

LECH DWILIŃSKI
INSTYTUT BUDOWNICTWA,
MECHANIZACJI I ELEKTRYFIKACJI
ROLNICTWA
WARSZAWA

O NIEZAWODNOŚCI MASZYN I URZĄDZEŃ MECHANICZNYCH

Przeprowadzono analizę specyfiki budowy, funkcjonowania i eksploatacji maszyn i urządzeń mechanicznych ze względu na opis i ocenę ich niezawodności. Omówiono zagadnienia związane z opisem niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych oraz podano przykłady takiego opisu dla wybranych klas obiektów i przyjętych założeń. Opisy ogólne zilustrowane są przykładami dotyczącymi opisu i oceny niezawodności konkretnych rodzajów maszyn.

1 Wprowadzenie

Coraz częściej występuje potrzeba dokonywania oceny niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych. Opracowywane są metody badań niezawodności pojazdów mechanicznych i maszyn w warunkach ich eksploatacji. Metody te i ocena niezawodności bazują zazwyczaj na klasycznym opisie niezawodności, wypracowanym na gruncie elektroniki. Opis taki dokonywany jest przy wielu założeniach, słusznych dla elementów i urządzeń elektronicznych. Założenia te mogą budzić pewne wątpliwości przy stosowaniu ich w odniesieniu do maszyn i urządzeń mechanicznych. Specyfika budowy, funkcjonowania i eksploatacji maszyn nakazywałaby przyjmowanie przy opisie ich niezawodności innych założeń niż dla urządzeń elektronicznych. Prowadzi to jednak do zmian w postaciach modeli matematycznych opisujących niezawodność obiektów, same opisy zaś następczą szereg trudności formalnych. Zagadnienia te będą pokrótce rozpatrzone poniżej.

2. Specyfika funkcjonowania, budowy i eksploatacji, a niezawodność maszyn i urządzeń mechanicznych

Podstawą opisu niezawodności obiektów nieodnawialnych jest zmienna losowa τ , która charakteryzuje czas pozostawania obiektu w stanie zdatności. O τ zakłada się, że jest to zmienna losowa ciągła o wartościach z przedziału $/0, +\infty /$ [4,5]. Inaczej mówiąc rozpatruje się prawdopodobieństwo tego, że obiekt, który rozpoczął pracę w chwili $t_0=0$, nie ulegnie uszkodzeniu przed upływem chwili t :

$$R /t/ = P \{ \tau > t \} . \quad (1)$$

Maszyny i urządzenia mechaniczne na ogół nie są użytkowane w sposób ciągły. Okresy użytkowania przedzielane są przerwami wynikającymi z rozmaitych przyczyn. Powstaje zagadnienie interpretacji czasu, który opisuje zmienna losowa τ . Podczas badań niezawodności za czas pozostawania maszyny w stanie zdatności na ogół przyjmowany jest czas użytkowania jej zgodnie z przeznaczeniem. Jeżeli ujęcie takie przyjmujemy również dla potrzeb opisu niezawodności, to stwierdzimy, że czas pozostawania maszyny w stanie zdatności będzie zmienną losową dla ustalonego z góry /np. normatywnie/ okresu eksploatacji maszyny. Wartości przybierane przez tę zmienną losową będą zależały nie tylko od niezawodności maszyny, ale również od organizacji jej eksploatacji, a także, dla niektórych maszyn i urządzeń mechanicznych, od losowych zmian warunków otoczenia. Inaczej mówiąc opis niezawodności według (1) jest opisem za pomocą prawdopodobieństwa warunkowego przybrania przez zmienną losową τ wartości większych od t , pod warunkiem, że w rozpatrywanym okresie czasu takie wartości t występują. Tego rodzaju opis, uwzględniający również prawdopodobieństwa przybrania danych wartości t przez zmienną losową opisującą łączny czas użytkowania maszyny zgodnie z przeznaczeniem, np. w okresie roku, jest bardzo przydatny przy ocenie możliwości wykonania przez maszynę stawianych jej zadań.

Podczas opisu niezawodności obiektu składającego się z wielu elementów, tzn. systemu, milcząco zakłada się, że elementy obiektu pracują przez cały czas pracy tego systemu. Przy takim założeniu otrzymujemy prosty opis niezawodności systemu w zależności od niezawodności jego elementów składowych i struktury tego systemu. Np. dla szeregowej struktury systemu składającego się z n elementów, otrzymujemy:

$$R /t/ = R_1 /t/ \cdot R_2 /t/ \dots \cdot R_n /t/ . \quad (2)$$

Specyfika budowy i funkcjonowania maszyn i urządzeń mechanicznych sprawia, że na ogół nie wszystkie elementy pracują przez cały czas pracy maszyny. W przypadku maszyn wieloczynnościowych w wykonywaniu poszczegół-

nych czynności uczestniczyć mogą inne zestawy elementów. W rezultacie struktura maszyny, ze względu na jej niezawodność, może nie być stała w czasie, przy czym w ogólności może zmieniać się zarówno postać struktury jak i rodzaje oraz liczby elementów uczestniczących w funkcjonowaniu maszyny. Sytuacja ta następcza istotne trudności w opisie i ocenie niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych, traktowanych jako systemy oraz w ocenie niezawodności elementów takich systemów. Przy ocenie niezawodności elementów /np. zespołów/ maszyn i urządzeń, można przyjmować podobną umowę, jak czyni się dla całych maszyn, tzn. uważać za czas zdatności czas pracy elementu w maszynie. Występują wówczas jednak trudności w ocenie wpływu niezawodności elementu na niezawodność całej maszyny. W pierwszym przybliżeniu, dla potrzeb inżynierskich, można wpływy te ocenić wykorzystując związki pomiędzy oczekiwanym czasem pracy i liczbą uszkodzeń całej maszyny a oczekiwanymi czasami pracy i liczbami uszkodzeń jej zespołów. Postępowanie takie daje dość dobre wyniki, gdy postać struktury maszyny nie zmienia się w czasie, tzn. struktura maszyny traktowanej jako system pozostaje np. strukturą szeregową, a zmieniają się tylko liczby i rodzaje elementów uczestniczących w funkcjonowaniu maszyny.

Maszyny i urządzenia mechaniczne są obiektami, których eksploatacja składa się z następujących po sobie okresów użytkowania i obsługiwanego [7,8]. Podczas użytkowania, maszyna pozostaje w stanie zdatności. Trudności interpretacyjne występują przy rozpatrywaniu czasu obsługiwanego z punktu widzenia niezawodności maszyny. Czas ogólnie rozumianego obsługiwanego obejmuje bowiem czas przywracania maszynie stanu zdatności po uszkodzeniach /czyli tzw. odnawianie/, czas obsługi technicznych i technologicznych, przechowywania maszyny pomiędzy okresami jej użytkowania itp.

Przy dokonywaniu oceny niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych na ogół uwzględnia się tylko czas przywracania maszynie stanu zdatności po uszkodzeniach /czas odnawiania/. Pozostałych czasów obsługiwanego zazwyczaj nie uwzględnia się w rozważaniach związanych z niezawodnością maszyn. Wyjątek stanowią te obiekty techniczne uzbrojenia, dla których bada się stan zdatności w okresach przechowywania. Wynika to jednak stąd, że obiekty te na ogół nie są użytkowane, a żąda się wysokiej ich gotowości.

Opisy niezawodności odnawianych obiektów technicznych są wykonywane przy założeniu, że odnowa przywraca w pełni pierwotne właściwości rozpatrywanego obiektu. Założenie to na ogół nie pokrywa się z rzeczywistością dla maszyn i urządzeń mechanicznych, gdzie naprawa polega na wymianie lub regeneracji jednej lub kilku części, natomiast stan pozostałych części jest na ogół różny od ich stanu początkowego, tzn. takiego, w jakim były one w maszynie nowej. Adekwatny opis niezawodności odnawianych maszyn i urządzeń mechanicznych powinien zatem uwzględniać zmianę ich właściwości w miarę upływu czasu eksploatacji. Badania maszyn i urządzeń po naprawach głównych wykazują bowiem, że niezawodność ich jest niższa niż niezawodność maszyn nowych.

3. Próba klasyfikacji maszyn i urządzeń mechanicznych z uwagi na opis i ocenę ich niezawodności

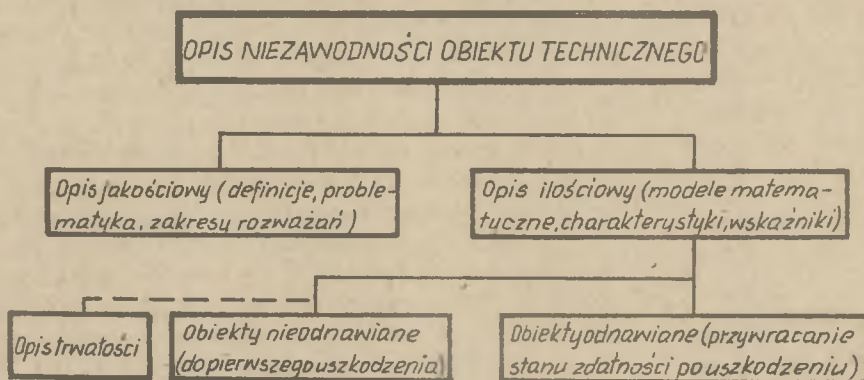
W zależności od przyjętych wstępnych ogólnych założeń, dotyczących przebiegu eksploatacji, budowy i funkcjonowania, można otrzymać rozmaite opisy niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych, poczynając od opisu właściwego dla obiektów prostych, pracujących do pierwszego uszkodzenia, a kończąc na złożonych obiektach odnawianych ze zmiennymi strukturami, przy uwzględnieniu zmian właściwości elementów tych obiektów. Adekwatność tych opisów uwarunkowana jest słusznością przyjętych założeń lub stopniem realizacji celu postępowania naukowo-badawczego, w którym opisy te są wykorzystywane.

W zależności od założeń mogą być brane pod uwagę np. takie opisy niezawodności, jak przedstawiono schematycznie na rys.1 w sposób ogólny oraz na rys. 2 i rys.3 - bardziej szczegółowo w odniesieniu, odpowiednio, do obiektów nieodnawianych i odnawianych.

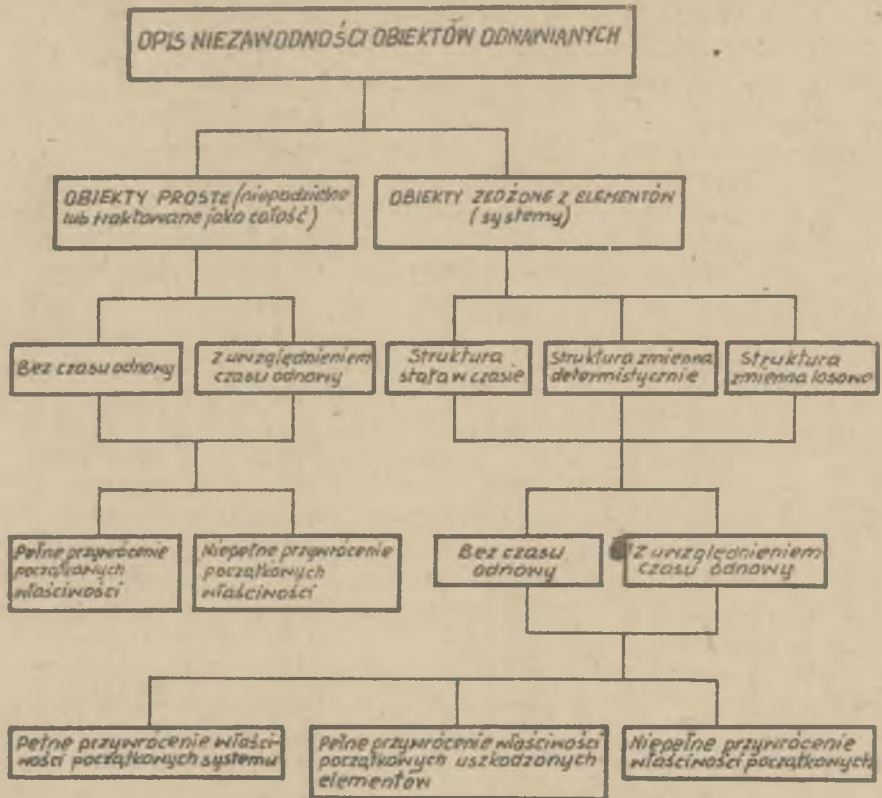
Za podstawę przytoczonego podziału przyjęto powszechnie stosowane w opisach niezawodności obiektów technicznych założenia dotyczące:

- sposobu traktowania obiektów /nieodnawiane lub odnawiane/,
 - budowy obiektów /proste lub złożone/,
 - sposobu funkcjonowania obiektu /stała lub zmienna struktura/.
- Podziały te nie uwzględniają natomiast specyfiki eksploatacji obiektów technicznych, gdzie można wyróżnić założenia dotyczące np.:
- przebiegu eksploatacji w czasie kalendarzowym,
 - współpracy obiektu z systemem eksploatacji,
 - rodzajów zadań stawianych obiektowi itp.

Ze względu na założenia dotyczące przebiegu eksploatacji, można wyróżnić:



Rys.1. Schemat podziału opisów niezawodności obiektów technicznych



Rys. 3. Schemat opisów niezawodności obiektów odnawianych.

- obiekty użytkowane w sposób ciągły,
- obiekty użytkowane w sposób przerywany ze zdeterminowaną długością przerw,
- obiekty użytkowane w sposób losowo przerywany.

Podobnie, ze względu na organizację współpracy w systemach eksploatacji, można wyróżnić np.:

- obiekty użytkowane samodzielnie /pojedynczo/,
- obiekty użytkowane w zestawie technologicznym,
- obiekty eksploatowane w systemie użytkowania i obsługiwanie.

Można wyróżnić ponadto obiekty jedno i wielozadaniowe. Z punktu widzenia opisu niezawodności interesujący jest fakt, że niezawodność obiektów wielozadaniowych może zależeć od rodzajów zadań, a także fakt, że obiekt niezdatny do realizacji pewnych rodzajów zadań może wykonywać inne zadania, a także, że podczas realizacji tych zadań mogą być naprawiane elementy, których uszkodzenia warunkowały stan niezdatności do wykonywania niektórych zadań.

4. Przykłady opisu niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych

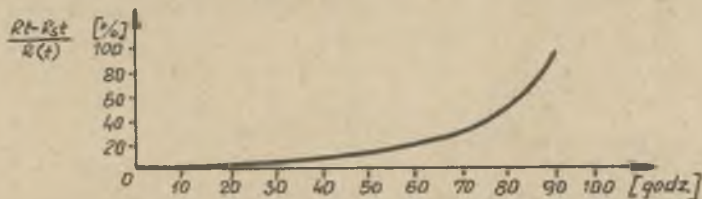
Maszyny i urządzenia mechaniczne na ogół nie mogą być użytkowane w całym zakresie warunków otoczenia i obrabianych materiałów, jaki może zaistnieć. Podczas projektowania zakłada się, w jakim zakresie warunków otoczenia i parametrów obrabianych materiałów maszyna może być użytkowana, tzn. określa się przeznaczenie tej maszyny.

Właściwości obrabianych materiałów oraz warunki otoczenia na ogół zmieniają się losowo. Zakres tych właściwości, warunkujący możliwość użytkowania maszyny zgodnie z przeznaczeniem, może zaistnieć przez przedział czasu o losowej długości. Jeżeli interesuje nas możliwość wykonania przez maszynę stawianych jej zadań, wymagających użytkowania maszyny przez czas t w ciągu pierwszego okresu czasu, np. roku, kwartału, miesiąca itp., to musimy rozpatrzyć prawdopodobieństwo tego, że przez czas t będą panowały warunki odpowiednie do użytkowania maszyny, a następnie prawdopodobieństwo tego, że maszyna ta nie ulegnie uszkodzeniu przez ten czas. Inaczej mówiąc, rozpatrujemy prawdopodobieństwo $R_g/t/$ koniunktacji dwóch zdarzeń losowych: zdarzenia A_t polegającego na tym, że w założonym okresie maszyna będzie mogła być użytkowana przez czas nie mniejszy od t oraz zdarzenia B_t polegającego na tym, że maszyna będzie pracować bez uszkodzeń przez przedział czasu: $\langle 0, t \rangle$:

$$R_g/t/ = P \{ A_t \cap B_t \} = P \{ A_t \} P \{ B_t | A_t \} = P \{ A_t \} R/t/, \quad (3)$$

gdzie $R/t/$ jest podane w (1).

W tym ujęciu niezawodność maszyny stanowi prawdopodobieństwo warunkowe tego, że w zadanym okresie maszyna będzie pracować bez uszkodzeń przez czas t , pod warunkiem, że w okresie tym będzie mogła być użytkowana przez taki czas. W celu zilustrowania wielkości różnic pomiędzy prawdopodobieństwem $R_g/t/$ oraz $R/t/$, na rys. 4 podany jest procentowy stosunek tych różnic dla kopaczki do ziemniaków [6] .



Rys.4. Udział różnic w ocenie niezawodności kopaczki bez i z uwzględnieniem prawdopodobieństwa wystąpienia odpowiednich warunków do użytkowania maszyny przez czas t w ciągu roku

Nie wszystkie elementy /np. zespoły konstrukcyjne/ pracują przez cały czas pracy maszyny. Przyjmijmy, że rozpatrywana maszyna jest obiektem

odnawianym o strukturze szeregowej, przy czym postać struktury nie ulega zmianie, zmieniają się natomiast liczby i rodzaje elementów uczestniczących w funkcjonowaniu tej maszyny. Rozpatrzmy wpływ niezawodności zespołów na niezawodność maszyny.

Pełen opis wpływu niezawodności zespołów na niezawodność maszyny byłby zadaniem złożonym. Z tego względu rozważania będą ograniczone do próby oceny wpływu zmian liczbowych charakterystyk niezawodności zespołów na liczbowe charakterystyki niezawodności całej maszyny. Dla średnich czasów zdatności można np. przeprowadzić następujące rozważania.

Podczas pracy maszyny przez czas t , jej zespoły pracują przez czasy t_i , $i = 1, 2, \dots, m$, przy czym m jest liczbą wyróżnianych zespołów maszyny. Oczekiwane czasy pracy zespołów można wyrazić przez czas pracy maszyny:

$$t_i = \alpha_i \cdot t, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad 0 < \alpha_i \leq 1$$

W czasie t powstało n uszkodzeń maszyny, tzn. średni czas pomiędzy uszkodzeniami maszyny wynosi:

$$T = \frac{t}{n}.$$

Zespoły maszyny w tym czasie ulegną n_i uszkodzeniom, przy czym:

$$\sum_{i=1}^m n_i = n.$$

Średnie czasy zdatności pomiędzy uszkodzeniami zespołów wyniosą:

$$T_i = \frac{t_i}{n_i} = \frac{\alpha_i \cdot t}{n_i}.$$

Związek między średnim czasem zdatności maszyny, a średnimi czasami zdatności zespołów wyrazi się następująco:

$$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{T_i}}.$$

Wartości α_i są wyznaczane za pomocą badań w warunkach eksploatacyjnych. Podobnie dla średniego czasu odnowy, otrzymamy:

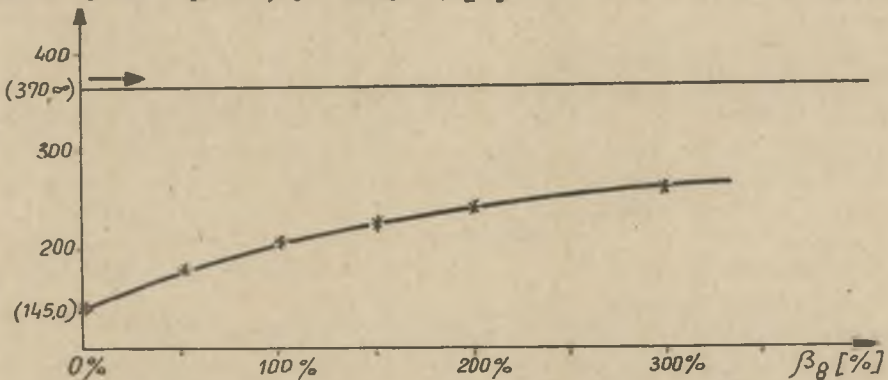
$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^m T_{oi} \cdot n_i}{n} = T \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i T_{oi}}{T_i}.$$

dla stacjonarnej wartości współczynnika gotowości maszyny:

$$k_g = \frac{1}{1 - \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_j / (1 - k_{g1})}{k_{g1}}}$$

Tego rodzaju zależności są dość przydatne w praktycznych rozważaniach związanych z oceną możliwości zwiększenia niezawodności maszyn poprzez zwiększenie niezawodności zespołów. Omówimy to zagadnienie na przykładzie ładowarki kopalnianej stosowanej w górnictwie. Maszynę podzielono na 8 zespołów:

1/ układ roboczy, 2/most przedni, 3/rama przegubowa, 4/obudowa, 5/napęd, 6/most tylny, 7/układ hydrauliczny i 8/silnik z wyposażeniem. Największy wpływ na niezawodność maszyny miały uszkodzenia zespołów nr 2 i nr 8. Wpływ wzrostu średniego czasu zdatności silnika z wyposażeniem na wzrost średniego czasu zdatności pomiędzy uszkodzeniami całej maszyny można wyrazić np. tak, jak na rys. 5 [1].



Rys.5. Zależność średniego czasu zdatności pomiędzy uszkodzeniami maszyny od wzrostu średniego czasu zdatności silnika z wyposażeniem

Tutaj β_8 jest współczynnikiem charakteryzującym względny przyrost czasu zdatności zespołu:

$$\beta_8 = \frac{\Delta T_8}{T_8}$$

Z analizy danych uzyskanych w badaniach wynika, że wzrost średniego czasu zdatności pomiędzy uszkodzeniami silnika o 50% spowoduje wzrost średniego czasu zdatności całej maszyny o ok. 26%, przy ustalonej niezawodności pozostałych zespołów.

Podobnie skrócenie średniego czasu naprawy zespołu Nr 2 o 50% spowoduje skrócenie średniego czasu odnowy maszyny o ok. 22%. Porównanie

względego wzrostu średniego czasu zdatności maszyny, uzyskiwanego dzięki zwiększeniu średnich czasów zdatności poszczególnych zespołów wykazało, że najefektywniej można zwiększyć niezawodność maszyny poprzez zwiększenie niezawodności silnika.

5. Uwagi o problemach praktyki, związanych z opisem i oceną niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych

Zasadniczym zagadnieniem stojącym przed praktyką budowy i eksploatacji jest podnoszenie niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych. Pierwszym etapem postępowania ukierunkowanego na zwiększenie niezawodności jest ocena obecnego poziomu niezawodności maszyn i ich elementów. Oceny takie dokonywane są w odniesieniu do wielu rodzajów maszyn i urządzeń mechanicznych, jak np.: maszyn i urządzeń górniczych, ciągników i maszyn rolniczych, maszyn budowlanych, pojazdów samochodowych itp. Uzyskiwane oceny nie są jednak w pełni porównywalne ze względu na różne założenia przyjmowane przy opisie niezawodności i nieco odmienne sposoby postępowania w badaniach.

Wiele zespołów, np. silniki, układy hadrauliczne, osprzęt elektryczny, układy napędowe itp. są stosowane w wielu rodzajach maszyn i pojazdów. Ocena niezawodności takich zespołów powinna być dokonywana przy takich samych założeniach i za pomocą takich samych metod w odniesieniu do poszczególnych zastosowań każdego zespołu. Wyniki oceny niezawodności zespołu będą mogły być wtedy wykorzystane przy ocenie potencjalnej niezawodności całej maszyny już na etapie jej projektowania lub dopracowywania konstrukcji. Można będzie także sprecyzować wymagania odnośnie do niezawodności zespołu w poszczególnych jego zastosowaniach.

Zmiana właściwości elementów maszyny pod działaniem otoczenia obrabianych materiałów prowadzi w konsekwencji do powstawania uszkodzeń. Wydaje się, że celowe jest poszukiwanie takich opisów niezawodności, które w większym niż obecnie stopniu uwzględniałyby zagadnienia tzw. fizyki uszkodzeń, tzn. powiązanie zmian właściwości materiałów konstrukcyjnych i skojarzeń elementów z procesami fizyko-chemicznymi wywołującymi te zmiany. Opisy takie mogłyby stanowić punkt wyjścia do badań mających na celu optymalne kształtowanie właściwości materiałów konstrukcyjnych i elementów maszynowych, ze względu na wymaganą niezawodność maszyn.

LITERATURA.

- [1] W. Cholewa, L. Dwiliński, A. Pawlik, H. Śleszyński: "Analiza wyników z I etapu eksploatacyjnych badań niezawodności ładowarek czołowych Ł-2". IBMER, Warszawa 1974.
- [2] L. Dwiliński: "Wpływ specyfiki eksploatacji na niezawodność maszyn rolniczych". Biuletyn Prac Naukowo-Badawczych IBMER, Nr 7 1974 r.
- [3] L. Dwiliński, M. Królikowski, A. Pawlik: "O zapewnianiu niezawodności maszyn rolniczych". Materiały Szkoły Zimowej-76, OPT, Katowice, 1976.

- [4] E.Fidelis, S.Firkowicz, K.Grzesiak, J.Kołodziejcki, K.Wiśniewski: "Matematyczne podstawy oceny niezawodności", PWN, Warszawa, 1966
- [5] B.W.Gniedenko, J.K.Bielajew, A.D.Sołowiew: "Metody matematyczne w teorii niezawodności", WNT, Warszawa, 1968.
- [6] J.Jaźwiński: "Studium nad metodami oceny niezawodności pewnej klasy obiektów technicznych", Informator ITWL, Warszawa, 1973.
- [7] J.Konieczny: "Wstęp do teorii eksploatacji urządzeń", WNT, Warszawa, 1971.
- [3] J.Konieczny: "Sterowanie eksploatacją urządzeń". PWN, Warszawa, 1975.

О НАДЕЖНОСТИ МАШИН И МЕХАНИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ Резюме

Дан анализ конструкции, функционирования и эксплуатации машин и механических изделий с точки зрения их надёжности. Рассмотренный случайный характер задач, выполняемых машиной, изменение надёжной структуры машины, а также особенности ремонта, который только в некоторой степени возвращает начальные свойства машины. Эти факторы принимаются во внимание при математическом моделировании надёжности, а также при оценке надёжности машин. Даны примеры оценки надёжности сельскохозяйственных, строительных и горных машин.

ON RELIABILITY OF MACHINES
Summary

The analysis of the construction, operation and using machinery from the reliability point of view have been performed. The random character of tasks, varying structure and properties of machine repairs have been taken into account. The possibility of consideration the factors in description and estimation of the machine reliability have been examined. Some examples of the description and estimation agricultural, building and mining machines reliability have been given.