

nical interoperability optimization is presented in the form of a zero-one integer programming problem with the search for the local extremum of the objective function. The information-analytical process is formed as a request that determines the need for information resources, analytical and expert capabilities and service time in each local situation center. The task of optimizing the load of the network of distributed situational centers is to redistribute the load between network nodes by equalizing the use of organizational, human, technical and information resources for timely and quality decision-making in situational centers that serve participants in situational management at different levels. The problem of minimizing service time in a network of distributed situational centers is dual to the primal problem of load redistribution and is solved using a stochastic quasigradient projection method. Algorithms for solving the formulated problems are developed and a test example of application is given. The potential for further improvement of situational systems of strategic planning management based on capability management for target systems is shown.

**Keywords:** *system on situational management, network of distributed situational centers, convergent system, technical interoperability, system optimization.*

Отримано: 16.09.2020

УДК 004.942:621.3.047.42

DOI: 10.32626/2308-5916.2020-21.113-125

**О. О. Ситник**, д-р техн. наук, професор,

**К. М. Ключка**, канд. техн. наук,

**Г. О. Кисельова**, старший викладач,

**В. Б. Кисельов**, старший викладач

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси

## **МОДЕЛЮВАННЯ МІСТКОВОЇ ЕРОЗІЇ СЛАБКОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТІВ ЗАСОБАМИ MATLAB**

У статті розглядається можливість побудови математичної моделі процесу механічної ерозії слабкострумових електричних контактних пар з використанням моделюючої системи MATLAB методом ідентифікації, тобто отримання математичної моделі реального об'єкта на основі експериментальних даних, представлених у вигляді алгебраїчних рівнянь.

Місткова ерозія електричних контактних пар і пов'язаний із нею перенос металу з однієї контактної поверхні на іншу суттєво впливає на зносостійкість електричних контактів реле, потенціометрів, потенціометричних датчиків, енкодерів та іншої слабкострумової комутаційної апаратури. Однак на розмір містка при ерозії контактів окрім величини струму впливає багато факторів, а саме: швидкість замикання та розмикання, сила притискання, температура, тиск та щільність навколишнього середовища, геометрія контактів, параметри контактних матеріалів

та інші процеси. Тому створення математичної моделі, яка б враховувала всі фактори, які впливають на місткову ерозію контактів є достатньо складною математичною задачею. Це призводить до широкого використання емпіричних залежностей у вигляді достатньо простих степеневих функцій. Проведене дослідження виявило, що похибка, яку дають моделі з використанням степеневих функцій, є досить високою і практично не відрізняється похибки моделей з використанням лінійних функцій. Тому для вибору оптимальних по вартості та зносостійкості контактних матеріалів, дослідники змушені використовувати результати отримані методом комутаційних випробувань контактних матеріалів. Однак в результаті проведених досліджень було виявлено, що для зменшення похибки та отримання більш адекватної моделі є доцільним застосувати квадратичну функцію, використання якої зменшує похибку приблизно вдвічі.

В результаті дослідження контактних пар з різних контактних матеріалів виявлено наступне: експоненціальна функція не може бути використана в якості моделі місткової ерозії; лінійна та степенева функції дають цілком прийнятні результати і можуть бути рекомендовані для використання на початкових етапах моделювання процесу місткової ерозії; більш адекватною математичною моделлю місткової ерозії слабкострумівих електричних контактних пар є квадратична функція.

**Ключові слова:** *контактні пари, математична модель, динаміка електричних процесів, регресійний аналіз, електрична ерозія.*

**Вступ.** Основними вузлами, що визначають ресурс комутаційного електричного обладнання є контакти. Вони здійснюють замикання, розмикання і перемикання електричних ланцюгів і є осередками переходу струму з однієї струмоведучої контакт-деталі в іншу [1]. Вид електричного розряду між контактами, а отже, різновид процесу електричного зносу контактів залежить від параметрів комутуваного ланцюга (напруги і струму). За величиною комутуваного струму контакти можуть класифікуватися на слабкоструміві (струми від часток до одиниць ампер), середньоструміві (струми від одиниць до сотень ампер), сильноструміві (струми від сотень до десятків тисяч ампер) [2]. Комутація контактами малопотужних ланцюгів з активним навантаженням супроводжується ерозійними явищами, що викликаються утворенням розплавлених містків в зоні контактування в певні моменти руху контактів. Визначення максимальних довжин містків має практичне значення не тільки для вивчення місткової ерозії, але і для оцінки швидкості замикання-розмикання та величини міжконтактних відстаней, необхідних для правильного вибору іскрогасних елементів [3-4].

Функціонування електричних контактних пар супроводжується зношуванням контактуючих матеріалів внаслідок тертя і електричної ерозії. Протягом останніх десятиліть проводилися трибологічні випробу-

вання, математичне моделювання та моделювання для вивчення природи і наслідків механічного зносу матеріалів з покриттям і без покриття [6-9]. Дослідження були переважно зосереджені на різних механізмах зношування: стирання, адгезії, ерозії, корозійному зносі, втомному зносі, а також на різних їх комбінаціях [7], однак вплив місткової ерозії на процес електричного контактування залишається ще недостатньо вивченим [9].

На основі проведеного аналізу літературних джерел було з'ясовано, що розбіжності результатів вимірювання довжин і діаметрів містків, отриманих різними дослідниками і різними методами, досить значні. Такі розбіжності можуть бути пов'язані як з методикою проведення експериментів, так і з підходами до опрацювання отриманих результатів. Станом на теперішній час методи обробки результатів експериментальних даних та подання їх у вигляді математичних моделей набули значного розвитку. Зокрема побудова моделей багатофакторних процесів, яким є місткова ерозія, де використання апріорної інформації, заснованої на законах фізики викликає певні труднощі, може бути проведено методами ідентифікації.

**Метою статті** є побудова математичної моделі місткової ерозії електричних контактних пар з використанням моделюючої системи MATLAB методом ідентифікації, тобто отримання за експериментальними даними математичної моделі реального об'єкта, представленої у вигляді алгебраїчних рівнянь (ідентифікацією, при побудові математичної моделі, будемо вважати визначення числових значень коефіцієнтів синтезованих моделей [10, 11]).

**Основна частина.** Відомо, що в слабкострумових електричних контактних парах переважає місткова ерозія. У роботі [3] автором проводилися визначення довжин містків по осцилограмам напруги на контактах для різних струмів і контактних матеріалів, стосовно до вимог малопотужних контактних систем, використовуваних в автоматичності. Вимірювання проводилися на поляризованих реле, що відрізняються між собою матеріалом контактів. Для проведення вимірювань при зниженому тиску повітря і різних газів, реле розміщувалися в герметизованих балонах, де створювалася необхідне середовище.

Максимальна довжина містка  $s$ , в момент підривання його струмом  $i$ , знаходиться зі співвідношення [3, 4]

$$s = v_{cp} \cdot \tau,$$

де  $v_{cp}$  — середня швидкість розмикання контактів поляризованих реле, яка визначається для кожного реле при заданих напрузі живлення і регулюванні,  $\tau$  — відрізок часу від початку роз'єднання контактів до моменту вибуху містка, який визначається по осцилограмам напруги на містку.

Вимірами  $s$  при різних параметрах ланцюга було виявлено характерну властивість містків, а саме — відносна незалежність довжини

містка  $s$  від напруги живлення, індуктивності і ємності ланцюга в деяких (досить широких) межах зміни цих параметрів при незмінному струмі містка  $i$ . Експериментальне визначення максимальних довжин містків для різних контактних матеріалів, середовищ і струмів  $i$  представлено на рис. 1. Крім того, визначено, що максимальні довжини містків збільшуються зі збільшенням  $i$ , що мінімальним струмом, при якому з достатньою повторюваністю вдається виміряти  $s$ , є струм величиною 10 мА. Результати досліджень довжини містків ерозії ( $s$ ,  $10^{-4}$  см) від струму ( $i$ , мА) за даними [3] представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати досліджень довжини містків ерозії ( $s$ ,  $10^{-4}$  см) від струму ( $i$ , мА) за даними [3]

Сплав	Струм $i$ , мА										
	10	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1 — ПЛН-10	0,5	1,14	1,52	1,87	2,21	2,56	2,9	3,23	3,56	3,88	4,21
2 — ПЛН-5	0,2	1,0	1,3	1,48	1,62	1,75	1,84	1,93	2,0	2,09	2,17
3 — ЗлН-5	0,15	0,84	1,06	1,19	1,28	1,34	1,41	1,46	1,52	1,57	1,63
4, 5, 6 — ПЛН-5	0,05	0,59	0,86	1,03	1,15	1,27	1,34	1,41	1,46	1,51	1,57
7 — Ср 999	0,2	0,35	0,45	0,53	0,62	0,69	0,75	0,81	0,86	0,91	0,97
8 — мідь	0,05	0,09	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,13	0,12	0,12

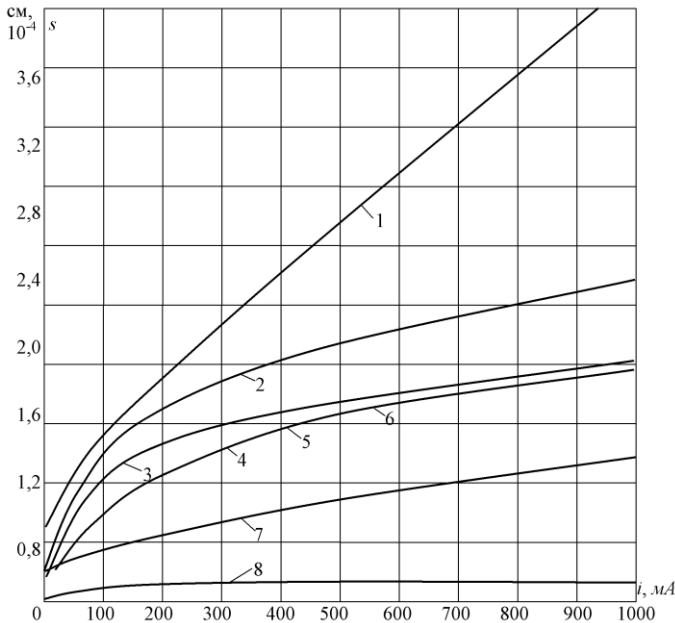


Рис. 1. Графік залежності довжини містка ерозії від величини комутованого струму для ряду контактних матеріалів [3]

Усереднені значення довжин містків при струмі до 1 А для різних контактних матеріалів: 1 — платино-іридієвий сплав з 10% іридію (ПЛІ-10); 2 — платино-нікелевий сплав з 5% нікелю (ПЛН-5); 3 — золото-нікелевий сплав з 5% нікелю; 4 — Паладій-Срібний сплав з 40% срібла (ПдСр-40); 5 — ПдСр-40 (анод) — ПЛН-5 (катод); 6 — пдср-40 (катод) — ПЛН-5 (анод); 7 — срібло; 8 — безкиснева мідь у водні.

Далі проведемо ідентифікацію моделі місткової ерозії методом регресійного аналізу [11]. Мінімізованою функцією похибки (різниця між прогнозованою моделлю і даними експерименту) при регресійному аналізі є сума квадратів похибок. Завдяки цьому вдається застосувати метод найменших квадратів [10]. Тобто знайдемо апроксимуючу функцію залежності величини містка ерозії від струму так, щоб функція  $s(i)$  проходила максимально близько до всіх точок отриманих експериментальним шляхом.

Ключовий момент полягає у виборі класу наближених функцій. Основна вимога до цих функцій — це незалежність результатів відліку від початку відліку, тобто від зсуву по послідовності значень аргументу. Іншими словами, необхідно, щоб кінцева множина функцій вибраного для апроксимації класу переходила сама в себе при заміні  $i$  на  $i + k$ . Такими властивостями володіють:

- лінійні комбінації статичних функцій  $1, i, i^2, \dots, i^n$ ;
- експоненціальні функції  $e^{-a \cdot i}$ ;
- степеневі функції  $i^a$ .

Використання будь-якої іншої кінцевої множини функцій, крім перерахованих, вимагає наявності природного початку відліку, бо його вибір впливає на результат.

Оскільки при дослідженнях довжини містків ерозії від струму найбільш часто зустрічаються незмінні або повільно мінливі криві, то доцільно використовувати аналогічні залежності при виборі методів апроксимації:

- лінійна апроксимація

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot i; \quad (1)$$

- квадратична апроксимація

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2; \quad (2)$$

- експоненціальна апроксимація

$$s(i) = A \cdot e^{a \cdot i}; \quad (3)$$

- степенева апроксимація

$$s(i) = A \cdot i^a. \quad (4)$$

Для обробки даних MATLAB використовує різні функції апроксимації даних поліномами за методом найменших квадратів — поліноміальної регресії. Однією з таких функцій є `polyfit(x, y, n)`,

яка повертає вектор коефіцієнтів полінома  $p(x)$  степеня  $n$ , який з найменшою середньоквадратичною похибкою апроксимує функцію  $y(x)$ , результатом є вектор-рядок довжиною  $n + 1$ , що містить коефіцієнти полінома в порядку зменшення степенів [12].

Для проведення розрахунків в MATLAB місткової ерозії сплаву ПЛІ-10 вводимо вектори-стовбці експериментальних даних струму та довжини містка ерозії

```
>> i=[10 100 200 300 400 500 600 700 800 900
1000];
>> s=[0.5 1.14 1.52 1.87 2.21 2.56 2.9 3.23
3.56 3.88 4.21];
```

Для полінома першого степеня (лінійна апроксимація) в MATLAB

```
>> coeff1=polyfit(i,s,1)
coeff1 = 0.003562938870820 0.722564256525727
```

Для полінома другого степеня (квадратична апроксимація) в MATLAB

```
>> coeff2=polyfit(i,s,2)
coeff2 = -0.000000817889248 0.004385599991898
0.596754494347372
```

Подальше дослідження викликає певні труднощі, оскільки в MATLAB немає функцій експоненціальної та степеневі апроксимації.

Для проведення експоненціальної апроксимації в MATLAB прологарифмуємо праву і ліву частини рівняння (3). В результаті отримаємо

$$\ln(s) = \ln(A \cdot e^{a \cdot i}) \text{ або } \ln(s) = \ln(A) + a \cdot i.$$

Якщо ввести заміну  $S = \ln(s)$ ,  $B = \ln(A)$  то експоненціальна функція перетворюється на поліном першого порядку:

$$S = B + a \cdot i. \quad (5)$$

Врахувавши, що  $A = e^B$  для експоненціальної апроксимації в MATLAB

```
>> S=log(s);
coeffe=polyfit(i,S,1);
coeffe=[coeffe(1) exp(coeffe(2))];
coeffe = 0.001772650510313 0.892458860657700
```

Для проведення степеневі апроксимації в MATLAB прологарифмуємо праву і ліву частини рівняння (4). В результаті отримаємо

$$\ln s = \ln(A \cdot i^a) \text{ або } \ln(s) = \ln(A) + a \cdot \ln i.$$

Якщо ввести заміну  $S = \ln(s)$ ,  $B = \ln(A)$ ,  $I = \ln i$  то степенева функція перетворюється на поліном першого порядку:

$$S = B + a \cdot I. \quad (6)$$

Враховавши, що  $A = e^B$  для експоненціальної апроксимації в MATLAB

```
>> S=log(s);
I=log(i);
coeffs=polyfit(I,S,1);
coeffs=[coeffs(1) exp(coeffs(2))]
coeffs = 0.464957479263563 0.148352348369164
```

Результати апроксимації зведені в табл. 2.

Середня похибка апроксимації  $\Delta s$  для кожної моделі відповідного контактного матеріалу розраховується за формулою

$$\Delta s = \frac{\sum_{j=1}^n |s_j - s'_j|}{n} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де  $s'_j$  — розрахункове значення в точці  $i_j$  за рівнянням апроксимації;  $n$  — кількість точок апроксимації.

Таблиця 2

*Результати апроксимації дослідження залежності довжини містків ерозії від струму*

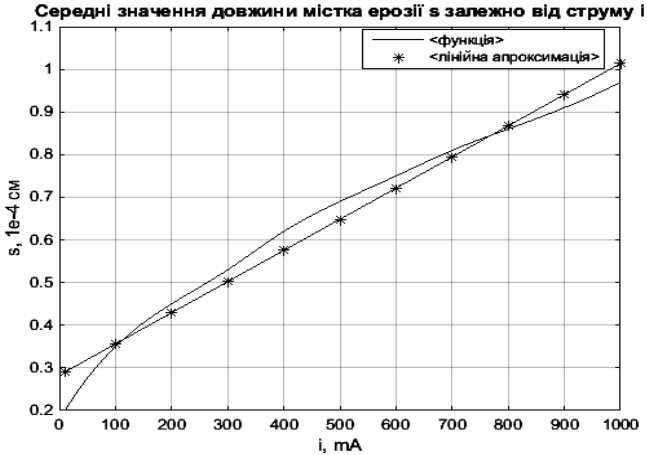
Сплав	1 — ПЛН10	2 — ПдСр40	3 — ЗЛН5	4,5,6 — ПЛН5	7 — Ср 999	8 — мідь
Лінійна регресія $s(i) = a_0 + a_1 \cdot i$ [10; 1000]						
$a_1$	0.0036	0.0016	0.0011	0.0013	0.00073	0.0000498
$a_0$	0.72	0.79	0.66	0.47	0.283	0.092
$\Delta s$ %	3.42	12.88	13.53	19.15	5.15	13.58
Квадратична регресія $s(i) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2$ [10; 1000]						
$a_2$	-0.00000082	-0.0000022	-0.00000176	-0.0000018	-0.00000042	-0.0000002
$a_1$	0.00439	0.00376	0.00289	0.003089	0.00115	0.0002555
$a_0$	0.59675	0.452	0.389	0.1958	0.218	0.0608
$\Delta s$ %	2.45	7.46	8.65	8.41	1.88	4.5
Експоненціальна регресія $s(i) = A \cdot e^{a \cdot i}$ [10; 1000]						
$a$	0.00177	0.001525	0.00145	0.00212	0.00133	0.0005567
$A$	0.892	0.6437	0.5189	0.305	0.304	0.08586
$\Delta s$ %	13.77	22.73	23.26	33.84	11.33	15.55
Степенева регресія $s(i) = A \cdot i^a$ [10; 1000]						
$a$	0.465	0.496	0.4898	0.717	0.35	0.2057
$A$	0.148	0.0788	0.0636	0.014	0.0786	0.0346
$\Delta s$ %	8.05	9.09	11.56	16.88	6.2	9.21

Графіки відповідних функцій для Ср 999 представлено на рис. 2-5.

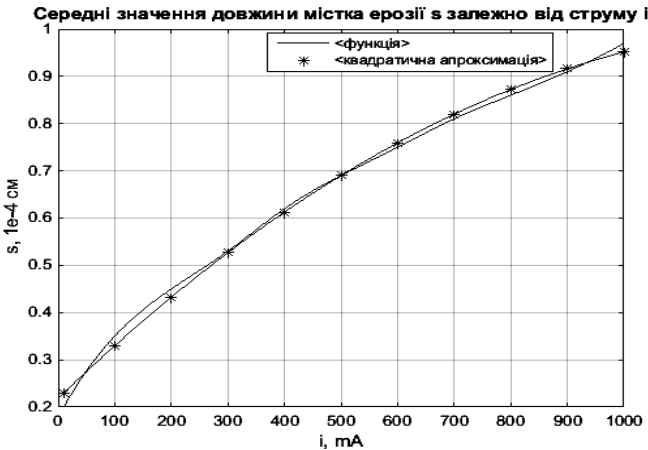
Середня похибка апроксимації  $\Delta S$  для кожної моделі різних контактних матеріалів розраховується за формулою

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m}, \quad (8)$$

де  $\Delta s_k$  — похибка апроксимації (7) для кожної моделі відповідного контактного матеріалу за рівнянням апроксимації;  $m$  — кількість досліджуваних функцій,  $m = 6$ .



**Рис. 2.** Середні значення довжини містка ерозії  $s(i)$  для сплаву Cr 999 за результатами експерименту та апроксимованої функцією  $s(i) = a_0 + a_1 \cdot i$



**Рис. 3.** Середні значення довжини містка ерозії  $s(i)$  для сплаву Cr 999 за результатами експерименту та апроксимованої функцією  $s(i) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2$



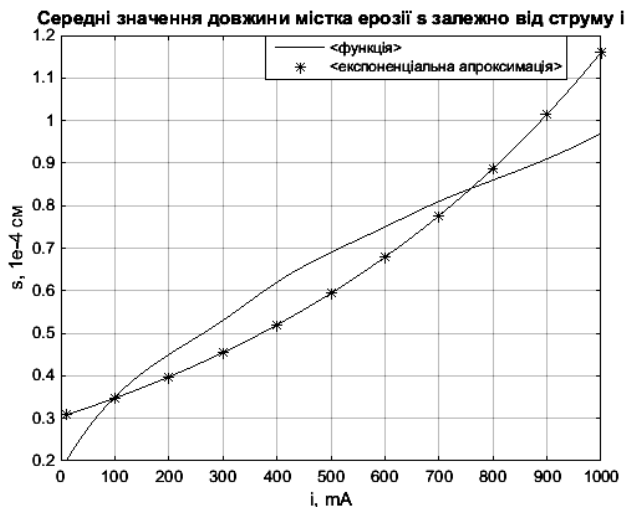


Рис. 4. Середні значення довжини містка ерозії  $s(i)$  для сплаву Sr 999 за результатами експерименту та апроксимованої функцією  $s(i) = A \cdot e^{a \cdot i}$

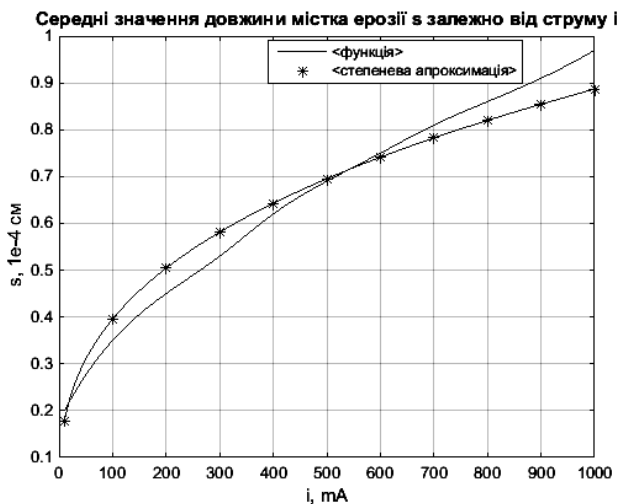


Рис. 5. Середні значення довжини містка ерозії  $s(i)$  для сплаву Sr 999 за результатами експерименту та апроксимованої функцією  $s(i) = A \cdot e^{a \cdot i}$

Середні похибки моделей місткової ерозії (8):

- лінійна модель

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m} = \frac{3.42 + 12.88 + 13.53 + 19.15 + 5.15 + 13.58}{6} = 12.95\%;$$

- квадратична модель

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m} = \frac{2.45 + 7.46 + 8.65 + 8.41 + 1.88 + 4.5}{6} = 5.56\%;$$

- експоненціальна модель

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m} = \frac{13.77 + 22.73 + 23.26 + 33.84 + 11.33 + 15.55}{6} = 20.08\%;$$

- степенева модель

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m} = \frac{8.05 + 9.09 + 11.56 + 16.88 + 6.2 + 9.21}{6} = 10.17\%.$$

Значення середньої похибки апроксимації від 7% до 15% свідчить про задовільно підібрану модель, а до 7% — добре підібрану модель [13].

Аналіз результатів визначення середньої похибки показав, що тільки апроксимація експоненціальною функцією дає похибку більшу за 15%, тому така модель не може бути рекомендована в якості моделі місткової ерозії контактів.

В результаті дослідження отримано моделі місткової ерозії:

- лінійна модель

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot i, \quad (9)$$

де  $a_0 = (1 \div 8) \cdot 10^{-1}$ ,  $a_1 = (5 \div 360) \cdot 10^{-5}$ ;

- квадратична модель

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2, \quad (10)$$

де  $a_0 = (1 \div 8) \cdot 10^{-1}$ ,  $a_1 = (2,6 \div 44) \cdot 10^{-4}$ ,  $a_2 = -(2,0 \div 22) \cdot 10^{-7}$ ;

- степенева модель

$$s(i) = A \cdot i^a, \quad (11)$$

де  $A = (1,4 \div 15) \cdot 10^{-2}$ ,  $a = (2,1 \div 7,1) \cdot 10^{-1}$ .

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження було отримано вирази (9)-(11) для математичних моделей місткової ерозії слабко-струмових електричних контактних пар у вигляді алгебраїчних рівнянь лінійної квадратичної та степеневі регресії та визначено їх похибки з використанням моделюючої системи MATLAB. Оскільки

середня похибка лінійної (12,95%) квадратичної (5,56%), та степеневі (10,17%) апроксимації не перевищує 15%, то отримані рівняння можуть бути використані в якості математичних моделей місткової ерозії контактів. Також необхідно відмітити, що квадратична функція більш якісною математичною моделлю місткової ерозії слабкострумних електричних контактних пар, оскільки її похибка практично вдвічі менша за похибки степеневі та лінійної моделей.

### Список використаних джерел:

1. Григорьев А. А., Ваткина М. А. Анализ физических процессов износа электрических контактов коммутационных низковольтных аппаратов. *Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева*. 2014. № 2 (82). С. 3-13.
2. Декабрун И. Е. Состояние инженерно-технических исследований в области слаботочных релейных контактов. *Электрические контакты*. М.: Наука, 1973. С. 15-19.
3. Разумихин М. А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов М.: Энергия, 1964.
4. Holm R. Electric contacts: theory and application / by Ragnar Holm with Else Holm ; preface by J.B.P. Williamson. 4th ed. Berlin ; London: Springer, 2011. 484 p.
5. Montgomery S., Kennedy D., O'Dowd N. Analysis of Wear Models for Advanced Coated Materials. *Matrib: International Conference on Materials, Tribology, Recycling, Lipanj*, Croatia, June 24-26, 2009.
6. Мышкин Н. К., Кончиц В. В. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 560 с.
7. Недорезов В. Г., Цыганков А. И. Влияние продуктов износа контактной пары потенциометра на надежность его работы. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*, в 2 т. Пенза: ПГУ, 2015. Т. 2. С. 153-154.
8. Мрачковський А. М. Дослідження електричної ерозії поверхонь різних контактних пар низьковольтних комутаційних апаратів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. № 242. С. 155-158.
9. Мрачковський А. М. Дослідження закономірностей електричної ерозії дослідних зразків контакт — деталей на основі срібла і міді. *Енергетика і автоматика*. 2016. № 1. С. 82-89.
10. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем : навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2010. 260 с.
11. Радченко С. Г. Статус математических моделей, получаемых с использованием регрессионного анализа. *Математичні машини і системи*. 2016. № 2. С. 138-147.
12. Лазарев Ю. Ф. Довідник з MATLAB : електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 132 с.
13. Петрянин Д. Л., Юрков Н. К., Романенко Ю. А. Повышение точности расчетов методов аппроксимации. *Труды международного симпозиума Надежность и качество*. 2015. № 1. С. 123-127.

## MODELING OF CAPACITIVE EROSION OF LOW-CURRENT ELECTRICAL CONTACTS USING MATLAB

The article considers the possibility of constructing a mathematical model of the process of mechanical erosion of low-current electrical contact pairs using the MATLAB modeling system by identification, that is, obtaining a mathematical model of a real object based on experimental data presented in the form of algebraic equations.

Capacious erosion of electrical contact pairs and the associated transfer of metal from one contact surface to another significantly affects the wear resistance of electrical contacts of relays, potentiometers, potentiometric sensors, encoders, and other low-current switching equipment. However, the size of the bridge during contact erosion, in addition to the current value, is affected by many factors, namely: the speed of closing and opening, clamping force, temperature, pressure and density of the environment, contact geometry, contact material parameters, and other processes. Therefore, creating a mathematical model that would take into account all the factors that affect the capacious erosion of contacts is quite a complex mathematical task. This leads to a wide use of empirical dependencies in the form of fairly simple power functions. The study revealed that the error given by models using power functions is quite high and practically does not differ from the error of models using linear functions. Therefore, to select the optimal cost and wear resistance of contact materials, researchers are forced to use the results obtained by switching tests of contact materials. However, as a result of the research, it was found that in order to reduce the error and obtain a more adequate model, it is advisable to use a quadratic function, the use of which reduces the error by about half.

As a result of the study of contact pairs from different contact materials, the following was revealed: the exponential function cannot be used as a model of low-current electrical contact pairs; the linear and power functions give quite acceptable results and can be recommended for use at the initial stages of modeling the process of low-current electrical contact pairs; the quadratic function is a more adequate mathematical model of erosion of electrical contact pairs and the associated transfer of metal from one contact surface to another significantly affects the wear resistance of electrical contacts of relays, potentiometers, potentiometric sensors, encoders, and other low-current switching equipment. However, the size of the bridge during contact erosion, in addition to the current value, is affected by many factors, namely: the speed of closing and opening, clamping force, temperature, pressure and density of the environment, contact geometry, contact material parameters, and other processes. Therefore, creating a mathematical model that would take into account all the factors that affect the mystical erosion of contacts is quite a complex mathematical task. This leads to a wide use of empirical dependencies in the form of fairly simple power functions. The study revealed that the error given by models using power functions is quite high and practically does not differ from the error of models using linear functions. Therefore, to select the optimal cost

and wear resistance of contact materials, researchers are forced to use the results obtained by switching tests of contact materials. However, as a result of the research, it was found that in order to reduce the error and obtain a more adequate model, it is advisable to use a quadratic function, the use of which reduces the error by about half.

As a result of the study of contact pairs from different contact materials, the following was revealed: the exponential function cannot be used as a model of low-current electrical contact pairs; the linear and power functions give quite acceptable results and can be recommended for use at the initial stages of modeling the process of low-current electrical contact pairs; the quadratic function is a more adequate mathematical model of.

**Key words:** *contact pairs, mathematical model, dynamics of electrical processes, regression analysis, electrical erosion.*

Отримано: 17.09.2020

УДК 004.832

DOI: 10.32626/2308-5916.2020-21.125-139

**С. І. Шаповалова**, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

## **ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ПРОДУКЦІЙНИХ ПРАВИЛ В ERLANG**

У статті запропоновано формалізацію представлення в Erlang продукційної моделі представлення знань та відповідне представлення продукційних правил, умовна частина яких відповідає логіці першого порядку. Метою роботи є створення функції Erlang, яка не тільки представляє в базі знань правило висновування, а також виконує його активізацію при виклику.

Наведено відомості про існуючі реалізації логічного висновування в Erlang за обома підходами до формування міркувань: логічним — Erlog та продукційним: ERESYE, SERESYE та RUNES II. Обґрунтовано доцільність розроблення для Erlang власного механізму міркувань, що базується саме на властивостях цієї мови програмування.

Визначено базові принципи концепції логічного висновування за продукційною моделлю, орієнтовані на ефективне використання вбудованого механізму співставлення Erlang, для прискорення логічного висновування. В запропонованій формалізації кожна одиниця представлення має два визначення за синтаксисами логіки та Erlang. Формалізацію відповідно до рівню об'єктів представлення розподілено на три частини: визначення базових елементів логіки, представлення умов логічного висновування (зразків і фактів), представлення безпо-