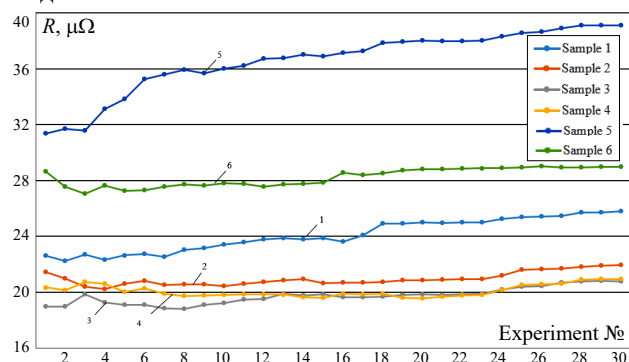


Рис. 6. Результати експериментальних вимірювань опору контактних з'єднань в період з 11.03.2024 по 01.04.2025

Теоретичне моделювання процесів у розбірному електричному контактному з'єднанні, що містить композитне мастило з порошком сплаву Samital. У контактному з'єднанні «алюміній-алюміній» (або Cu-Cu) з мастилом і порошком Cu-Al-Mn одночасно відбуваються 4 взаємопов'язані процеси:

- формування контактної електропровідності. Перехідний опір визначається: реальною площею контакту; товщиною та цілісністю оксидних плівок; кількістю мікроконтактів, створених порошком;
- термомеханічний цикл. Струмове навантаження → нагрівання → фазове перетворення сплаву з пам'яттю форми → відновлення форми частинок → локальні механічні напруження → руйнування оксидів;
- механізм «мікроскребка». Гострі краї частинок Samital: концентрують напруження; здійснюють циклічне мікрорізання оксидної плівки; періодично «оновлюють» метал-метал контакт;
- хімічне старіння. Без порошку – монотонне зростання площі і товщини оксиду. З порошком – конкуренція двох процесів: зростання оксиду; його термомеханічне руйнування.

Структура математичної моделі є багаторівневою, система є нелінійною, нестационарною, з внутрішніми зворотними зв'язками. Загальна структура математичної моделі складається з 5 взаємопов'язаних підсистем:

1. Електрична – контактний опір, струм, густина струму;
2. Теплова – нагрівання та охолодження контакту;
3. Термомеханічна (SMA) – деформація частинок Cu-Al-Mn;
4. Трибологічна – руйнування оксидної плівки;
5. Еволюція контактного опору.

1. Повний перехідний опір контакту визначається як сума складових [25, 26]:

$$R_c(t) = R_b + R_{ox}(t), \quad (1)$$

де $R_c(t)$ – повний перехідний опір контакту, Ом; R_b – об'ємний опір матеріалу шин, Ом; $R_{ox}(t)$ – опір оксидної плівки, Ом.

2. Струм I і густина J струму:

$$I(t) = U(t)/R_c(t); \quad (2)$$

$$J(t) = I(t)/A_{ef}(t), \quad (3)$$

де $I(t)$ – електричний струм, А; $U(t)$ – електрична напруга, В; $A_{ef}(t)$ – ефективна площа електричного контакту, м².

3. Теплова підсистема (нагрівання контакту). Контакт розглядається як сконцентрована теплоємність. Рівняння теплового балансу [27, 28]:

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = I^2(t)R_c(t) - h_{th}(T - T_0), \quad (4)$$

де T – температура контакту, К; T_0 – температура довкілля, К; C_{th} – теплоємність контакту, Дж·К⁻¹; h_{th} – коефіцієнт тепловіддачі, Вт·К⁻¹.

4. Термомеханічна модель порошку Cu-Al-Mn (SMA). Кінетика фазового перетворення. Вводиться змінна – частка аустеніту $\xi(t)$ [29–31]:

$$\frac{d\xi}{dt} = k_\xi [H(T - A_s)(1 - \xi) - H(M_s - T)\xi], \quad (5)$$

де ξ – частка аустеніту, безрозмірна; k_ξ – кінетичний коефіцієнт, с⁻¹; A_s , M_s – температури фазових переходів, К; H – функція Хевісайда, в.о.

Відновлювана деформація частинок порошку Samital:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \xi(t), \quad (6)$$

де $\varepsilon(t)$ – відновлювана деформація частинок порошку, в.о.; ε_0 – початкова відновлювана деформація частинок порошку, в.о.

Контактні напруження, створені частинкою порошку:

$$\sigma_p(t) = E_p \cdot \varepsilon(t), \quad (7)$$

де $\sigma_p(t)$ – локальне контактне напруження, створене частинкою порошку, Па; E_p – модуль пружності сплаву Cu-Al-Mn, Па.

5. Модель оксидної плівки. Еволюція товщини оксиду [32, 33]:

$$\frac{dh}{dt} = k_{ox} - k_{br} N_p F(\sigma_p), \quad (8)$$

де h – товщина оксиду, м; k_{ox} – швидкість росту оксиду, м·с⁻¹; k_{br} – коефіцієнт руйнування оксидної плівки, м²·с⁻¹; N_p – об'ємна концентрація частинок, м⁻¹.

Функція руйнування оксиду

$$F(\sigma_p) = \begin{cases} 0, & \text{if } \sigma_p < \sigma_{ox}; \\ \left(\frac{\sigma_p - \sigma_{ox}}{\sigma_{ox}} \right)^n, & \text{else } \sigma_p \geq \sigma_{ox}, \end{cases} \quad (9)$$

де σ_{ox} – границя міцності оксидної плівки, Па; n – показник нелінійності механізму руйнування оксиду, безрозмірний.

6. Зв'язок оксидної плівки з опором.

Опір оксидного шару:

$$R_{ox} = \rho_{ox} h(t) / A_{ef}(t), \quad (10)$$

де ρ_{ox} – питомий електричний опір оксидної плівки, Ом·м.

Швидкість зміни ефективної площі контакту:

$$\frac{dA_{ef}}{dt} = k_A [N_p \varepsilon(t) - \alpha_A h(t)], \quad (11)$$

де k_A – кінетичний коефіцієнт формування контактної

площі, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; α_A – коефіцієнт зменшення контактної площі через окиснення, $\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Отже, повна система рівнянь має вигляд:

$$\begin{aligned} R_c(t) &= R_b + \frac{\rho_{ox} h(t)}{A_{ef}(t)}; \\ I(t) &= U(t)/R_c(t); \\ C_{th} \frac{dT}{dt} &= I^2(t) R_c(t) - h_{th}(T - T_0); \\ \frac{d\xi}{dt} &= k_\xi [H(T - A_s)(1 - \xi) - H(M_s - T)\xi]; \\ \varepsilon(t) &= \varepsilon_0 \cdot \xi(t); \\ \sigma_p(t) &= E_p \cdot \varepsilon(t); \\ \frac{dh}{dt} &= k_{ox} - k_{br} N_p F(\sigma_p); \\ \frac{dA_{ef}}{dt} &= k_A [N_p \varepsilon(t) - \alpha_A h(t)] \end{aligned} \quad (12)$$

Оскільки система диференціальних рівнянь є жорсткою внаслідок значної різниці часових масштабів теплових, механічних та хімічних процесів, для її чисельного розв'язання застосовано неявні стійкі методи BDF та Radau [34, 35]. Числове моделювання виконано з використанням програмного середовища Python (бібліотеки NumPy, SciPy, Matplotlib).

Результати числового моделювання і експериментальних досліджень представлено на рис. 7. Суцільні лінії відповідають числовому моделюванню, отриманому з редукованої, фізично обґрунтованої моделі. Кожна лінія побудована з індивідуальними параметрами, ідентифікованими для відповідного експериментального зразка.

Математичне виведення редукованої моделі з базовими змінними: $h(t)$ – товщина оксидної плівки; $A_{ef}(t)$ – ефективна площа контакту; $R(t)$ – перехідний опір [36, 37].

Ключові рівняння:

$$\frac{dh}{dt} = k_{ox} - k_{br} N_p F(\sigma_p); \quad (13)$$

$$\frac{dA_{ef}}{dt} = k_A [N_p \varepsilon(t) - \alpha_A h(t)]; \quad (14)$$

$$R(t) = R_b + \frac{\rho_{ox} h(t)}{A_{ef}(t)}. \quad (15)$$

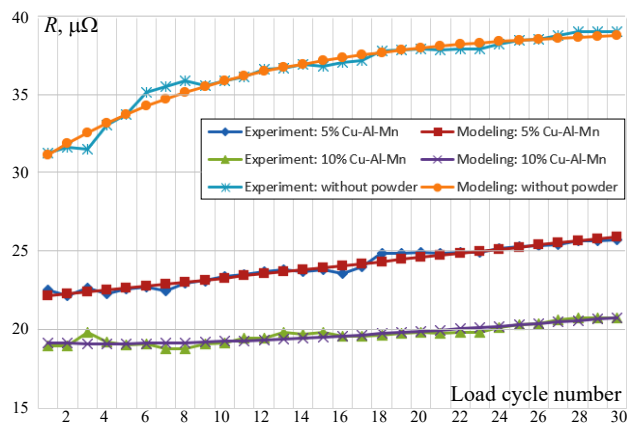


Рис. 7. Еволюція перехідного опору у розбірному контактному з'єднанні плоских електричних шин із алюмінію (експериментальні дані і моделювання)

Усереднення термомеханічної відповіді (ключовий крок). Температура і фазовий стан SMA-частинок змінюються швидше, ніж деградація контакту:

$$\tau_T \ll \tau_h, \tau_A. \quad (16)$$

Тому вводиться усереднена за циклом ефективна деформація:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varepsilon(T(t)) dt = \varepsilon_{eff} = \text{const}. \quad (17)$$

Аналогічно:

$$\langle F(\sigma_p) \rangle = F_{eff}. \quad (18)$$

Лінеаризація еволюції оксидної плівки. Підставляючи (17) в (13):

$$\frac{dh}{dt} = k_{ox} - k_{br} N_p F_{eff}. \quad (19)$$

Позначимо:

$$\alpha_h = k_{ox}, \beta_h = k_{br} N_p F_{eff}. \quad (20)$$

Отримаємо:

$$h(t) = h_0 + (\alpha_h - \beta_h) t. \quad (21)$$

Квазістаціонарна площа контакту. Для A_{ef} розв'язуємо (14) при сталих коефіцієнтах:

$$\frac{dA_{ef}}{dt} = k_A (N_p \varepsilon_{eff} - \alpha_A h). \quad (22)$$

Підставляючи (21) в (22) і інтегруючи, одержуємо:

$$A_{ef}(t) = A_0 + C(1 - e^{-\gamma t}), \quad (23)$$

де

$$\gamma \sim k_A \alpha_A, C \sim \frac{N_p \varepsilon_{eff}}{\alpha_A}. \quad (24)$$

Виведення редукованого рівняння для $R(t)$. Підставляючи (21), (23) у (12) і виконуючи розклад у ряд Тейлора за малими відхиленнями:

$$\frac{h(t)}{A_{ef}(t)} = a_0 + a_1 t - a_2 (1 - e^{-\gamma t}). \quad (25)$$

Після групування членів остаточно отримуємо редуковану математичну модель:

$$R(t) = R_0 + \alpha t - \beta (1 - e^{-\gamma t}), \quad (26)$$

де R_0 – початковий перехідний опір контактного з'єднання, мкОм; α – швидкість деградації контакту в наслідок окислення, мкОм/цикл; β – інтегральний параметр ефективності термомеханічного самоочищення контакту порошком Cu-Al-Mn, мкОм; γ – інтенсивність термомеханічного впливу (ефективна частота термоциклів), цикл^{-1} .

Оцінка довірчих інтервалів параметрів. Метод оцінки. Параметри $\theta = (R_0, \alpha, \beta)$ ідентифікувались методом найменших квадратів:

$$\min_{\theta} \sum_{i=1}^N [R_{\text{exp}}(t_i) - R(t_i, \theta)]^2. \quad (27)$$

Коваріаційна матриця оцінюється як:

$$C_{\theta} = \sigma^2 (J^T J)^{-1}, \quad (28)$$

де J – матриця Якобі.

У табл. 3 і 4 представлені довірчі інтервали.

Таблиця 3
Довірчі інтервали CI (95 %). Контакт з 10 % Cu-Al-Mn

Параметр	Оцінка	95 % CI
R_0 , мкОм	19,24	[18,9; 19,6]
α , мкОм/цикл	0,099	[0,085; 0,113]
β , мкОм	1,5	[1,30; 1,70]

Таблиця 4
Довірчі інтервали CI (95 %). Контакт з 5 % Cu-Al-Mn

Параметр	Оцінка	95 % CI
R_0 , мкОм	22,1	[21,7; 22,5]
α , мкОм/цикл	0,135	[0,120; 0,150]
β , мкОм	0,15	[0,05; 0,25]

Висновок: параметр β статистично значущий лише при 10 % вмісту порошку, що узгоджується з фізикою процесу.

Попередній теоретичний аналіз стосувався процесів нагрівання і охолодження контактної з'єднання струмами електричного навантаження відповідно до графіка електроспоживання. Розглянемо модель для процесів з появою струмів короткого замикання – імпульсний тепловий режим.

У режимі короткого замикання струм має імпульсний характер:

$$I(t) = I_k e^{-t/\tau_1}, \quad (29)$$

де I_k – початкове (пікове) значення імпульсного струму короткого замикання; τ_1 – часова стала затухання імпульсного струму короткого замикання.

Теплове рівняння:

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = I_k^2 R_c e^{-2t/\tau_1} - h_{th}(T - T_0). \quad (30)$$

Розв'язок дає пікову температуру T_{max} .

Імпульсне руйнування оксиду. У рівнянні (13) вводиться імпульсна складова:

$$\frac{dh}{dt} = k_{ox} - k_{br} N_p F(\sigma_p) \delta(t - t_k), \quad (31)$$

де t_k – момент короткого замикання.

Інтегруючи (31), отримаємо:

$$\Delta h_k = -k_{br} N_p F(\sigma_p(T_{max})). \quad (32)$$

Стрибокподібна модель опору. Після імпульсу короткого замикання:

$$R(t_k^+) = R(t_k^-) - \Delta R_k, \quad \Delta R_k > 0; \quad (33)$$

$$\Delta R_k = K_R N_p \varepsilon(T_{max}), \quad (34)$$

де K_R – ефективний коефіцієнт електроконтактного перетворення термомеханічної дії у зміну опору, Ом·м³; t_k^- , t_k^+ – моменти часу до короткого замикання і після.

Аналіз структури математичної моделі та фізичних механізмів, закладених у ній, свідчить, що при імпульсних теплових навантаженнях, характерних для струмів короткого замикання, у контактному з'єднанні з електротехнічним мастилом, модифікованим порошком Cu-Al-Mn, можливе короткочасне зменшення перехідного опору внаслідок термомеханічної активації частинок сплаву.

Висновки.

1. У роботі використано багаторівневу фізично обґрунтовану математичну модель процесів у розбірно-му електричному контактному з'єднанні з електротехнічним мастилом, модифікованим порошком сплаву Cu-Al-Mn з ефектом пам'яті форми.

2. Модель враховує взаємозв'язок електричних, теплових, термомеханічних та трибологічних процесів і описує еволюцію перехідного опору контактної з'єднання в умовах циклічного електричного навантаження та аварійних режимів.

3. Показано, що введення порошку Cu-Al-Mn принципово змінює механізм деградації електричного контакту: замість монотонного зростання перехідного опору реалізується режим конкуренції процесів окиснення та термомеханічного руйнування оксидних плівок.

4. Числове моделювання, виконане з використанням неявних стійких методів BDF та Radau, забезпечило коректний розв'язок жорсткої системи диференціальних рівнянь і продемонструвало добру узгодженість з експериментальними даними.

5. Експериментально встановлено, що при концентрації порошку Cu-Al-Mn 10 % за об'ємом досягається максимальний ефект зниження та стабілізації перехідного опору – до 45-48 % у порівнянні з традиційним контактним з'єднанням без порошку.

6. Параметри редукованої моделі мають чіткий фізичний зміст, а їх ідентифікація дозволяє кількісно оцінювати ефективність термомеханічного самоочищення контактів і прогнозувати довготривалу надійність електричних з'єднань.

7. Отримана математична модель дозволяє описати потенційний вплив імпульсних струмів короткого замикання на стан електричного контакту, що може бути предметом подальших експериментальних досліджень.

8. Отримані результати підтверджують можливість створення нового класу «активних електроконтактних мастил», здатних до термоциклічного самовідновлення контактної поверхні та сповільнення електрохімічного старіння контактних з'єднань.

9. Отримані результати можуть слугувати науковою основою для проведення повномасштабних стандартних випробувань, як наступний етап досліджень.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Kozyrskyi V. Analysis of condition control parameters and prediction of the aging process of dismountable type contacts. *Energetics and electrification*, 2002, no. 6, pp. 16-18. (Ukr).
2. Kozyrskyi V. Analysis of the principles of stabilization of contact pressure in collapsible contact systems. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2001, pp. 115-116. (Ukr).
3. Tkachuk I., Kozyrskyi V. *Method for flexible manufacturing of intermetallic compounds and device for making thereof*. Patent WO 2021/212188, PCT/BG2020/000017, 28.10.2021.
4. Zhang J., Chen T., Su G., Li C., Zhao F., Mi W. Microstructure and component analysis of glowing contacts in electrical fire investigation. *Engineering Failure Analysis*, 2022, vol. 140, art. no. 106539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106539>.
5. Kloch K.T., Kozak P., Mlyniec A. A review and perspectives on predicting the performance and durability of electrical contacts in automotive applications. *Engineering Failure Analysis*, 2021, vol. 121, art. no. 105143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105143>.
6. Sampaio R.F., Pragana J.P., Bragança I.M., Silva C.M., Nielsen C.V., Martins P.A. Electric performance of fastened hybrid busbars: An experimental and numerical study. *Proceed-*

ings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2022, vol. 236, no. 6, pp. 1152-1163. doi: <https://doi.org/10.1177/14644207211043009>.

7. Kozyrskyi V., Tkachuk I., Voloshyn S. *Electrical contact connection*. Patent WO 2023/060325, PCT/BG2021/000025, 20.04.2023.

8. Camital brand registration certificate no. 163545. Available at: <https://alotekinternational/uploads/230/1jgmO5anW3WCOVP22n2bZsx7RSeMc9-metaQ2FtaXRhbCDQodCy0LjQtNC10YLQtdC70YHRgtCy0L4r0LfQsCvRgNC10LPQuNGBOYLrGNCw0YbQuNGPLnBkZg==.pdf> (Accessed 20 May 2025).

9. Kozyrskyi V., Kaplun V., Voloshyn S. *Functional intermetallics in power plants*. Kyiv, Comprint, 2021. 347 p. (Ukr). Available at: <https://dglb.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c4cb1972-74d6-44d0-a13e-6f0c1d7efa61/content>.

10. Alderete B., Mücklich F., Suarez S. Characterization and electrical analysis of carbon-based solid lubricant coatings. *Carbon Trends*, 2022, vol. 7, art. no. 100156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100156>.

11. Zhou Y., Liu J., Li X., Chong H., Han B., Bai Q. On the electric behaviour of conductive grease inside the contact zone. *Friction*, 2024, vol. 12, no. 4, pp. 683-697. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-023-0784-0>.

12. Gonda A., Capan R., Bechev D., Sauer B. The Influence of Lubricant Conductivity on Bearing Currents in the Case of Rolling Bearing Greases. *Lubricants*, 2019, vol. 7, no. 12, art. no. 108. doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants7120108>.

13. Zhang X., Glovnea R. An experimental investigation of grease lubricated EHD contact subjected to normal sinusoidally variable loading. *Tribology International*, 2020, vol. 147, art. no. 106272. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106272>.

14. Sampaio R.F.V., Pragma J.P.M., Bragança I.M.F., Silva C.M.A., Fernandes J.C.S., Martins P.A.F. Influence of corrosion on the electrical and mechanical performance of hybrid busbars. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2022, vol. 5, no. 4, pp. 510-519. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.06.005>.

15. Vanyorek L., Kiss D., Prekoc A., Fiser B., Potyka A., Németh G., Kuzsela L., Drees D., Trohák A., Viskolcz B. Application of nitrogen doped bamboo-like carbon nanotube for development of electrically conductive lubricants. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8, no. 3, pp. 3244-3250. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.05.012>.

16. Hong H., Christensen G., Widener C. Carbon nanotube grease and sustainable manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 21, pp. 623-629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.164>.

17. Frache L., Komba E.H., Philippon D., Galipaud J., De Barros M.I., Douillard T., Masenelli-Varlot K., Bouscharain N., Maheo Y., Sarlin R., Le Jeune G., Berthier Y., Bou-Said B., Massi F. Observation of a modified superficial layer on heavily loaded contacts under grease lubrication. *Tribology International*, 2021, vol. 158, art. no. 106921. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106921>.

18. Van Humbeeck J. Non-medical applications of shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, vol. 273-275, pp. 134-148. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00293-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00293-2).

19. Sutou Y., Koeda N., Omori T., Kainuma R., Ishida K. Effects of ageing on bainitic and thermally induced martensitic transformations in ductile Cu–Al–Mn-based shape memory alloys. *Acta Materialia*, 2009, vol. 57, no. 19, pp. 5748-5758. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.08.003>.

20. Kainuma R., Takahashi S., Ishida K. Ductile Shape Memory Alloys of the Cu–Al–Mn System. *Journal de Physique IV*, 1995, vol. 5, no. C8, pp. 961-966. doi: <https://doi.org/10.1051/jp4/199558961>.

21. Liu J.-L., Huang H.-Y., Xie J.-X. Superelastic anisotropy characteristics of columnar-grained Cu–Al–Mn shape memory alloys and its potential applications. *Materials & Design*, 2015, vol. 85, pp. 211-220. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.114>.

22. Liu J.-L., Huang H.-Y., Xie J.-X., Xu S., Li F. Superelastic fatigue of columnar-grained Cu–Al–Mn shape memory alloy under cyclic tension at high strain. *Scripta Materialia*, 2017, vol. 136, pp. 106-110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.04.017>.

23. Wang H., Huang H.-Y., Su Y.-J. Tuning the operation temperature window of the elastocaloric effect in Cu–Al–Mn shape memory alloys by composition design. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 828, art. no. 154265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154265>.

24. TESCAN microscopy. Available at: <https://tescan.com>.

25. Holm R. *Electric Contacts. Theory and Application*. Springer, Berlin, 1967. 503 p. Available at: <https://www.scribd.com/document/675204141/1967-R-Holm-Electric-Contacts>.

26. Slade P.G. *Electrical Contacts. Principles and Applications*. CRC Press, 2014. 1311 p. doi: <https://doi.org/10.1201/b15640>.

27. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1966, vol. 295, no. 1442, pp. 300-319. doi: <https://doi.org/10.1098/rspa.1966.0242>.

28. Bergman T., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 2007. 1048 p.

29. Otsuka K., Wayman C.M. *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press, 1998. 284 p.

30. Lagoudas D.C. *Shape Memory Alloys. Modelling and Engineering Applications*. Springer, 2008. 436 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8>.

31. Sutou Y., Omori T., Wang J.J., Kainuma R., Ishida K. Characteristics of Cu–Al–Mn-based shape memory alloys and their applications. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 378, no. 1-2, pp. 278-282. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.048>.

32. Bowden F.P., Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford University Press, 2001. 424 p. doi: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198507772.001.0001>.

33. Rabinowicz E. *Friction and Wear of Materials*. John Wiley and Sons, New York. 1995. 342 p.

34. Hairer E., Wanner G. *Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential - Algebraic Problems*. Springer Berlin Heidelberg, 1991. 604 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09947-6>.

35. Shampine L.F. *Numerical Solution of Ordinary Differential Equations*. Chapman & Hall, 1994. 632 p.

36. Ljung L. *System Identification. Theory for the User*. Prentice Hall, 1999. 609 p.

37. Seber G.A.F., Wild C.J. *Nonlinear Regression*. Wiley, 2003. 798 p.

Надійшла (Received) 06.11.2025

Прийнята (Accepted) 09.01.2026

Опублікована (Published) 02.05.2026

Козирський Володимир Вікторович¹, д.т.н., проф.,

Бунько Василь Ярославович², к.т.н., доц.,

Дарморіс Петро Михайлович², ст. викладач,

¹ALOTEK Technology sp.z o.o.,

Zadabrowie 311, Krakowska 11, 37-716, Orly, Poland.

²Відокремлений підрозділ Національного університету

біоресурсів та природокористування України

«Бережанський агротехнічний інститут»,

47501, Тернопільська обл., м. Бережани, вул. Академічна, 20,

e-mail: vbunko@gmail.com (Corresponding Author)

V.V. Kozyrskiy¹, Doctor of Technical Science, Professor,
V.Ya. Bunko², PhD, Associate Professor,
P.M. Darmoris², Senior Lecturer,

¹ ALOTEK Technology sp.z.o.o.,
Zadabrowie 311, Krakowska 11, 37-716, Orly, Poland.

² Separated Subdivision of National University
of Life and Environmental Sciences of Ukraine
«Berezhany Agrotechnical Institute»,
20, Akademichna Str., Berezhany, Ternopil region, Ukraine, 47501.

Determination of the transition resistance of detachable electrical contacts with Camital active grease.

Problem. The reliability of detachable electrical contact connections is significantly reduced due to an increase in transition electrical resistance caused by thermomechanical deformations, oxidation of contact surfaces, and a decrease in the effective contact area during operation. According to the results of operational and experimental studies, failures associated with contact degradation account for up to a third of the total number of electrical installation failures. Traditional methods, in particular the use of passive conductive lubricants, mostly only slow down oxidation processes and do not ensure active restoration of the contact condition. In this regard, it is important to develop models and technical solutions capable of describing and ensuring the stabilisation of the transition resistance of electrical contacts through controlled thermomechanical processes in the contact zone. **Goal.** To establish the regularities and interrelationships of processes in electrical contacts through experimental research and mathematical modelling of the evolution of the transition resistance of contact connections with composite grease modified with Cu–Al–Mn (Camital) with shape memory,

taking into account the interaction of electrical, thermal, thermomechanical and tribological processes in normal and emergency operating modes. **Methodology.** Experimental studies were performed on models of bolted contact connections of aluminum busbars using composite grease containing 5 % and 10 % Cu–Al–Mn powder by volume, as well as on control samples without grease. Long-term measurements of contact resistance were carried out at a constant temperature and under periodic thermal loads. The theoretical study is based on a multilevel mathematical model, the numerical solution of which was carried out using implicit stable methods with parameter identification based on experimental data. **Results.** A decrease and stabilisation of contact resistance was established when using composite lubricant, most pronounced at a Cu–Al–Mn powder content of 10 % by volume. A reduced model of contact resistance evolution was proposed. **Scientific novelty.** For the first time, a generalised mathematical model of a detachable electrical contact with active composite lubricant has been developed, which takes into account the phase transformations of Cu–Al–Mn alloy particles and the mechanism of thermomechanical destruction of oxide films. The possibility of a step-like decrease in contact resistance under impulse currents is shown. **Practical value.** The results obtained can be used to improve the reliability of detachable electrical contact connections, predict changes in contact resistance during operation, and justify the choice of the composition of active electrical contact lubricants. References 37, tables 4, figures 7.

Key words: electrical contact, contact resistance, composite electrical grease, Camital, shape memory alloy, thermal, thermomechanical and tribological processes.

How to cite this article:

Kozyrskiy V.V., Bunko V.Ya., Darmoris P.M. Determination of the transition resistance of detachable electrical contacts with Camital active grease. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2026, no. 3, pp. 18-25. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2026.3.03>