ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1988

Seria: GÓRNICTWO z. 148 Nr kol. 899

Jacek M. CZAPLICKI

ANALIZA PEWNEGO PROBLEMU NIEZAWODNOŚCI HAMULCÓW MASZYN WYCIĄGOWYCH

Streszczenie. Maszyna wyciągowa jest obiektem spełniającym niezwykle odpowiedzialne zadanie. Wynikają z nich wymogi odnoszone do funkcjonowania obiektu. Funkcjonowanie natomiast warunkowane jest poprawnie działającym systemem zabezpieczeń. W pracy dokonano analizy niezawodności zabezpieczeń określonego typu - tzw. zabezpieczeń kaskadowych. Stosowane są one w hamulcach maszyn wyciągowych, a użytkowane przy hamowaniu bezpieczeństwa. Przeprowadzona analiza empiryczno-teoretyczna miała na celu określenie liczby stosowanych kaskad w systemie zabezpieczeń. Na podstawie analizy wykazano, że stosowanie tego typu zabezpieczeń, gdy liczba kaskad jest większa lub równa trzy, jest niecelowe. Stwierdzenie to wynika z faktu, że przyrost wartości oczekiwanej liczby zadziałań systemu zabezpieczeń do uszkodzenia $E_i(N)$ jest bowiem nieznaczny, a prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu zabezpieczeń $P_u(S_i)$ maleje nieistotnie.

1. Wstęp

Górnicza maszyna wyciągowa należy do obiektów technicznych o stosunkowo wysokiej niezawodności. Biorąc pod uwagę, że składa się ona z kilku tysięcy części, a stan jej naprawy powodujący wstrzymanie realizacji zadania wydobywczego pojawia się przeciętnie kilka razy na rok, można stwierdzić, że niezawodność operacyjna jest zadowalająca. Nie zmienia to jednakże faktu, iż w każdym systemie o dużym stopniu złożoności (a maszyna wyciągowa do takich systemów niewątpliwie należy) istnieją tzw. "słabe ogniwa" i działania zmierzające do poprawy charakterystyk niezawodnościowych takich ogniw ma swój sens.

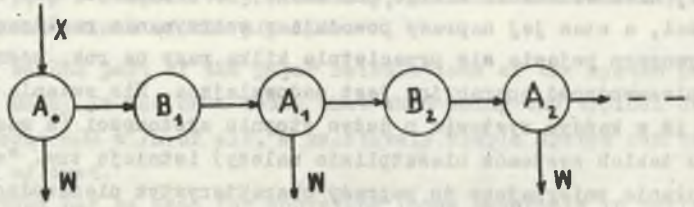
Górnicza maszyna wyciągowa należy także do takiej klasy obiektów, dla której rozważania niezawodności bezpieczeństwa mają swoją ważkość. Mówi się [2, 4], że jeżeli mają sens dla jakiegoś obiektu technicznego rozważania dotyczące podatności na takie błędy jego działania, skutkami których jest zagrożenie tego obiektu, systemów z nim współpracujących, środowiska oraz zdrowia i życia ludzkiego, to niezawodność takiego obiektu składa się z zagadnień niezawodności sprawności (operacyjnej) i niezawodności bezpieczeństwa (lub krócej, bezpieczeństwa). Jak ważne są to problemy i jak skomplikowaną mają swą naturę w odniesieniu do górniczych urządzeń wyciągowych, można przekonać się studiując chociażby referaty [2, 3]. Wiele zagadnień jest nadal nierozwiązanych i to zarówno od strony teoretycznej, jak i empirycznej. Niniejsza praca stanowi próbę wypełnienia, w skromnym wymiarze,

istniejącej luki - braku opracowań podstaw teoretycznych dla stosowanych w praktyce rozwiązań inżynierskich.

2. Zabezpieczenia kaskadowe

W hamulcach maszyn wyciągowych, w przypadku hamowania bezpieczeństwa, niezmiernie ważnym problemem jest, by sygnał podawany z jednych jednostek został przekazany do jednostek wykonawczych, w efekcie czego mają się pojawić dwa sygnały wejściowe na zespół nośnika lin. Z jednej strony moment napędowy, podawany przez napęd poprzez zespół pośredniczący, musi być równy zero. Z drugiej strony podsystem hamulcowy ma zadziałać tak, by jego zespół wykonawczy zadziałał na bieżnię hamulcową, w wyniku czego ma nastąpić zahamowanie nośnika lin.

Jednym ze sposobów zapewnienia odpowiednio wysokiego poziomu niezawodności działania jednostek przekazujących sygnały, przy hamowaniu bezpieczeństwa, jest ich rezerwowanie. Z uwagi na bardzo krótki wymagany czas działania stosowane rezerwy są "gorące". Stosuje się także nadmiary funkcjonalne. Jednym ze stosowanych jest nadmiar tworzący - w języku inżynierskim - tzw. zabezpieczenia kaskadowe. Abstrahując od szczegółów technicznych, omawiane zebezpieczenie, z punktu widzenia niezawodności, opisać można następująco.



Rys. 1. Struktura niezawodności systemu
Fig. 1. The structure of the system reliability

Dany jest system (rys. 1) skonstruowany z pewnej liczby elementów, które są obsługiwane, a w przypadku uszkodzenia naprawiane bądź wymieniane na nowe. Z uwagi na bardzo krótki czas działania można przyjąć, że działają dyskretnie. Proces eksploatacji systemu jest następujący. System znajduje się w stanie postoju. W pewnej chwili t pojawia się sygnał X do jednostki podstawowej A_0. Jeżeli jednostka jest sprawna w tym momencie, to zadziała poprawnie i wyśle sygnał W. Jeżeli nie zadziała, to sygnał przechodzi do jednostki B_1, która prześle (jest sprawna) bądź nie prześle dalej sygnału (uszkodzenie). W przypadku przesłania dalej sygnał trafia

do jednostki A_1, która - gdy jest sprawna - wyśle pożądany sygnał W. Ogólnie, system może się składać z:

- tylko jednostki podstawowej A_0; oznaczmy ten system przez S_0,
- jednostki podstawowej A_0 i jednej tzw. "kaskady" zabezpieczającej: B_1-A_1; system S_1,
- jednostki podstawowej A_0 i "kaskad": B_1-A_1-B_2-A_2-...-B_k-A_k; k = 1,2...; system S_k.

Uszkodzeniem systemu jest taki jego stan, że w momencie podania do niego sygnału wejściowego X, sygnał W nie pojawi się na jego wyjściu.

Interesującym zagadnieniem jest znalezienie podstawowych wskaźników niezawodności opisanego systemu, a także próba odpowiedzi na pytanie, jak zmienia się niezawodność wraz ze wzrostem zastosowanych kaskad.

3. Analiza niezawodności

Dla przeprowadzenia analizy niezawodności systemu niezbędna jest znajomość natury stochastycznej pojawiających się w nim zdarzeń w procesie jego eksploatacji.

W tym celu dokonano analizy empirycznej [1], która wykazała, że:

- prawdopodobieństwo uszkodzenia dwu lub więcej jednostek systemu w tym samym momencie jest pomijalnie małe,
- proces uszkodzeń można przyjąć za stacjonarny,
- nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy głoszącej, iż intensywność uszkodzeń jest stała w czasie[1)].

A zatem można przyjąć, że proces uszkodzeń jednostek systemu jest procesem stochastycznym pojedynczym, stacjonarnym i bez pamięci.

Oznaczmy przez γ_{Ai}, $\gamma_{B(i+1)}$; i=0,1,2,... prawdopodobieństwo uszkodzenia jednostki A_i, $B_{(i+1)}$ w momencie przyjścia sygnału X.

---

1) Z przeprowadzonej wstępnie analizy teoretycznej wynikało, że intensywność uszkodzeń może być postaci:

$$\lambda(t) = \mu_0 + \chi(1 - e^{-\mu t}),$$

gdzie: μ_0, χ, μ - stałe,

tzn., że uszkodzenia będą typu relaksacyjnego. Badania empiryczne nie potwierdziły tej hipotezy, a intensywność uszkodzeń można przyjąć za stałą w czasie. Otrzymany wynik można uzasadnić tym, iż dokonywane obsługi (konserwacje, naprawy, wymiany) i dyskretny czas działania systemu przy istniejących przerwach pomiędzy tymi zadziałaniami powodują, że nie obserwuje się składowej zmiennej intensywności uszkodzeń.

1. Jeżeli system jest typu S_o, tzn. składa się tylko z jednostki podstawowej A_o, to:

- prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu

$$P_u(S_o) = \gamma_{Ao}, \tag{1}$$

- wartość oczekiwana liczby zadziałań systemu do uszkodzenia

$$E_o(N) = \frac{1 - \gamma_{Ao}}{\gamma_{Ao}}, \tag{2}$$

(zwykle γ_{Ao} jest bardzo małe i wówczas $E_o(N) = (\gamma_{Ao})^{-1}$),

- rozkład liczby zadziałań systemu jest rozkładem geometrycznym

$$P_N^{(o)} = (1 - \gamma_{Ao})^{N-1}\gamma_{Ao}. \tag{3}$$

2. Jeżeli system jest typu S_1, tzn. składa się z trzech jednostek: A_o-B_1-A_1, to:

- prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu

$$P_u(S_1) = \gamma_{Ao}\gamma_{B1} + \gamma_{Ao}(1 - \gamma_{B1})\gamma_{A1}, \tag{4}$$

- wartość oczekiwana liczby zadziałań

$$E_1(N) \cong \frac{1 - P_u(S_1)}{P_u(S_1)}. \tag{5}$$

Ogólnie, wartość oczekiwana liczby zadziałań systemu S_i, $i = 0,1,2,\ldots$

$$E_i(N) \cong \frac{1 - P_u(S_i)}{P_u(S_i)}. \tag{6}$$

Wzór ogólny na prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu S_i jest dość złożony i nie ma sensu go tu przytaczać. O wiele prościej można skonstruować wzór ten na zasadzie logicznej. I tak, dla S_i, $i = 2,3$ wzory są następujące:

$$P_u(S_2) = \gamma_{Ao}\gamma_{B1} + \gamma_{Ao}(1 - \gamma_{B1})\gamma_{A1}\gamma_{B2} + \gamma_{Ao}(1 - \gamma_{B1})\gamma_{A1}(1 - \gamma_{B2})\gamma_{A2} \tag{7}$$

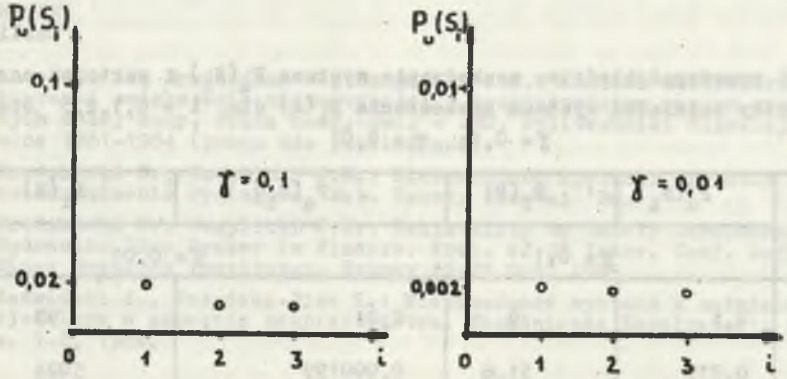
$$P_u(S_3) = \gamma_{Ao}\gamma_{B1} + \gamma_{Ao}(1 - \gamma_{B1})\gamma_{A1}\gamma_{B2} + \gamma_{Ao}(1 - \gamma_{B1})$$

$$\gamma_{A1}(1 - \gamma_{B2})\gamma_{A2}\gamma_{B3} + \gamma_{Ao}(1 - \gamma_{B1})\gamma_{A1}(1 - \gamma_{B2})$$

$$\gamma_{A2}(1 - \gamma_{B3})\gamma_{A3} \cdot \tag{8}$$

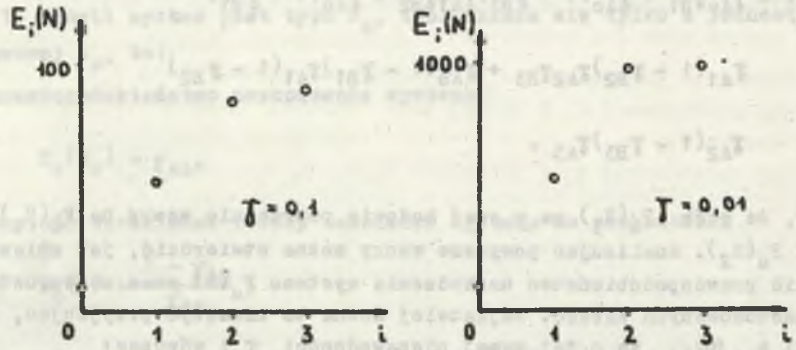
Zauważmy, że wzór $P_u(S_3)$ ma w swej budowie poprzednie wzory na $P_u(S_o)$, $P_u(S_1)$ i $P_u(S_2)$. Analizując powyższe wzory można stwierdzić, jak zmieniać się będzie prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu $P_u(S)$ wraz ze wzrostem liczby zastosowanych kaskad. Najłatwiej można to zauważyć przyjmując, że jednostki A_i, B_{i+1} są o tej samej niezawodności γ i wówczas:

$$\begin{aligned} P_u(S_o) &= \gamma, \\ P_u(S_1) &= \gamma^2[1+(1-\gamma)], \\ P_u(S_2) &= \gamma^2[1+\gamma(1-\gamma)+\gamma(1-\gamma)^2], \\ P_u(S_3) &= \gamma^2[1+\gamma(1-\gamma)+\gamma^2(1-\gamma^2)+\gamma^2(1-\gamma)^3]. \end{aligned} \tag{9}$$



Rys. 2. Wykresy prawdopodobieństwa uszkodzenia systemu $P_u(S_i)$ dla dla $i = 0,1,2,3$ oraz $\gamma = 0,1$ i $\gamma = 0,01$

Fig. 2. Diagrams of the probability of failure of the system $P_u(S_i)$ for $i = 0,1,2,3$ and $\gamma = 0,1$ and $\gamma = 0,01$



Rys. 3. Wykresy wartości oczekiwanych liczby zadziałań systemu $E_i(N)$ do uszkodzenia dla $i = 0,1,2,3$ oraz $\gamma = 0,1$, $\gamma = 0,01$

Fig. 3. Diagram of the expected values of operations of the system $E_i(N)$ to the damage for $i = 0,1,2,3$ and $\gamma = 0,1$, $\gamma = 0,01$

Wykres $P_u(S_i)$; $i = 0,1,2,3$ dla $\gamma = 0,1$ oraz $\gamma = 0,01$ obrazuje rys. 2[1].

Na rys. 3 przedstawiono zależność wartości oczekiwanej liczby zadziałań do uszkodzenia $E_i(N)$ dla tych samych i oraz γ. Wartości liczbowe $P_u(S_i)$, $E_i(N)$ dla $i = 0,1,2,3$; oraz $\gamma = 0,1$; $\gamma = 0,01$ są przedstawione w tablicy 1.

Tablica 1

Wartości prawdopodobieństwa uszkodzenia systemu $P_u(S_i)$ i wartości oczekiwane liczby zadziałań systemu uszkodzenia $E_i(N)$ dla $i = 0,1,2,3$ oraz $\gamma = 0,1$; $\gamma = 0,01$

i	$P_u(S_i)$	$E_i(N)$	$P_u(S_i)$	$E_i(N)$
	$\gamma = 0,1$		$\gamma = 0,01$	
0	0,1	9	0,01	99
1	0,019	51,6	0,000199	5024
2	0,0117	84,5	0,0001019	9812
3	0,01105	89,5	0,0001010095	9899

[1] W praktyce $\gamma \approx 0,01$.

4. Podsumowanie i wnioski

1. W pracy dokonano analizy niezawodności działania pewnego typu zabezpieczeń stosowanych w hamulcach maszyn wyciągowych górniczych urządzeń wyciągowych. Jak łatwo zauważyć z rys. 2, a jeszcze bardziej przekonujący jest rys. 3 i dane w tablicy 1, korzyść ze stosowania kaskad jest istotna i największa przy liczbie kaskad równej 1 i 2. Dla liczby kaskad większej lub równej 3 wzrost wartości oczekiwanej liczby zadziałań systemu do uszkodzenia staje się mały, a prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu nieznacznie maleje. Wszystko to pozwala stwierdzić, że niecelowe jest stosowanie większej liczby kaskad.

2. Można także zauważyć, iż istotny wzrost niezawodności systemu można uzyskać poprzez wzrost niezawodności elementów strukturalnych systemu. I tak, np. dla $\gamma = 0,1$ przyrost wartości oczekiwanej liczby zadziałań do uszkodzenia jest prawie sześciokrotny przy zastosowaniu jednej kaskady. Dla $\gamma = 0,01$ przyrost ten wynosi około 51 razy (a zatem o niecały rząd wielkości).

3. W przypadku zastosowania dwu kaskad i niemożliwości poprawienia niezawodności elementów strukturalnych systemu istnieje możliwość podniesienia niezawodności zabezpieczenia jedynie poprzez zmianę struktury niezawodnościowej, np. poprzez zastosowanie nadmiaru - rezerwy gorącej.

LITERATURA

[1] Antoniak J., Brodziński S., Czaplicki J.M.: Analiza możliwości oraz kierunki zwiększenia niezawodności i bezpieczeństwa maszyn wyciągowych dużej mocy. Praca nauk.-bad. - IMG, Politechniki Śląskiej, Gliwice 1981-1984 (praca nie publikowana).

[2] Brodziński S., Czaplicki J.M.: Niezawodność systemu: operator - górnicze urządzenie wyciągowe. Mat. Szkoły Zimowej '86.

[3] Brodziński S., Czaplicki J.M.: Reliability to Safety Assessment of Hydraulic Disc Brakes in Winders. Proc. of 21 Inter. Conf. Safety in Mines Research Institutes. Sydney 21-25 Oct. 1985.

[4] Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K.: Niezawodność systemu z nadmiarem funkcjonalnym w aspekcie bezpieczeństwa. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 1-2, 1984.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Józef Hansel

Wpłynęło do Redakcji w maju 1985 r.

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМ НАДЁЖНОСТИ ТОРМОЗОВ ПОДЬЁМНОЙ МАШИНЫ

Р е з ю м е

Подъёмная машина является очень устройством, выполняющим важное задание. Вытекают из этого соответствующие требования по функционированию устройства.

Само-же функционирование обусловлено безотказным действием системы предохранений.

В работе проведён анализ надёжности предохранений определённого типа, т.н. каскадных предохранений. Они примеияются в тормозах подъёмных машин. Проведён экспериментально-теоретический анализ для определения числа применяемых каскадов в предохранительной системе. Показано, что применение этого типа предохранений, когда число каскадов больше или равно трём, нецелесообразно. Вытекает это из факта, что прирост величины ожидаемого числа срабатываний системы предохранений к отказу $E_i(N)$ незначителен, а вероятность отказа системы предохранений $Pa(S_i)$ иесущественно уиеньшается.

AN ANALYSIS OF A CERTAIN PROBLEM OF RELIABILITY OF SINDING MACHINE BRAKES

S u m m a r y

A winding machine is an object of extremely responsible assignment. The result of this are high requirements as to the performane of the object. This, in turn, is conditioned by a suitably operating safety system. An analysis of the reliability of a definite type of safety devices, the so-called "cascade safety devices", has been made in the paper. These are used in the brakes of hoisting machines and applied in safety braking. The empirical-theoretical analysis made aimed at the determination of the number of the cascades in the safety system used. On the basis of this analysis it has been shown that the use of the safety devices of this type when the number of cascades is equal to three or greater is inexpedient. The statement arises from the fact that the increment of the value of the expected number of operations of the system safe-guarding against failure $E_i(N)$ is negligible and the probability of damaging the safety system $P_u(S_i)$ decreases insignificantly.