

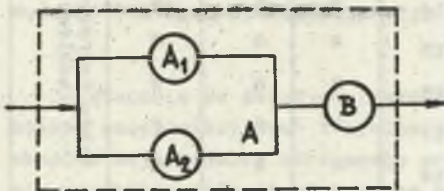
Jerzy ANTONIAK  
Sławomir BRODZIŃSKI

## OKREŚLENIE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU HAMULCA TARCZOWEGO MASZYNY WYCIĄGOWEJ

**Streszczenia.** Opis niezawodności systemu hamulca tarczowego ASEA maszyny wyciągowej dokonany został w oparciu o szeregowo-równoległą strukturę trójelementową. Dla przyjętej struktury przeprowadzono identyfikację procesu eksploatacji hamulca wyznaczając graniczne prawdopodobieństwa wystąpienia stanów. Niezawodność hamulca scharakteryzowana została za pomocą wskaźnika gotowości, oczekiwanego czasu pracy systemu oraz funkcji niezawodności. We wnioskach skomentowano uzyskane wyniki.

### 1. OPIS SYSTEMU TRÓJELEMENTOWEGO

Najprostszą strukturą umożliwiającą opis związków niezawodnościowych wewnątrz systemu hamulca tarczowego jest struktura trójelementowa, rys. 1.



Rys. 1. Trójelementowa struktura niezawodności hamulca tarczowego

Składa się ona z dwóch różnych jednostek strukturalnych:

- części rezerwowej A ( $A_1$  oraz  $A_2$ ),
- części wspólnej B.

Część rezerwowa A obejmuje dwie identyczne pod względem konstrukcyjnym jednostki  $A_1$  oraz  $A_2$  zwane agregatami hamulcowymi (pompowymi). Zadaniem agregatu

jest zasilanie części wspólnej B olejem pod ciśnieniem oraz sterowanie pracą siłowników poprzez zmianę ciśnienia w funkcji czasu wg założonego programu. Jeden z agregatów ( $A_1$  lub  $A_2$ ) stanowi rezerwę nieobciążoną. Część wspólna B realizuje bezpośrednio zadania hamulca, tzn. hamowanie, trzymanie oraz odhamowanie. Jej podstawowymi elementami są siłowniki hydrauliczne.

### 2. IDENTYFIKACJA PROCESU EKSPLOATACJI SYSTEMU HAMULCA TARCZOWEGO

Ustalenie repertuaru eksploatacyjnego hamulca rozpatrywanego jako system trójelementowy wymagało wcześniejszego określenia stanów eksploata-

cyjnych jego elementów  $A_1(A_2)$  oraz B w czasie dyspozycyjnym maszyny wyciągowej.

Przyjęto, że agregaty  $A_1(A_2)$  mogą znajdować się w jednym z trzech stanów eksploatacyjnych  $S_A$ , tzn. stanie pracy (P), naprawy (N) lub postoju rezerwowego (R), czyli oczekiwania agregatu rezerwowego na pracę.

Część wspólna hamulca B może przebywać w jednym z dwóch stanów  $S_B$ : pracy (P) lub naprawy (N). Dla tak przyjętych stanów eksploatacyjnych elementów struktury hamulca repertuar teoretycznie możliwych stanów eksploatacyjnych  $E_1$  obejmuje osiemnaście stanów, (tablica 1).

Tablica 1

Repertuar stanów eksploatacyjnych hamulca tarczowego

Stan	$S_A$		$S_B$	$S_H$	Stan	$S_A$		$S_B$	$S_H$
	$S_{A_1}$	$S_{A_2}$				$S_{A_1}$	$S_{A_2}$		
$E_1$	P	R	P	1	$E_{10}$	N	R	P	0
$E_2$	P	R	N	0	$E_{11}$	R	N	P	0
$E_3$	R	P	P	1	$E_{12}$	P	P	P	Stany teoretycznie możliwe
$E_4$	R	P	N	0	$E_{13}$	P	P	N	
$E_5$	N	P	P	1	$E_{14}$	N	R	N	
$E_6$	P	N	P	1	$E_{15}$	N	N	N	
$E_7$	N	P	N	0	$E_{16}$	R	N	N	
$E_8$	N	N	P	0	$E_{17}$	R	R	P	
$E_9$	P	N	N	0	$E_{18}$	R	R	N	

Wymienionym stanom odpowiada z punktu widzenia realizacji celu hamulca jeden z dwóch stanów niezawodnościowych hamulca  $S_H$ : zdatność - 1, niezdatność - 0.

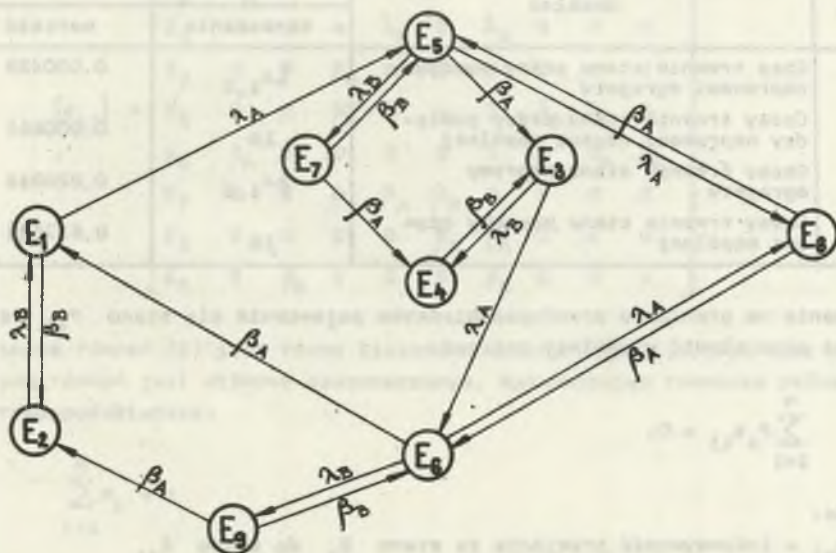
Pośród stanów teoretycznie możliwych wyeliminowano stany  $E_{12}-E_{18}$ . Są to stany technicznie niemożliwe dla przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego hamulca typu ASEA:  $E_{12}$  i  $E_{13}$  oraz stany  $E_{14}-E_{18}$ , które mogą pojawić się w czasie postoju koncesyjnego i jako takie nie są uwzględniane w analizie.

Zakłada się ponadto dla uproszczenia, że czas przełączania agregatów  $A_1$  i  $A_2$  jest pomijalnie mały, tzn. przejście ze stanu  $E_1\{P,R,P\}$  do stanu  $E_5\{N,P,P\}$  odbywa się natychmiast z pominięciem stanu  $E_{10}\{N,R,P\}$ .

Podobnie przejście ze stanu  $E_3\{R,P,P\}$  do stanu  $E_6\{P,N,P\}$  przebiega z pominięciem stanu  $E_{11}\{R,N,P\}$ .

Nadmienić należy, iż w przypadku wystąpienia stanów  $E_2, E_4, E_7$  i  $E_9$ , w zależności od czasu trwania naprawy części wspólnej hamulca B, agregat

$A_1(A_2)$  może być wyłączony przechodząc ze stanu pracy w stan postoju rezerwowego. Powrót części wspólnej B do stanu pracy determinuje ponowne włączenie agregatu.



Rys. 2. Graf procesu eksploatacji trójelementowego systemu hamulca tarczowego

Ostatecznie do dalszych rozważań przyjęto dziewięciostanowy repertuar stanów eksploatacyjnych trójelementowego systemu hamulca. Graf procesu eksploatacji hamulca tarczowego przedstawiono na rys. 2. Uwzględniono w nim wszystkie relacje zachodzące pomiędzy stanami  $E_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 9$ . Relacjami tymi są intensywności przejścia między stanami eksploatacyjnymi.

Jak wykazały badania 17 hamulców tarczowych krajowych maszyn wyciągowych [1], rozkłady czasów trwania stanu pracy i naprawy agregatu  $A_1(A_2)$  oraz części wspólnej hamulca B są rozkładami wykładniczymi. Parametry rozkładów przedstawiono w tabelicy 2.

Badany proces zmian stanów jest więc dziewięciostanowym procesem Markowa, gdyż rozkłady czasów trwania stanów są rozkładami wykładniczymi.

Dla procesu Markowa o skończonej liczbie stanów rozkład:

$$P_1(t) = P\{\Psi(t)\} = E_1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

nazywa się rozkładem chwilowym wartości procesu. Rozkład graniczny procesu Markowa określony jest wyrażeniem:

$$P_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t) \quad (2)$$

Parametry rozkładów wykładniczych czasów trwania stanów

Lp.	Rozkład	Parametr rozkładu	
		oznaczenia	wartość
1	Czas trwania stanu pracy pomiędzy naprawami agregatu	$\lambda_{A_{1,2}}$	0,000426
2	Czasy trwania stanu pracy pomiędzy naprawami części wspólnej	$\lambda_B$	0,000661
3	Czasy trwania stanu naprawy agregatu	$\beta_{A_{1,2}}$	0,820312
4	Czasy trwania stanu naprawy części wspólnej	$\beta_B$	0,637681

Równanie na graniczne prawdopodobieństwa pojawienia się stanu  $P_i$ ,  $i \in E$  można przedstawić w ogólnej postaci:

$$\sum_{i=1}^n P_i a_{ij} = 0, \quad (3)$$

gdzie:

$a_{ij}$  - intensywność przejścia ze stanu  $E_i$  do stanu  $E_j$ .

Intensywność przejścia w procesie Markowa o skończonej liczbie stanów można przedstawić w postaci macierzy intensywności przejścia  $[a_{ij}]$ .

Zakładając, że:

$$a_{ij} = \begin{cases} \lambda_A & \text{dla } E_{A_{1,2}}\{P\} \rightarrow E_{A_{1,2}}\{N\} \\ \lambda_B & \text{dla } E_B\{P\} \rightarrow E_B\{N\} \\ \beta_A & \text{dla } E_{A_{1,2}}\{N\} \rightarrow E_{A_{1,2}}\{P\} \\ \beta_B & \text{dla } E_B\{N\} \rightarrow E_B\{P\} \end{cases} \quad (4)$$

macierz intensywności przejścia ma postać [4]:

$$[a_{ij}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} E_1 & E_2 & E_3 & E_4 & E_5 & E_6 & E_7 & E_8 & E_9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \\ E_7 \\ E_8 \\ E_9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} x & \lambda_B & 0 & 0 & \lambda_A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_B & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & \lambda_B & 0 & \lambda_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_B & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_A & 0 & x & 0 & \lambda_B & \lambda_A & 0 \\ \beta_A & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & \lambda_A & \lambda_B \\ 0 & 0 & 0 & \beta_A & \beta_B & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_A & \beta_A & 0 & x & 0 \\ 0 & \beta_A & 0 & 0 & 0 & \beta_B & 0 & 0 & x \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

Liczba równań (4) jest równa liczności zbioru  $E\{1,2,\dots,9\}$ , lecz układ tych równań jest układem nieoznaczonym. Wprowadzając równanie pełności prawdopodobieństw:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (6)$$

i odrzucając jedno z równań (4), uzyskuje się jednoznaczne rozwiązanie. Układ równań (3) i (5) można przedstawić w postaci macierzowej [4]:

$$A^T \times P = B, \quad (7)$$

gdzie:

- $A^T$  - transponowana macierz współczynników przy niewiadomych granicznych prawdopodobieństwach wystąpienia stanów,
- $P$  - wektor kolumnowy szukanych niewiadomych,
- $B$  - wektor kolumnowy wolnych wyrazów równań.

W oparciu o macierz intensywności  $[a_{ij}]$  można określić wyrazy głównej przekątnej macierzy transponowanej  $A^T$  na podstawie wzoru:

$$a_{11} = - \sum_j a_{1j} \quad (8)$$

Wyrażenie (6) ma wówczas postać:

$$\begin{bmatrix}
 -(\lambda_A + \lambda_B) & \lambda_B & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \beta_B & -\beta_B & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -(\lambda_A + \lambda_B) & \lambda_B & 1 & \lambda_A & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \beta_B & -\beta_B & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \beta_A & 0 & 1 & 0 & \lambda_B & \lambda_A & 0 \\
 \beta_A & 0 & 0 & 0 & 1 & -(\lambda_A + \lambda_B + \beta_A) & 0 & \lambda_A & \lambda_B \\
 0 & 0 & 0 & \beta_A & 1 & 0 & -(\beta_A + \beta_B) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \beta_A & 0 & -2\beta_A & 0 \\
 0 & \beta_A & 0 & 0 & 1 & \beta_B & 0 & 0 & -(\beta_A + \beta_B)
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 P_1 \\
 P_2 \\
 P_3 \\
 P_4 \\
 P_5 \\
 P_6 \\
 P_7 \\
 P_8 \\
 P_9
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

Stąd oznaczony układ 9 równań z niewiadomymi  $P_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 9$  - granicznymi prawdopodobieństwami wystąpienie technicznie możliwych stanów eksploatacyjnych:

$$-(\lambda_A + \lambda_B)P_1 + \beta_B P_2 + \beta_A P_6 = 0$$

$$\lambda_B P_1 - \beta_B P_2 + \beta_A P_9 = 0$$

$$-(\lambda_A + \lambda_B)P_3 + \beta_B P_4 + \beta_A P_5 = 0$$

$$\lambda_B P_3 - \beta_B P_4 + \beta_A P_7 = 0$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 = 1 \quad (10)$$

$$\lambda_A P_3 - (\lambda_A + \lambda_B + \beta_A)P_6 + \beta_A P_8 + \beta_B P_9 = 0$$

$$\lambda_B P_5 - (\beta_A + \beta_B)P_7 = 0$$

$$\lambda_A P_5 + \lambda_A P_6 - 2\beta_A P_8 = 0$$

$$\lambda_B P_6 - (\beta_A + \beta_B)P_9 = 0$$

W wyniku rozwiązanie powyższego układu równań z zastosowaniem ETO otrzymano:

$$P_1 = 0,499208385 \quad P_2 = 5,4813 \times 10^{-4} \quad P_5 = 2,43310 \times 10^{-4}$$

$$P_3 = 0,499208385 \quad P_4 = 5,4813 \times 10^{-4} \quad P_6 = 2,43310 \times 10^{-4}$$

$$P_7 = 1,17 \times 10^{-7} \quad P_8 = 1,19 \times 10^{-7}$$

$$P_9 = 1,17 \times 10^{-7}$$

## 3. WYZNACZENIE WSKAŹNIKÓW I CHARAKTERYSTYK NIEZAWODNOŚCI

Dla określenia niezawodności hamulca tarczowego jako systemu trójelementowego posłużono się wskaźnikami: gotowości i oczekiwanego czasu pracy oraz funkcją niezawodności.

Jako wskaźnik gotowości  $K_g$  przyjęto asymptotyczny współczynnik gotowości, którego wartość stacjonarna określona jest wzorem:

$$K_g = \lim_{t \rightarrow \infty} K_g(t) \quad (11)$$

Jego interpretacją jest prawdopodobieństwo zdarzenia, że w dowolnej chwili  $t$  obiekt (hamulec) będzie w stanie zdatności (pracy). Przyjmując za zbiór stanów zdatności stany  $E_1, E_3, E_5, E_6$ , wskaźnik gotowości systemu trójelementowego hamulca wynosi:

$$K_{gH} = P_1 + P_3 + P_5 + P_6, \quad (12)$$

stąd:

$$K_{gH} = 0,998903$$

Funkcję niezawodności  $R(t)$  przyjęto jako charakterystykę niezawodności trójelementowego systemu hamulca. Oznacza ona prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, że czas przebywania obiektu (hamulca) w stanie zdatności (pracy) będzie większy niż ustalony czas  $t$ .

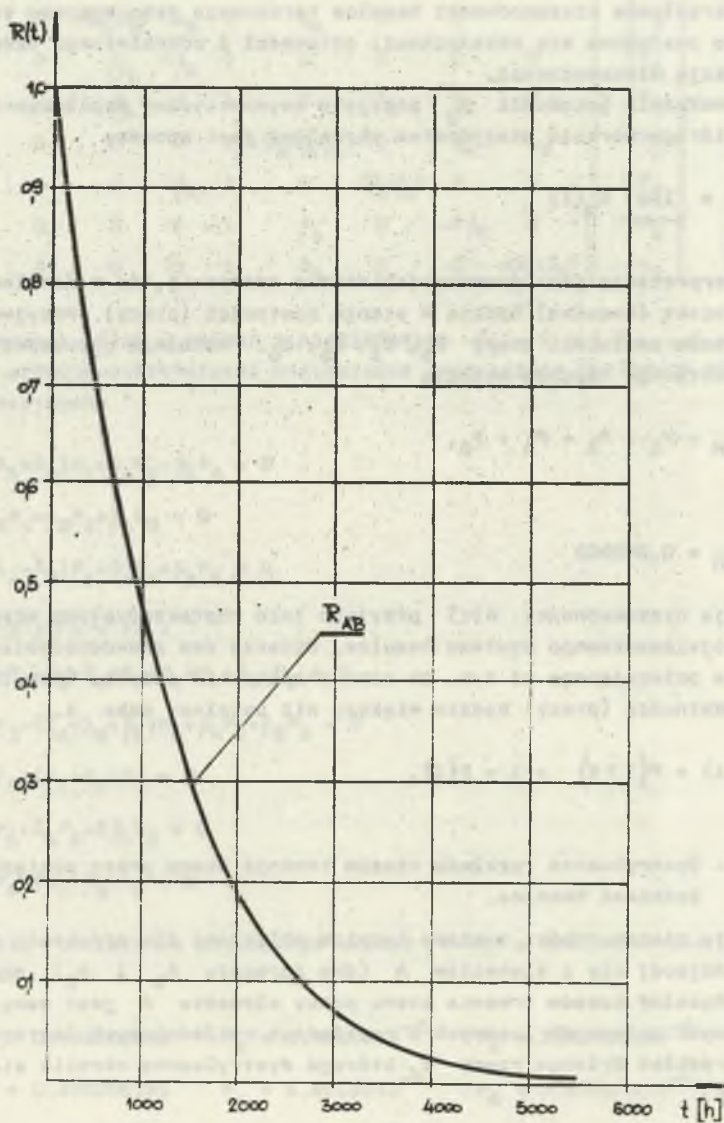
$$R(t) = P\{T > t\} = 1 - F(t), \quad (13)$$

gdzie:

$F(t)$  - dystrybuanta rozkładu czasów trwania stanu pracy pomiędzy uszkodzeniami hamulca.

Funkcję niezawodności systemu hamulca obliczono dla struktury szeregowej składającej się z elementów A (dwa agregaty  $A_1$  i  $A_2$ ) oraz B, rys. 1. Rozkład czasów trwania stanu pracy elementu A jest sumą  $k = 2$  niezależnych zmiennych losowych o rozkładach wykładniczych (agregaty). Jest to rozkład Erlanga rzędu  $k$ , którego dystrybuantę określa się ze wzoru [2]:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - \left[ 1 + \frac{\lambda t}{1!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} \right] e^{-\lambda t}, & t > 0, \lambda > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$



Rys. 3. Funkcje niezawodności trójelementowego systemu hamulca tarczowego



Dla przypadku elementu A wzór (14) przybiera postać:

$$F_A(t) = 1 - (1 + \lambda_{A_{1,2}} t) e^{-\lambda_{A_{1,2}} \cdot t} \quad (15)$$

Niezawodność systemu szeregowego złożonego z elementów A i B:

$$R_{AB}(t) = R_A(t) R_B(t). \quad (16)$$

gdzie:

$$R_A(t) = 1 - F_A(t) = (1 + \lambda_{A_{1,2}} t) e^{-\lambda_{A_{1,2}} \cdot t} \quad (17)$$

$$R_B(t) = 1 - F_B(t) = e^{-\lambda_B t} \quad (18)$$

Stąd:

$$R_{AB}(t) = (1 + \lambda_{A_{1,2}} t) e^{-(\lambda_{A_{1,2}} + \lambda_B)t} \quad (19)$$

Wzór (19) posłużył do sporządzenia wykresu funkcji niezawodności trójelementowego systemu hamulca tarczowego przedstawionej na rys. 3.

Znajomość postaci funkcji niezawodności (19) pozwala obliczyć oczekiwany czas pracy systemu:

$$E[T_{ps}] = \int_0^{\infty} R_{AB}(t) dt \quad (20)$$

$$E[T_{ps}] = \int_0^{\infty} (1 + \lambda_{A_{1,2}} t) e^{-(\lambda_{A_{1,2}} + \lambda_B)t} dt \quad (21)$$

Po dokonaniu całkowania wyrażenia (21) otrzymuje się:

$$E[T_{ps}] = \frac{2\lambda_{A_{1,2}} + \lambda_B}{(\lambda_{A_{1,2}} + \lambda_B)^2} \quad (22)$$

Dla danych wartości  $\lambda_{A_{1,2}}$  oraz  $\lambda_B$  (tablica 2) mamy:

$$E[T_{ps}] = 1375,4 \text{ godz.}$$

Hamulec maszyny wyciągowej należy do obiektów naprawialnych, które zbudowane są z elementów nienaprawialnych i naprawialnych. Wskaźnik gotowości służy do scharakteryzowania niezawodności obiektów naprawialnych opisanych modelem procesu odnowy o skończonym czasie odnowy. Funkcje niezawodności oraz oczekiwany czas pracy do wystąpienia uszkodzenia stosowane są przede wszystkim w odniesieniu do obiektów nienaprawialnych, natomiast w przypadku obiektów naprawialnych (jak hamulec) opisują jego niezawodność do wystąpienia 1 uszkodzenia.

#### 4. WNIOSKI

Proces eksploatacji hamulca tarczowego rozpatrywanego jako system trójelementowy jest dziewięciostanowym procesem Markowa. Graniczne prawdopodobieństwa wystąpienia stanów eksploatacyjnych, w których zdatny hamulec posiada jeden z agregatów w rezerwie ( $E_1, E_3$ ) są sobie równe, przyjmując wartość  $P_1 = P_3 = 0,499208$ . Łączne prawdopodobieństwo charakteryzujące przebywanie hamulca w obu tych stanach jest bliskie jedności, co uzasadnione jest tym, iż omawiane stany odpowiadają najczęściej występującej sytuacji eksploatacyjnej. Najwyższe graniczne prawdopodobieństwa przebywania hamulca w stanie niezdatności  $E_2 = E_4 = 0,000548$  dotyczą stanów, w których naprawie podlega część wspólna hamulca.

Wskaźnik gotowości hamulca tarczowego obliczony jako suma granicznych prawdopodobieństw wystąpienia stanów zdatności wynosi:  $K_{GH} = 0,998903$ . Wyznaczoną wartość wskaźnika gotowości należy uznać za wysoką oraz odpowiadającą wymaganiom [3] stawianym obiektom technicznym o podwyższonej niezawodności.

Funkcja niezawodności hamulca ma przebieg szybko malejący w czasie. Przyczyn tego należy upatrywać w znacznej intensywności występowania uszkodzeń agregatów oraz części wspólnej hamulca wyrażonej wskaźnikiem (parametrem)  $\lambda$ .

Oczekiwany czas pracy do wystąpienia uszkodzenia hamulca wynosi:  $E[T_{ps}] = 1375,4$  godz. Wartość omawianego wskaźnika nie jest wysoka, co wynika z podobnych względów, jak w odniesieniu do funkcji niezawodności. Należy nadmienić, że przyjęty w opracowaniu jako zmienna niezależna efektywny czas pracy jest średnio 2,26 raza krótszy od czasu kalendarzowego dla badanej populacji hamulców tarczowych.

## LITERATURA

- [1] Brodziński S.: Ocena niezawodności hamulców tarczowych górniczych maszyn wyciągowych z kołem pędnym. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1984.
- [2] Kopociński B.: Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa 1973.
- [3] Poradnik niezawodności. WEMA, Warszawa 1982.
- [4] Sajkiewicz J.: Zarys teorii eksploatacji systemów maszynowych. Wrocław 1979.

Recenzent: Doc. dr inż. Tadeusz ZMYŚLÓWSKI

Wpłynęło do Redakcji we wrześniu 1984 r.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ

## Р е з ю м е

В работе дано описание надёжности системы тарелочного тормоза АСЭА подъёмной машины на основании трёхэлементной последовательно-параллельной структуры. Для принятой структуры проведена идентификация процесса эксплуатации тормоза и определена предельная вероятность состояний. Надёжность тормоза охарактеризована при помощи коэффициента готовности, ожидаемого времени исправной работы системы а также функции надёжности. Оговорены полученные результаты.

## INDICATING A RELIABILITY OF A DISC BRAKE SYSTEM IN A WINDER

## S u m m a r y

A description of ASEA disc brake system reliability in a winder has been worked out on a base of a direct-alternate three-element structure. For a given structure an identification of the brake working process has been carried out indicating the limits of probability of different states occurrence. The brake reliability has been characterized by means of readiness indicator, expected work time of the system and reliability function. In the conclusions the received results have been commented on.