

Andrzej RAWICZ

FIZYCZNE ASPEKTY NIEZAWODNOŚCI ELEMENTÓW SPRĘŻYNUJĄCYCH PRZEWODZĄCYCH  
PRĄD W URZĄDZENIACH AUTOMATYKI. ANALIZA TEORETYCZNA

Streszczenie. W pracy została podana teoretyczna analiza niezawodności elementów sprężynujących, przewodzących prąd elektryczny, oparta na zjawiskach fizyko-chemicznych przewodzących do uszkodzeń, bądź zachodzących w czasie uszkodzenia. W oparciu o funkcje mocno skorelowane udowodniono możliwość przeprowadzania badań przyspieszonych niezawodności wyżej wymienionych elementów poprzez badania ich wyjściowych własności materiałowych.

1. Wstęp

Zagadnienia niezawodności układów automatyki stają się coraz ważniejsze w związku z powierzaniem tym układom odpowiedzialnych funkcji sterowania dużymi procesami technologicznymi, transportowymi itp. W warunkach sterowania bezpośredniego awaria systemów sterowania może doprowadzić do przerwania procesu technologicznego lub spowodować katastrofę. I. jedno i drugie może przynieść duże straty ekonomiczne, lub nawet ofiary w ludziach. W związku ze wzrastającą niezawodnością elementów funkcjonalnych (elementów scalonych, mikroprocesorów itp.), których częstotliwość uszkodzeń sięga rzędu  $10^{-7}$  -  $10^{-10} \frac{1}{h}$  coraz istotniejsza staje się niezawodność elementów pomocniczych, a zwłaszcza mechanicznych bądź połączeniowych. One bowiem coraz częściej stają się przyczyną awarii systemów sterowania w porównaniu z elementami funkcjonalnymi. Z powodu długiego czasu niezawodnej pracy dzisiejszych urządzeń automatyki w warunkach normalnych badania niezawodności muszą być przyspieszane. Prowadzenie badań w warunkach intensywnych wymuszeń typu temperatura, obciążenia elektryczne, wibracje, wilgotność, ciśnienie otoczenia pozwalają na wyraźne skrócenie czasu trwania badań i ich kosztów. Jeszcze korzystniejsze byłoby poznanie zjawisk podstawowych powodujących uszkodzenia elementów i na tej podstawie opracowanie metody pozwalającej na określenie niezawodności tych elementów w oparciu o ich parametry początkowe.

2. Sformułowanie problemu

Istotnym zagadnieniem w badaniach niezawodności urządzeń automatyki jest określenie i dokładne zbadanie fizycznych czy fizykochemicznych przy-

czyn niszczenia poszczególnych elementów urządzenia. Znajomość tych przyczyn pozwala na opracowanie metod przedłużenia żywotności i poprawienia parametrów pracy elementów, a zatem podniesienia niezawodności całego urządzenia.

Zajmijmy się mechaniczno-elektryczną stroną niszczenia elementów sprężynujących, przewodzących prąd, takich jak zestyki kontaktronów, zestyki przekaźników i elementy sprężyste złączy przewodzących prąd. Uszkodzenia te można ogólnie i umownie podzielić na dwa rodzaje: uszkodzenia powierzchni kontaktowych i złamania części sprężynujących. Uszkodzenia powierzchni kontaktowych są spowodowane najczęściej wyładowaniem łukowym zachodzącym między tymi powierzchniami. Może to spowodować nadtopienie metalu kontaktowego i doprowadzić do sklejenia powierzchni kontaktowych od razu, bądź wykopnąć krater. Krater stanowi nierówność powierzchni ograniczającą wielkość styku, zatem w czasie przepływu prądu elektrycznego może nastąpić zgrzanie oporowe. Maksymalna temperatura kontaktu  $T_m$  może być wyrażona następującą zależnością [1]:

$$T_m^2 - T_o^2 = \frac{U_k^2}{4B}$$

gdzie:

$T_o$  - temperatura otoczenia,

$U_k$  - napięcie międzystykowe,

$B$  - stała Lorentza, równa w przybliżeniu  $2.45 \times 10^{-8} \left( \frac{W\Omega}{\text{grad}} \right)$ .

Fizyka i fizykochemia zjawisk zachodzących na stykach zostały dokładnie przeanalizowane w szeregu pozycji literaturowych [1,2,3,4,5,6,7].

### 3. Fizyka złamań i przepaleń części sprężynujących prądoprzewodzących

Aktualnie zostanie przeanalizowana fizyka złamań lub przepaleń części sprężynujących prądoprzewodzących, zestyków kontaktronów, zestyków przekaźników i elementów sprężystych złączy prądoprzewodzących bez obciążenia prądowego i z obciążeniem prądowym.

#### a) Złamania części sprężynujących bez obciążenia prądowego

W metalu poddanym mechanicznemu obciążeniu zmiennemu w czasie, niższemu nawet znacznie od krytycznego, przy którym metal pęka natychmiast, zachodzi szereg zjawisk zwanych zmęczeniowymi. Dominują wśród nich lokalne odkształcenia plastyczne, cykliczne umocnienia i osłabienia, nukleacja (zarodkowanie), rozwój i łączenie się mikropeknięć. Podział przebiegu zmęczenia na cykliczne umocnienia (lub osłabienia), zarodkowanie pęknięć i ich rozwój jest jednocześnie pierwszym podziałem hipotez zmęczeniowych [8]. Jest to podział o tyle formalny, że zjawiska te na siebie częściowo zachodzą. Istotną rolę odgrywa tu energia błędu ułożenia, której wartość steruje nie jako układami dyslokacyjnymi w zależności od poziomu naprężenia.

Bilby, Cottrel i Swinden [9] pokazali, że kryterium na naprężenie rozrywające  $p$  konieczne do propagacji pęknięcia w materiale, który jest częściowo deformowany plastycznie, jest dane przez równość

$$p \approx \left( \frac{E\gamma}{a} \right)^2 \quad (1)$$

gdzie:

$E$  - jest modułem Younga,  $a$  jest połową szerokości zainicjowanego pęknięcia,

$\gamma$  - natomiast jest stałą, która według Griffitha [10] jest równa energii powierzchniowej ciała stałego. Na podstawie tego kryterium można oszacować ilość cykli zmęczenia potrzebną do zainkubowania pęknięcia:

$$n \approx \frac{\mu \mathcal{E}_{kr} p_{kr}}{\pi a \tau_m^2} \quad (2)$$

gdzie:

$\mu$  - moduł ścinający,

$\tau_m$  - maksymalne naprężenie rozciągające,

$\mathcal{E}_{kr}$  - krytyczne odkształcenie,

$p_{kr}$  - naprężenie krytyczne,

$a$  - połowa szerokości zainicjowanego pęknięcia.

Krytyczne odkształcenie  $\mathcal{E}_{kr}$  można przedstawić zgodnie z Zakrzewskim [11] jako

$$\mathcal{E}_{kr} = \int_{T_0}^{T_1} \alpha dT \quad (3)$$

gdzie:

$\alpha$  - jest współczynnikiem rozszerzalności cieplnej,

$T_1$  - temperaturą topnienia materiału oraz  $T_0$ , temperaturą otoczenia.

Natomiast

$$p_{kr} = \frac{3GE}{3G-E} \int_{T_0}^{T_1} \alpha dT \quad (4)$$

gdzie:

$G$  - jest modułem sztywności postaciowej.

Gołaski [12] określił krytyczną gęstość dyslokacji powodującą utratę stateczności krystalicznej jako

$$\varrho_{kr} = \int_{T_0}^{T_1} \frac{\alpha}{b^2} dT \quad (5)$$

gdzie:

$b$  - jest długością wektora Burgersa dyslokacji.

Handzel [13] podała na podstawie rozważań teoretycznych wzór na gęstość dyslokacji w funkcji naprężeń i liczby cykli  $n$ , który wygląda następująco:

$$\varrho = \varrho_0 (\exp \chi_{p_{\max}} - \exp \chi_{p_{\min}}) \ln n \quad (6)$$

gdzie:

- $Q_0$  - gęstość wyjściowa dyslokacji ( $n=0$ ),  
 $p_{\max}$  - naprężenie maksymalne w cyklu,  
 $p_{\min}$  - naprężenie minimalne w cyklu,  
 $\chi$  - stała materiałowo-postaciowa.

W przypadku elementów objętych niniejszym opracowaniem można przyjąć, że  $p_{\min}=0$ , zatem wzór (6) uprości się do

$$Q = Q_0 \exp \chi p_{\max} \ln n \quad (7)$$

Po wstawieniu (5) do (7) otrzymujemy wzór na krytyczną ilość cykli zmęczenia potrzebą do zapoczątkowania pęknięcia

$$n_{kr} = \exp \frac{\int_0^T 1 - \frac{\alpha}{b} dt}{Q_0 \exp \chi p_{\max}} \quad (8)$$

który jest niezły zgodny z eksperymentem.

Miarę niezawodności elementów zgodnie z definicją [17] zapisuje się jako:

$$R(t) = \exp \left( - \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right) \quad (9)$$

gdzie:

$\lambda(\tau)$  - jest intensywnością uszkodzeń.

Podstawiając  $t = \frac{2\pi}{\omega} n$ , gdzie  $\omega$  jest średnią częstością włączania, po zróżniczkowaniu  $dt = \frac{2\pi}{\omega} dn$ , otrzymujemy

$$R(n) = \exp \left( - \frac{2\pi}{\omega} \int_0^n \lambda(n') dn' \right) \quad (10)$$

Zupełnie naturalne jest przyjęcie, że intensywność uszkodzeń jest proporcjonalna do gęstości defektów mikroskopowych w materiale, czyli  $\lambda(n) = kQ$ , gdzie  $k$  jest parametrem dopasowania modelu fizycznego. Po wstawieniu (7) i uzupełnieniu występującego w nim  $\chi$  o zależność temperaturową jako  $\chi = \chi_0 \exp \left( - \frac{E}{k_B T} \right)$ , gdzie  $E$  jest energią aktywacji dyslokacji, zaś  $k_B$  stałą Boltzmana, wzór na intensywność uszkodzeń będzie

$$\lambda(n) = kQ = kQ_0 \exp \left[ p_{\max} \chi_0 \exp \left( - \frac{E}{k_B T} \right) \right] \ln n \quad (11)$$

Zgodnie ze wzorem (9)

$$R(n) = \exp \left\{ - \frac{2\pi}{\omega} k Q_0 \exp \left[ p_{\max} \chi_0 \exp \left( - \frac{E}{k_B T} \right) \right] \int_0^n \ln n' dn' \right\} \quad (12)$$

i po scałkowaniu:

$$R(n) = \exp \left\{ -\frac{2\pi}{\omega} k Q_0 \exp \left[ p_{\max} \chi_0 \exp \left( -\frac{E}{k_B T} \right) \right] \frac{2\pi}{\omega} n (\ln \frac{2\pi}{\omega} n - 1) \right\} \quad (13)$$

Wzór ten jest słuszny dla  $n \ll n_{kr}$ .

Dla  $n$  zbliżonego do  $n_{kr}$  celowe jest przyjęcie rozkładu normalnego dla częstotliwości uszkodzeń  $\alpha(n)$ :

$$\alpha(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} G} \exp \left( -\frac{(n - n_{kr})^2}{2G^2} \right) \quad (14)$$

i zgodnie z [17]

$$R(n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} G} \int_0^{+\infty} \exp \left( -\frac{(n - n_{kr})^2}{2G^2} \right) dn \quad (15)$$

gdzie  $G$  jest wariancją rozkładu. Wielkością wyliczalną dla zbioru możliwych wyników  $n_{kr}$  i najbardziej zbliżoną do  $G$  jest wariancja próby [18]

$$S^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (n_{kri} - \bar{n}_{kr})^2$$

która dla  $k \rightarrow \infty$  jest równa  $G^2$ , gdzie  $k$  jest liczebnością próby. Aby uniknąć wykonywania szeregu żmudnych prób niszczących na wielu próbkach, wskazane byłoby przedstawienie  $S$  jako funkcji błędu różniczki zupełnej  $n_{kr}$ , to znaczy  $S = S(\Delta n_{kr})$ .  $\Delta n_{kr}$  jest błędem różniczki zupełnej szacowanym na podstawie rozrzutu parametrów wyjściowych.

$$S^2 = (\Delta n_{kr})^2 \quad (16)$$

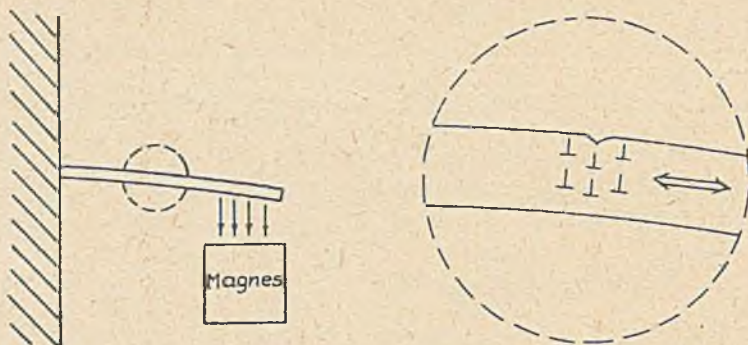
Wzór ten jest oczywiście przybliżony.

b) Uszkodzenia części sprężynujących pod obciążeniem prądowym

Aby zostało zainicjowane pęknięcie zmęczeniowe musi w metalu wystąpić lokalne spiętrzenie naprężeń spowodowane ostrą nierównością powierzchni zwaną karbem postaciowym. W materiale technicznym zawsze taka wada wystąpi, co związane jest z obróbką materiału. Podczas cyklicznego gięcia materiału zaczną w tym miejscu spiętrzać się dyslokacje zgodnie z modelem podanym na rys. 1.

Wzrost gęstości dyslokacji w metalu ma wpływ na szereg własności makroskopowych materiału. Oprócz własności mechanicznych dyslokacje zmieniają również własności elektryczne metalu.

Podczas analizowania rozpraszania elektronów przewodnictwa na dyslokacjach należy uwzględnić dwa efekty: wpływ długozasięgowego pola odkształceń sprężystych w dyslokacji oraz rolę rdzenia dyslokacji. Rozpraszanie na polu odkształceń obliczyli Hunter i Nabarro [14], którzy stosowali metodę potencjału deformacyjnego zaniedbując rolę rdzenia. Okazało się jednak, że rdzeń wywiera wpływ co najmniej taki sam [15] jak pole deformacji. Po-



Rys. 1. Model dyslokacyjny pęknięcia zmęczeniowego. (Podwójna strzałka oznacza kierunek prądu elektrycznego).

tencjał deformacyjny w granicznym przypadku elektronów swobodnych, odpowiadający wydłużeniu (ściśnięciu), co zachodzi w czasie pracy omawianych elementów, wynosi:

$$V(r) = \frac{2}{3} \eta \Delta(r) \quad (17)$$

gdzie  $\eta$  jest energią Fermiego elektronów,  $r$  odległością od rdzenia, natomiast  $\Delta(r)$  jest polem odkształceń w dyslokacji. Dokładne wyliczenie potencjału rozpraszającego jest trudne, można jednak oszacować, przy pewnych upraszczających założeniach modelowych, wpływ zmian gęstości dyslokacji na zmiany oporności elektrycznej. Lokalnie znacznie wzrastający w obszarze dyslokacji opór elektryczny w przypadku spiętrzenia dyslokacji podnosi oporność elementu sprężynującego. Niech średnia oporność materiału w obszarze dyslokacji będzie  $\Theta_{dys} > \Theta_{wyj}$ , gdzie  $\Theta_{wyj}$  jest opornością materiału niezdeformowanego. Efektywny zasięg działania pola deformacji dyslokacji w kierunku prostopadłym do osi dyslokacji można uznać za  $r_0 \sim 10^{-4}$  cm [16]. Zatem przy geometrii układów dyslokacyjnych w obszarze spiętrzenia, ukazanej na rys. 1 można przyjąć, że ubytek przekroju prostopadłego do kierunku przepływu prądu elektrycznego na niekorzyść materiału nienaprężonego można zapisać jako:

$$\Delta S = S_0 - 4har_0 Q_1 \quad (18)$$

gdzie:

$Q_1$  - gęstość liniowa dyslokacji na przekroju w kierunku grubości  $h$  elementu sprężynującego,

$a$  - szerokość elementu sprężynującego,

$S_0$  - przekrój całkowity.

Opór lokalnej strefy spiętrzenia dyslokacji  $R_k$  można przedstawić wzorem

$$R_k = \frac{\Theta_{dys} \cdot \Theta_{wyj} \cdot l}{\Theta_{wyj} 4har_0 Q_1 + \Theta_{dys} (S_0 - 4har_0 Q_1)} \quad (19)$$

gdzie  $l$  jest długością obszaru spiętrzenia dyslokacji w kierunku przepływu prądu elektrycznego. Ponieważ, jak już zostało stwierdzone powyżej  $\theta_{dys} > \theta_{wyj}, R_k$  rośnie ze wzrostem  $Q_1$ . Przy danym prądzie  $I$ , przepływającym przez element sprężynujący, ciepło Joule'a wydzielające się w strefie inicjacji pęknięcia zmęczeniowego spowoduje lokalny przyrost temperatury elementu  $\Delta T$  równy zgodnie z [17]:

$$\Delta T = T_k - T_o = R_{\theta} P + 273^{\circ} = R_{\theta} I R_k^2 + 273^{\circ} \quad (20)$$

gdzie:

$T_o$  - temperatura otoczenia w stopniach Celsiusa,

$R_{\theta}$  - oporność cieplna dla odprowadzenia ciepła do otoczenia,

$P$  - moc wydzielona w obszarze podniesionej oporności,

$T_k$  - temperatura końcowa w stopniach Kelvina.

Po wstawieniu  $T_k$  ze wzoru (20) na miejsce  $T$  we wzorze na krytyczną ilość cykli (8) widzimy, że  $n_{kr}$  spada. Również ze wzorów (4) i (5) wynika, że przy wzroście temperatury  $T_o$ , której przyporządkujemy  $T_k$ , naprężenie krytyczne spada i spada krytyczna gęstość dyslokacji powodująca utratę stateczności krystalicznej. Intensywność uszkodzeń wyrażona wzorem (11) zależna explicite od temperatury wzrasta po wstawieniu wzoru (20)

$$\lambda(n) = k Q_o \exp[p_{max} \lambda_o \exp] - \frac{E}{k_B (R_{\theta} I R_k^2 + 273^{\circ})} \ln n \quad (21)$$

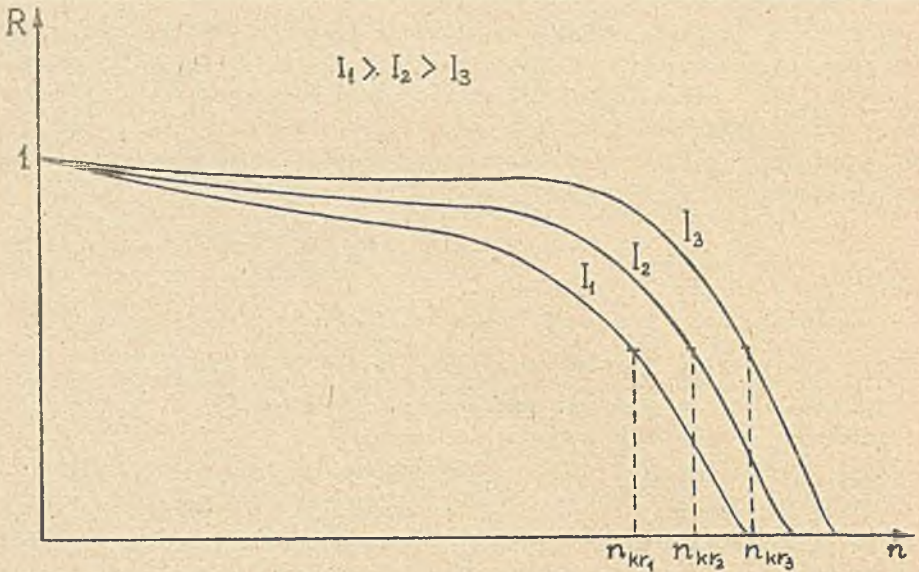
a zatem i niezawodność  $R(n)$  ze wzoru (13) spada. Podniesiona temperatura podnosi ilość fluktuacji termodynamicznych parametrów początkowych materiałów zwiększając ich rozrzut, co powoduje zwiększenie szerokości krzywej Gaussowskiej częstotliwości uszkodzeń  $\alpha(n)$  wg (14) w zakresie ilości cykli  $n$  w otoczeniu  $n_{kr}$ .

Ostatecznie miarę niezawodności w całym przedziale  $n \in (0, +\infty)$  określiliśmy superpozycją wzoru (13) i wzoru (15) z uwzględnieniem wzoru (20). Efekt, tego nałożenia prawdopodobieństw przedstawia graficznie rys. 2.

#### 4. Wnioski

a) Szczególnie korzystna sytuacja w badaniach niezawodności elementów urządzeń automatyki występuje, gdy można stworzyć adekwatny model fizyczny bądź fizykochemiczny uszkodzeń tych elementów. Można wtedy w oparciu o funkcje mocno skorelowane określić miarę niezawodności na bazie podstawowych, czyli wyjściowych cech materiałów, z których elementy są wykonane, oraz rozrzut tych cech.

b) W opisanym wyżej szczególnym przypadku elementów sprężynujących przewodzących prąd określone zostały w konsekwentny sposób związki między wyjściowymi własnościami, a miarą niezawodności tych elementów ze względu na uszkodzenia katastroficzne. Ewidentna zależność żywotności tych wyżej wy-



Rys. 2. Zmiany niezawodności elementów sprzężających przewodzących prąd elektryczny w funkcji ilości włączeń i wielkości obciążenia prądowego

mienionych elementów od czynników takich, jak moduły sprężystości, stan powierzchni po obróbce, wyjściowa gęstość dyslokacji, gęstość przepływającego prądu elektrycznego sugeruje szereg czynności technologicznych i użytkowych mogących znacznie podnieść niezawodność tych elementów.

#### LITERATURA

- [1] BAYER R., SIRICO J.: Wear of Electrical Contacts due to small-amplitude Motion. *Wear of Electrical Contacts*, March 1971 p. 103-107.
- [2] BRADFORD K.F.: An Experimental Dry-Reed Sealed Transfer Contact. B.L.R., May 1963.
- [3] BUTKIEWICZ G.: Dugowye procesy pri kommutacji elektriceskich cepiej. Izd. Wyssaja Skola, Moskwa 1967.
- [4] PIĄTKOWSKI A.: Wpływ indukcyjności na zjawiska stykowe i jego ograniczenia. Praca doktorska. Wrocław 1967.
- [5] SCOTT W.: Electrical Contact in Telephone exchanges: Contact Opening and Closing Phenomena and Quenching Techniques. 1969 cz. 1 i 2 POEEJ t. 61 s. 263.
- [6] LANDIS J.: Thermal method determines true contact resistance. *Design Circuits Linear* 1969 no 10.
- [7] KEMPISTY Z.: Analiza możliwości zastosowania sztucznego starzenia dla przyspieszenia procesów adaptacji kontaktronów. Praca doktorska. Wrocław 1974.
- [8] KOCANDA S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT Warszawa 1978.
- [9] BILBY B., COTTRELL A.: *Proc. Roy. Soc. (London)* A273,304 (1963).
- [10] WERTMANN J.: A International Conference on Fracture, Sendai, Japan 1965.



- [11] ZAKRZEWSKI M.: W sprawie dekohezji zmęczeniowej. Wytrzymałość zmęczeniowa tworzyw i elementów metalowych. IL IMP Warszawa 1961.
- [12] GOŁASKI L.: Badania nad określeniem stopnia zmęczenia metali. Praca doktorska. Wrocław 1964.
- [13] HANDZEL Z.: Hipoteza dekohezji mikroobjętości poddanej zmiennym naprężeniom. Praca doktorska IPPT Warszawa 1971.
- [14] HUNTER Z., NABARRO A.: Proc.Roy.Soc. (London) A220 542 (1953).
- [15] HARRISON W.: J.Phys.Chem.Solids 5, 44 (1958).
- [16] KOVACS L., ZSOLDOS L.: Dislocations and Plastic Deformation. Akademiai Kiado - Budapest 1973.
- [17] SOTSKOW B.S.: Niezawodność elementów i urządzeń automatyki. WNT, Warszawa 1973.
- [18] STRZAŁKOWSKI A., SŁIŻYŃSKI S.: Matematyczne opracowanie wyników pomiarowych. Warszawa 1975.

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАДЕЖНОСТИ ПРУЖИНЯЩИХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В УСТРОЙСТВАХ АВТОМАТИКИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Р е з ю м е

В работе дан теоретический анализ надежности пружинящих токопроводящих элементов, обусловленный физико-химическими приводящими к дефектам явлениями, либо происходящими во время повреждения. Опираясь на функции с крепкой коррелятивной связью доказана возможность проведения ускоренных исследований надежности выше указанных элементов путем исследования выходных свойств их материалов.

PHYSICAL ASPECTS OF RELIABILITY OF SPRINGING, ELECTRICAL CURRENT  
CONDUCTING PARTS IN ELECTRONIC EQUIPMENT. - A THEORETICAL ANALYSIS

S u m m a r y

The theoretical analysis of reliability of springing, electrical current conducting elements based on physical phenomena leading to failures, or happening during failures, has been given in this paper. Basing on strong correlated functions the possibility of reliability accelerated tests of the above mentioned elements by means of testing their initial material properties was proved.