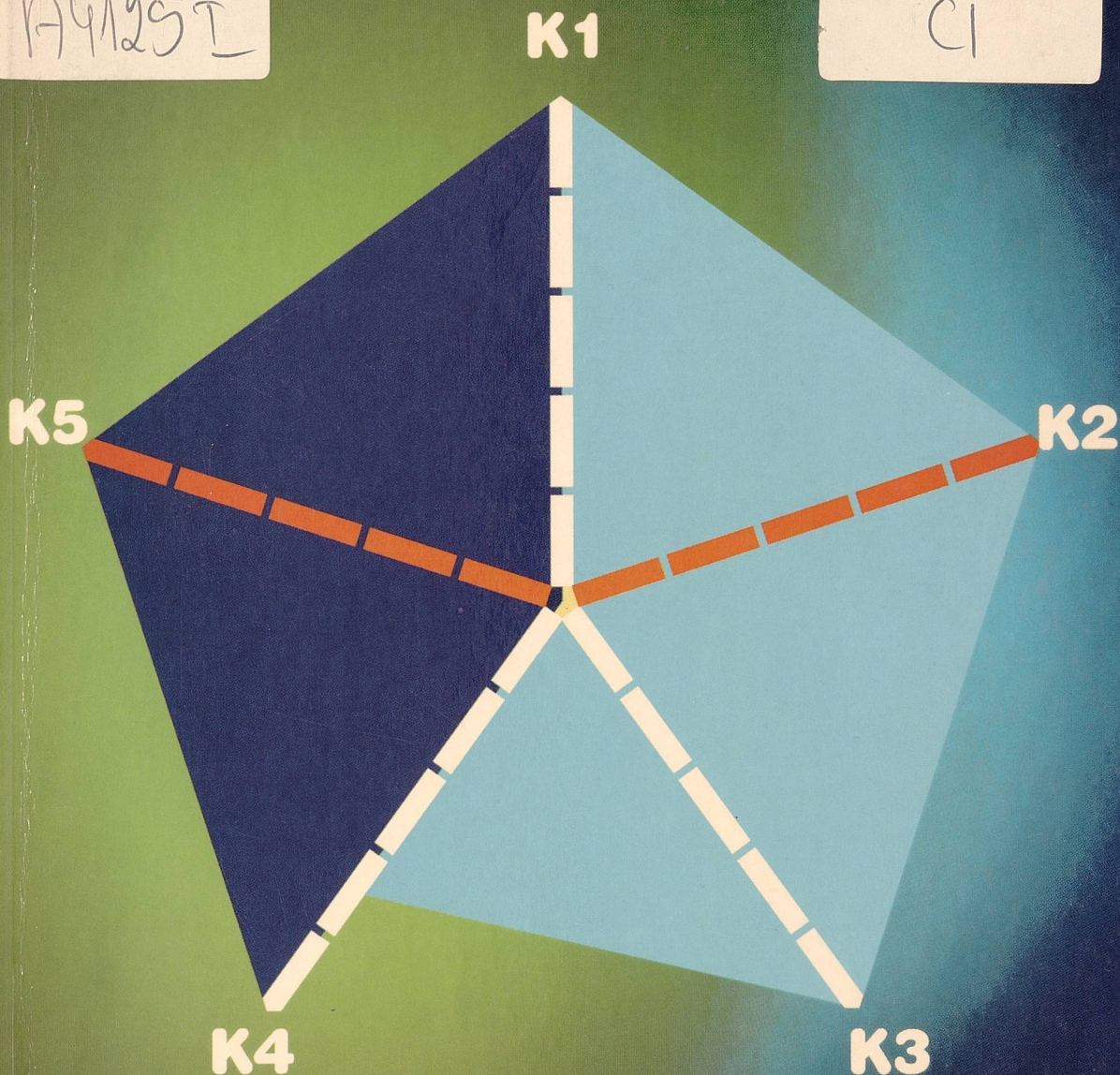


1741251

C1



TOMASZ NOWAKOWSKI

**Metodyka
prognozowania
niezawodności
obiektów
mechanicznych**



Tomasz NOWAKOWSKI

The methods of the prediction
of mechanical object dependability

Tomasz Nowakowski

Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej · Wrocław 1999

Recenzenci

Lech A. BUKOWSKI
Stanisław OZIEMSKI

Opracowanie redakcyjne

Alicja KORDAS

Korekta

Zofia JASINA

Projekt okładki

Dariusz GODLEWSKI

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0324-962X

Ark. wyd. 10,75. Ark. druk. 8¹/₂. Papier offset. kl. III, 70 g, B1.
Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 180/99.

*Niezawodność, prognozowanie,
obiekt mechaniczny,
niepewność informacji,
system doradczy*

TOMASZ NOWAKOWSKI*

METODYKA PROGNOZOWANIA NIEZAWODNOŚCI OBIEKTÓW MECHANICZNYCH

Rozpatrzono problemy związane z prognozowaniem niezawodności obiektów mechanicznych. Na podstawie przyjętych kryteriów stosowane metody prognozowania niezawodności podzielono na trzy podstawowe klasy: metody niezawodności konstrukcyjnej, metody eksperckie i metody analogii statystycznej. Zaproponowano metodykę prognozowania niezawodności wymagającą oszacowania dla rezultatów ocen lub prognoz nieuszkodzalności i naprawialności miary określającej niepewność zgromadzonych informacji. Współczynnik pewności informacji stanowi podstawę do syntezy informacji; wynikiem prognozowania są wskaźniki niezawodności o najlepszej charakterystyce pewności wyniku. Analiza własnych badań niezawodności obiektów mechanicznych (głównie pojazdów i maszyn roboczych) umożliwiła sformułowanie reguł służących do dekompozycji obiektu na elementy składowe, systematyzacji wyników ocen i prognoz częściowych, gromadzenia charakterystyk nieuszkodzalności i naprawialności obiektu oraz szacowania współczynników pewności informacji. Metodę syntezy współczynników pewności prognoz częściowych zastosowano do opracowania komputerowego systemu doradczego. Rezultatem wnioskowania systemu jest zaklasyfikowanie niezawodności obiektu do jednej lub kilku spośród 10 klas niezawodności.

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

- A – zbiór atrybutów obiektu
- $B(p, q)$ – funkcja beta Eulera
- BW – baza wiedzy
- C – stałe określające stan użyteczności
- CF – zbiór współczynników pewności cf

* Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, 50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27.

D	– liczba rangująca możliwość wykrycia zdarzenia
$d(.)$	– funkcja informacji
E	– zbiór podsystemów E_i
E	– zbiór obserwacji (przesłanek) e_j
EX	– wartość oczekiwana zmiennej losowej X
f	– formuła zawsze fałszywa
F	– zbiór zdań
F	– zbiór faktów
$f(.)$	– funkcja gęstości prawdopodobieństwa
$F(.)$	– dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa
$f_x(x)$	– łączna funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennych X
$g(.)$	– funkcja uszkodzalności
H	– zbiór hipotez (konkluzji) h_j
H	– entropia informacyjna
$h(t)$	– funkcja ryzyka
k	– dowolna liczba dodatnia
K_g	– współczynniki gotowości
$K_g(.)$	– funkcja gotowości
K_i	– i -te kryterium klasyfikacji metod prognozowania niezawodności
$k_{(.)}$	– klatka, subklatka
Km	– komentarz
K_α	– kwantyl rzędu α
L	– liczba rozmyta
L	– zbiór zmiennych opisujących efekty obciążenia
l	– przebieg
l_m	– przebieg między uszkodzeniami
l_p	– przebieg do pierwszego uszkodzenia
m	– wykładnik potęgi
M	– współczynnik określający wpływ czynnika na bazową funkcję ryzyka
$M(t)$	– prawdopodobieństwo obsługi
$MB(.)$	– miara wiarygodności
$MD(.)$	– miara niewiarygodności
$MK(.)$	– miara konieczności zbioru rozmytego
$MM(.)$	– funkcja rozkładu możliwości zbioru rozmytego
$MP(.)$	– miara przekonania,
$MW(.)$	– miara wyobraźności
NR	– naprawa renowacyjna
O	– zbiór obiektów o
Op	– operator relacyjny
P	– liczba rangująca prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia
$P(.), p$	– prawdopodobieństwo
Q	– obciążenie względne pojazdu

R	– zbiór relacji przyporządkowanych własnościom podsystemów R_i
R	– zbiór ram r_i ,
R	– niezawodność
$R(.)$	– funkcja niezawodności (nieuszkodzalności)
RW	– reprezentacja wiedzy
s	– odchylenie standardowe z próby
S	– zbiór zmiennych opisujących ogólnie rozumianą wytrzymałość
S	– liczba rangująca istotność skutku zdarzenia
S	– struktura
t	– czas
t	– formuła zawsze prawdziwa
T	– czas poprawnej pracy
T_n	– czas naprawy
u	– charakterystyka bezpieczeństwa
u_γ	– kwantyl rozkładu normalnego rzędu γ
v	– prędkość jazdy
V	– zbiór wartości atrybutów v
$V(.)$	– stopień słuszności stwierdzenia rozmytego
$v_{(.)}$	– współczynnik zmienności
$D^2(X)$	– wariancja zmiennej losowej X
W	– zbiór własności podsystemu W_j
WW	– wektor wiedzy
X	– wektor zmiennych losowych reprezentujących niepewne wielkości opisujące konstrukcję
Z	– zadanie, które ma obiekt wykonać
$z(E_i, W_j)$	– charakterystyka formy zadaniowej i -tego podsystemu
Φ	– funkcja spełniana przez obiekt
$\Phi(.)$	– funkcja Laplace’a
$\Gamma(.)$	– funkcja gamma
$\Lambda(.)$	– skumulowana intensywność uszkodzeń
Ω^*	– obszar niezdatności
α	– kąt skrętu kół przednich,
α	– ciąg formuł elementarnych
β	– najkrótsza odległość punktu pracy od powierzchni stanu granicznego
β	– poziom ufności
β	– parametr skali rozkładu prawdopodobieństwa
β	– wektor współczynników regresji
δ	– współczynnik bezpieczeństwa
δ	– parametr kształtu rozkładu prawdopodobieństwa
δ	– współczynnik nierówności nawierzchni
ε	– dowolna liczba dodatnia

- γ – część zbioru obiektów
- κ – warunki eksploatacji obiektu
- $\kappa(t)$ – wektor czynników wymuszających otoczenia
- $\kappa_i(t)$ – i -ty czynnik wymuszający otoczenia
- λ – intensywność uszkodzeń
- λ_0 – bazowa intensywność uszkodzeń
- λ_1 – intensywność uszkodzeń pierwszego obiektu
- $\lambda(t)$ – funkcja intensywności uszkodzeń
- μ – wartość oczekiwana zmiennej losowej o rozkładzie normalnym
- $\mu_A(.)$ – funkcja przynależności zbioru rozmytego
- $\mu(t)$ – funkcja intensywności napraw
- π_A – współczynnik adaptacji
- π_s – poprawka na adaptację
- σ – odchylenie standardowe
- ω – średni parametr strumienia uszkodzeń
- $\omega(.)$ – parametr strumienia uszkodzeń
- ω_ϕ – zbiór wymagań dla cech obiektu, których spełnienie jest warunkiem koniecznym i wystarczającym dla poprawnego funkcjonowania obiektu
- $\bar{x}$ – wartość średnia zmiennej losowej X
- $X^2_{..}$ – dwustrvbuanata rozkładu chi-kwadrat o n stopniach swobody

1. WPROWADZENIE

WSTĘP

Dla racjonalnej realizacji procesu zaspokajania potrzeb przez zaprojektowany i wytworzony w tym celu obiekt techniczny fundamentalne znaczenie ma uszkodzenie obiektu – utrata zdolności do wypełniania wymaganych funkcji. Unikanie uszkodzeń powstających w fazie eksploatacji obiektu należy do najważniejszych celów ich projektowania i wytwarzania. Jednocześnie uważa się [130], że każde uszkodzenie obiektu, którego skutkiem jest zagrożenie życia lub zdrowia człowieka, powstanie dużych strat ekonomicznych w systemach eksploatacji obiektów technicznych lub w środowisku naturalnym powoduje dużo większy postęp wiedzy inżynierskiej niż wszystkie dobrze zrealizowane projekty obiektów technicznych. Prognozowanie niezawodności powinno pozwolić na jakościową i ilościową analizę możliwości wystąpienia takich zdarzeń na podstawie zgromadzonej wcześniej wiedzy.

Podstawowym, pierwotnym problemem w prognozowaniu niezawodności jest ilościowe określenie wartości wskaźników niezawodności lub parametrów charakterystyk niezawodności. Ocenę ilościową utrudniają różne ograniczenia, takie jak [1, 11, 166, 170]:

- niezadowalająca jakość danych niezawodnościowych (brak lub mała wiarygodność danych utrudnia sformułowanie odpowiedzialnych wyników analizy i często prowadzi do ocen „konserwatywnych”, tzn. przyjmowania wskaźników oceny takich jak dla najgorszych eksploatowanych maszyn),
- trudny do zbadania i oszacowania wpływ człowieka i otoczenia systemu eksploatacji na niezawodność maszyny,
- przybliżony charakter prognozowanych miar niezawodności.

Już na etapie oceny niezawodności danego obiektu eksploatowanego w ustalonych warunkach użytkowania i obsługi uzyskuje się różne wartości wskaźników niezawodności, w zależności od np. źródeł informacji lub stosowanej metody oceny. Nawet dla tak dobrze dopracowanego elementu mechanicznego jakim jest koło zębate, w badaniach niezawodności przekładni koła czerpakowego koparki wielonaczyniowej SRs-2000 [114] zaobserwowano ponaddwukrotną różnicę w oszacowaniu średniego czasu pracy do uszkodzenia. Korzystano z czterech źródeł informacji: badań eksploatacyjnych, konstrukcyjnych obliczeń sprawdzających, diagnostyki wibroakustycznej i opinii ekspertów. Wszystkie wyniki oceny powinny być zgodne z rzeczywistą wartością wskaźnika niezawodności. Przyjęto więc, że tym co różnicuje poszczególne wyniki jest ich wiarygodność lub niepewność, tym bardziej, że stanowią one podstawę do opracowania prognozy niezawodności.

Analizy [170] różnych obiektów technicznych, polegające na porównaniu oszacowanych w fazie projektowania obiektów wskaźników niezawodności z wartościami

wskaźników obliczonych na podstawie danych uzyskanych po wprowadzeniu zaprojektowanych obiektów do eksploatacji, wskazują, że dobra dokładność prognozowania niezawodności systemów oznacza, że wartości obliczone i zaobserwowane różnią się nie więcej niż 2–4 razy. Podkreśla się przy tym interdyscyplinarny charakter prognoz niezawodności.

1.1. PODSTAWOWE POJĘCIA I DEFINICJE

1.1.1. NIEZAWODNOŚĆ

Zgodnie z ustaleniami międzynarodowymi [139], w pracy przyjęto, że termin **niezawodność** (*dependability* – ang.) jest używany tylko do ogólnego nieliczbowego opisu właściwości obiektu technicznego. *Niezawodność oznacza zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi.* Proponowana obecnie definicja niezawodności różni się od dotychczas stosowanej [133] pominięciem takich właściwości obiektu, jak trwałość i przechowywalność oraz uzupełnieniem definicji pojęciem zapewnienie środków obsługi.

Trwałość obiektu jest określona przez czas, który upływa od rozpoczęcia do zakończenia jego eksploatacji. Oznacza to, że zdolność obiektu do wykonywania wymaganych funkcji może być przerywana uszkodzeniami i przywracana naprawami, a zakończenie okresu użyteczności jest określone przez osiągnięcie stanu granicznego.

Przechowywalność jest związana z powstawaniem uszkodzeń w wyróżnionym stanie eksploatacyjnym – stanie przechowywania. Rozróżnienie przechowywalności i nieuszkodzalności zależy od sposobu zdefiniowania stanów eksploatacyjnych. Wymóg zapewnienia środków obsługi precyzuje klasę zdarzeń, które można uważać za uszkodzenia.

Niezawodność jest utożsamiana z gotowością [139] – zdolnością obiektu do utrzymania się w stanie umożliwiającym wypełnienie wymaganych funkcji w danych warunkach, w danej chwili, przy założeniu, że są dostarczone wymagane środki zewnętrzne. Podstawową miarą gotowości jest funkcja gotowości $K_g(t)$ – prawdopodobieństwo, że obiekt o jest w stanie spełniać wymaganą funkcję w danych warunkach, w danej chwili przy założeniu, że zostały dostarczone wymagane środki zewnętrzne [170]

$$K_g(t) = P(o \text{ zdatny w chwili } t). \quad (1.1)$$

Nieuszkodzalność [139] charakteryzuje zdolność obiektu do wypełnienia wymaganych funkcji (do poprawnego działania nie przerwane uszkodzeniem) w danych warunkach w danym przedziale czasu

$$R(t) = P(o \text{ zdatny w przedziale czasu } [0, t]). \quad (1.2)$$

Zadanie Z , które obiekt ma wykonać, można zapisać za pomocą uporządkowanej trójki [74]

$$Z = Z \{t, \Phi, \kappa\}, \quad (1.3)$$

gdzie:

t – czas pracy obiektu,

Φ – funkcja spełniana przez obiekt,

κ – warunki eksploatacji obiektu.

Dla funkcji Φ można ustalić zbiór wymagań ω_Φ dla cech obiektu, których spełnienie jest warunkiem koniecznym i wystarczającym poprawnego funkcjonowania obiektu. Wówczas miarą nieuszkodzalności obiektu względem zadania Z jest prawdopodobieństwo wykonania tego zadania

$$R = R(t, \omega_\Phi, \kappa) = P\{A(\tau, \omega_\Phi, \kappa); 0 \leq \tau < t\}, \quad (1.4)$$

gdzie $A(t, \omega_\Phi, \kappa)$ oznacza zdarzenie polegające na tym, że obiekt jest zdalny.

Obsługiwalność [139] określa zdolność obiektu do utrzymywania lub odtwarzania w danych warunkach eksploatacji stanu, w którym może on wypełniać wymagane funkcje przy założeniu, że obsługa jest wykonywana w przyjętych warunkach z zachowaniem ustalonych procedur i środków. Zapewnienie środków obsługi charakteryzuje zdolność organizacji zajmującej się obsługą do zapewnienia w danych warunkach, na żądanie, środków potrzebnych do obsługi obiektu przy określonej polityce obsługi.

Podstawową miarą obsługiwalności i zapewnienia środków obsługi jest prawdopodobieństwo obsługi $M(t)$ – prawdopodobieństwo wykonania w ustalonym przedziale czasu aktywnej obsługi obiektu eksploatowanego w określonych warunkach, przy założeniu, że obsługa jest wykonana w ustalonych warunkach z zastosowaniem określonych metod i środków

$$M(t) = P(o \text{ został naprawiony w przedziale czasu } [0, t]). \quad (1.5)$$

Miary gotowości obiektu są powiązane funkcyjnie z miarami nieuszkodzalności i obsługiwalności:

- jeżeli obiekt jest nienaprawialny, to:

$$K_g(t) = R(t), \quad (1.6)$$

• jeżeli obiekt jest naprawialny, to gotowość obiektu w przedziale czasu $[t, t + \Delta t]$ oznacza prawdopodobieństwo, że obiekt jest zdalny w chwili t i nie ulegnie uszkodzeniu w przedziale $[t, t + \Delta t]$ lub że obiekt jest uszkodzony w chwili t i zostanie naprawiony w przedziale $[t, t + \Delta t]$. Jeżeli założymy, że intensywność uszkodzeń λ i intensywność napraw μ są stałe

$$K_g(t + \Delta t) = K_g(t) (1 - \lambda \Delta t) + (1 - K_g(t)) \mu \Delta t, \quad (1.7)$$

to

$$K_g(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu(1 - K_g(0)) - \lambda K_g(0)}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (1.8)$$

Średnia gotowość asymptotyczna (współczynnik gotowości) jest równa udziałowi czasu zdadności w czasie eksploatacji

$$K_g(\infty) = \mu / (\lambda + \mu). \quad (1.9)$$

Prognozowanie niezawodności sprowadza się więc do prognozowania miar gotowości obiektu, co wymaga oszacowania miar nieuszkodzalności i obsługiwalności.

1.1.2. PROGNOZOWANIE

Prognozowanie [139] oznacza proces obliczeniowy stosowany do uzyskania prognozowanej wartości danej wielkości. Prognoza (wartość prognozowana) dotyczy wartości liczbowej danej wielkości, ustalonej wówczas, gdy wielkość ta nie może jeszcze być zaobserwowana ani wyznaczona na podstawie wcześniej zaobserwowanych lub oszacowanych wartości tej samej lub innych wielkości za pomocą modelu matematycznego.

Według pracy [145] pojęcie prognozowania ma szersze znaczenie – jest to wnioskowanie o stanie badanego obiektu technicznego, zjawiska lub procesu, na podstawie modelu oraz informacji dotyczących przeszłości i przyszłości. Rozróżnia się pojęcia predykcji i projekcji. **Predykcja** oznacza wnioskowanie o przyszłym stanie obiektu na podstawie odpowiedniego modelu według potencjalnych możliwości wystąpienia w przyszłości pewnych, nowych czynników, mogących w określony sposób zdeterminować przyszły jego stan. **Projekcja** zajmuje się wnioskowaniem o przyszłym stanie obiektu na podstawie odpowiedniego modelu, według znanych trajektorii zmian jego stanów w przeszłości. W takim ujęciu *prognozowanie jest syntezą projekcji i predykcji*. W odniesieniu do niezawodności [144] *prognozowanie jest rozumiane jako zbiór zasad i metod wnioskowania o wskaźnikach niezawodności na podstawie odpowiedniego modelu matematycznego*. Wyróżnia się niekiedy metody prognozowania statystycznego [78, 162], polegającego na przewidywaniu oczekiwanych wskaźników niezawodności i prawdopodobieństw uszkodzeń w przyszłości na podstawie modeli statystycznych.

1.1.3. OBIEKT MECHANICZNY

Określenie obiekt mechaniczny jest powszechnie używane jako synonim systemu mechanicznego, maszyny, urządzenia lub wyróżnionego obiektu technicznego (np. obiekt nieelektroniczny). *Obiektem nazywa się [157] dowolny prosty lub złożony układ (np. [139]: element, przyrząd, podsystem, jednostkę funkcjonalną, urządzenie, system) stanowiący przedmiot rozważań związany z rozwiązywaniem określonego problemu*. Jako obiekt techniczny (środek techniczny) rozumie się [37] wyroby będące narzę-

dziem lub pomieszczeniem. Obiekty mechaniczne (maszyny i urządzenia) należą do obiektów nazywanych narzędziami, służących do przekształcania (przemieszczania lub przetwarzania) materii, energii lub informacji [41]. Maszyna natomiast jest to [122] układ materialny złożony z połączonych ze sobą ciał wykonujących określony ruch służący do wykonywania pracy związanej z procesem wytwórczym lub przemianą energii.

Obiekty mechaniczne (maszyny) różnią się znacznie od wszystkich innych eksploatowanych obiektów i problematykę ich niezawodności należy rozpatrywać oddzielnie. Różnice polegają m.in. na tym, że obiekty mechaniczne [1, 170]:

- są złożone z wielu elementów, o trudnej do zdefiniowania i określenia jednorodności,
- mają skomplikowaną organizację wewnętrzną, opartą na wielu zjawiskach fizycznych, niejednorodnych względem siebie,
- realizują skomplikowane, wielocelowe procesy,
- podlegają zużyciu i starzeniu na skutek przebiegu procesów, których istota fizyczna nie jest rozpoznana do końca,
- pracują przy szerokim spektrum narażeń zewnętrznych, niejednokrotnie o bardzo wysokiej intensywności.

Wymienione cechy powodują, że obiektów mechanicznych nie można potraktować jako całości, w sposób ścisły. Formalnemu opisowi, a zatem i możliwościom ścisłego dokonania analizy i syntezy, podlegają tylko niektóre, wybrane i bardzo uproszczone, aspekty obiektów mechanicznych.

W analizie niezawodności obiekt jest rozpatrywany jako system hierarchiczny. Organizacja systemu odwzorowuje rozmieszczenie podsystemów (elementów) o określonych własnościach i sposoby ich łączenia.

Struktura systemu jest opisana trójką [62]

$$S^S = \langle E, W, R \rangle, \quad (1.10)$$

gdzie:

- | | |
|--|---|
| $E = \{E_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ | – zbiór wszystkich podsystemów, |
| $W = \{W_j(E_i)\}, j = 1, 2, \dots, m$ | – zbiór wszystkich istotnych własności podsystemów, |
| $R = \{R_l(W_j)\}, l = 1, 2, \dots, k$ | – zbiór relacji przyporządkowanych poszczególnym własnościom podsystemów. |

Własności podsystemu (elementu) są to [37] cechy umożliwiające uszczegółowienie i identyfikacje obiektu badań w pożądanym stopniu. Główne własności obiektu nazywa się także atrybutami [69, 129].

Zbiór E opisujący skład systemu spełnia warunki

$$E = \{E_i : z(E_i, W_j)\}, \quad (1.11)$$

przy czym: $z(E_i, W_j)$ – charakterystyka formy zadaniowej i -tego podsystemu.

Podsystem E_i jest opisany własnością $W_j \in W$. Można więc zapisać

$$z(E_i, W_j) \Rightarrow E_i \in E \wedge W_j \in W. \quad (1.12)$$

Wraz z dekompozycją systemu następuje dekompozycja ich własności i zachodzących między nimi relacji na bardziej szczegółowe. Wówczas strukturę systemu na n -tym poziomie dekompozycji można opisać trójką

$$S_n^S = \langle E_n, W_n, R_n \rangle, \quad (1.13)$$

gdzie E_n, W_n, R_n – podzbiory zbiorów E, W, R .

Na najniższym poziomie dekompozycji podsystem (element) jest niepodzielny. Niepodzielny element E_i jest charakteryzowany przez wiele własności W_j powiązanych relacjami R_l . Własności W_j (cechy opisujące element) dzieli się na dwie kategorie [141]: cechy pierwotne i cechy wtórne (fizyczne). Cechy pierwotne pozwalają na scharakteryzowanie elementu i stanowią informacje pozwalające na wyznaczenie cech wtórnych (uzupełniających). Cechy pierwotne opisują mikro- i makrogeometrię elementu, budowę materii i jej stan energetyczny. Cechy pierwotne pozwalają na jednoznaczny opis budowy i stanu energetycznego elementu. Nie można jednak na podstawie rozważań teoretycznych wyznaczyć cech wtórnych (fizycznych), które są określane doświadczalnie w umownych warunkach eksploatacji i na znormalizowanych elementach – próbkach.

Można przyjąć, że zbiór cech pierwotnych wyznacza stan niezawodnościowy elementu. Przekroczeniu granicznych wartości poszczególnych cech odpowiadają postacie uszkodzenia elementu, które definiują najniższy poziom analizy niezawodnościowej obiektu.

1.1.4. NIEPEWNOŚĆ INFORMACJI

Pojęcie niepewności informacji nie jest dostatecznie zdefiniowane. Uważa się [16], że informacje dotyczące otaczającego świata są nieprecyzyjne, niepełne lub niepewne. Pojęcie niepewności rozumie się jako:

- stopień zgodności informacji z rzeczywistością [16],
- brak odpowiednich informacji do podjęcia rozpatrywanej decyzji [26].

Informacje mogą być również nieprecyzyjne, co oznacza, że nie istnieją jednoznaczne granice zbiorów wartości, do których powinna należeć zmienna zawarta w rozpatrywanej informacji.

Osobnym problemem jest przekazywanie informacji niepewnych. Mówi się o konkluzywności wnioskowania [127], jeżeli zostanie określony związek między stopniem pewności przesłanek a stopniem pewności wniosku. Rolę konkluzywności wnioskowania można porównać do roli, jaką spełnia oszacowanie błędu przy formułowaniu zadania empirycznego.

Ocena niezawodności wymaga wzięcia pod uwagę wielu informacji dotyczących m.in.:

- czasu eksploatacji (użytkowania, obsługi, oczekiwania na naprawę itp.),
- sposobu prowadzenia badań niezawodności obiektu (np. plan badań),
- strategii obsługowej (np. plan obsługi profilaktycznych),
- charakterystyk warunków eksploatacji obiektu.

Wszystkie te informacje są obarczone pewnym stopniem niepewności i analiza tego zjawiska jest w literaturze zagadnienia (np. [16, 26, 39]) nazywana oceną niepew-

ności (*uncertainty evaluation* – ang.). Analizę wpływu niepewności hipotez przyjętych do modelowania np. skutków uszkodzeń określa się natomiast jako [170] analizę wrażliwości (*sensitivity study* – ang.).

Ocenę i prognozę niezawodności można uzyskać różnymi metodami i wynik prognozy uzyskuje się raczej w postaci pewnego przedziału wartości niż wartości dokładnej. Niektóre wartości mają większe szanse wystąpienia niż pozostałe.

Najważniejsze powody niepewności informacji charakteryzujących niezawodność obiektu są związane z [170]:

- niepewnością dotyczącą parametrów (np. mała liczność próbki statystycznej i związany z tym szeroki przedział ufności parametru, ekstrapolacja danych z jednego obiektu na inny),
- niepewnością dotyczącą modelowania (modele niezawodności są przybliżone, szczególnie w zakresie wpływu otoczenia systemu eksploatacji lub wpływu człowieka),
- niepewnością wynikającą z niewyczerpującego charakteru analizy niezawodności (analityk nie może być zupełnie pewien czy wzięto pod uwagę wszystkie istotne czynniki dotyczące uszkodzeń i ich interakcji).

Niepewność parametryczna może być wywołana takimi czynnikami, jak: niepewność statystyczna wynikająca ze skończonego zbioru danych badawczych lub niepewności oceny danych spowodowanej subiektywną interpretacją danych o uszkodzeniach lub naprawach.

Niepewność statystyczna jest oceniana za pomocą modeli probabilistycznych (rozdz. 3). Niepewność oceny danych wiąże się z pozyskiwaniem informacji z systemu eksploatacji obiektu i może mieć szczególnie duże znaczenie przy ocenie obiektów bardzo niezawodnych. Podstawową przyczyną tego typu niepewności są problemy z precyzyjnym zdefiniowaniem uszkodzenia obiektu i określeniem chwili przejścia obiektu ze stanu zdadności do stanu niezdadności.

Dotychczas nie opracowano ogólnej metody modelowania informacji niepewnych. W literaturze zagadnienia (np. [16, 26, 39]) przeważa podejście numeryczne. Stosuje się różne kategorie współczynników pewności (*certainty factor* – ang.). Bardzo istotnym i trudnym zadaniem jest ustalenie właściwej interpretacji stosowanych miar stopnia pewności. Formalne modele matematyczne najczęściej stosowanych kategorii współczynników pewności omówiono w p. 3.4.

1.2. CEL I ZAKRES PRACY

Analiza systemowa służąca do prognozowania niezawodności składa się najczęściej z czterech zasadniczych etapów (rys. 1.1) [62, 121, 166, 170]:

1. Analizy konstrukcyjnej i funkcjonalnej obiektu służącej do identyfikacji elementów systemu, ich własności i zachodzących między nimi relacji.
2. Analizy jakościowej problemu, której celem jest określenie (modelowanie) wszystkich możliwych przyczyn wpływających na niezawodność obiektu, a w rezulta-

cie zestawienie postaci uszkodzenia elementów systemu istotnych z punktu widzenia oceny niezawodności systemu.

3. Analizy ilościowej zagadnienia, prowadzącej do oszacowania miar niezawodności oraz scharakteryzowania stopnia niepewności danych wejściowych i wyników obliczeń.

4. Wnioskowania merytorycznego.

Koncepcje metodyki prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych oparto na możliwości syntezy oszacowań miar nieuszkodzalności i naprawialności pochodzących ze wszystkich dostępnych dla danego obiektu metod. W schemacie na rysunku 1.1 omawiana metodyka obejmuje przede wszystkim etap 3. analizy ilościowej.

Informację o wyniku oceny lub prognozy niezawodności obiektu mechanicznego można zapisać w postaci czwórki uporządkowanej [129]

$$\langle O, A, V, d \rangle, \quad (1.14)$$

gdzie:

O – skończony zbiór obiektów,

A – skończony zbiór atrybutów,

V – zbiór wartości atrybutów,

$d: O \times A \times V \rightarrow D ([0, 1])$ – funkcja informacji.

Funkcja d przypisuje każdemu obiektowi $o \in O$, atrybutowi $a \in A$ i wartości $v \in V$ podzbiór $D \subset [0, 1]$. Informacją o obiekcie o nazywa się funkcję

$$d_o: A \times V \rightarrow D ([0, 1]), \quad (1.15)$$

taką, że

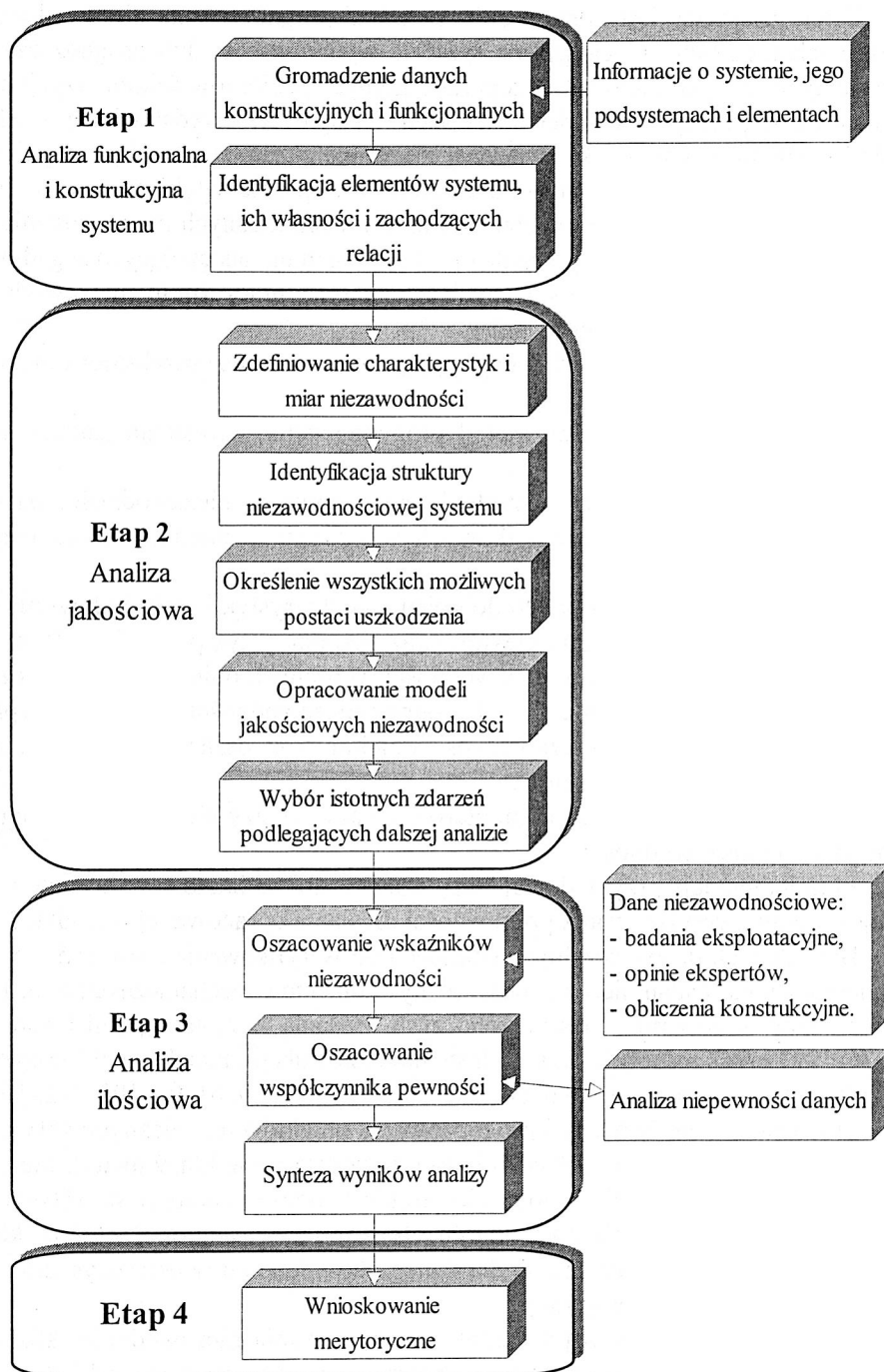
$$d_o(a, v) = d(o, a, v) \text{ dla każdego } o \in O, a \in A, v \in V. \quad (1.16)$$

Funkcja informacji może mieć różny charakter, np. prawdopodobieństwa [129]. Wobec niepewności rezultatów ocen i prognoz niezawodności założono, że funkcja informacji będzie określać niepewność uzyskanych wyników. Wówczas stwierdzeniu, że obiektowi o przysługuje atrybut o nazwie a i wartości v można zostać przypisany współczynnik pewności cf [26]

$$\begin{aligned} & \langle o, a, v, cf \rangle = \\ & = \langle \text{OBIEKT, NAZWA ATRYBUTU, WARTOŚĆ ATRYBUTU,} \\ & \quad \text{WSPÓŁCZYNNIK PEWNOŚCI} \rangle \end{aligned} \quad (1.17)$$

W prezentowanym ujęciu zagadnienia określenie:

- OBIEKT odpowiada, w zależności od analizowanego poziomu dekompozycji obiektu, nazwie całego systemu, jego podsystemów lub elementów,
- NAZWA ATRYBUTU oznacza cechy obiektu charakteryzujące jego stan niezawodnościowy lub po przetwarzaniu danych wskaźniki i charakterystyki niezawodności,
- WARTOŚĆ ATRYBUTU to wartości odpowiednich cech lub wskaźników,
- WSPÓŁCZYNNIK PEWNOŚCI definiuje niepewność sformułowanej oceny lub prognozy.



Rys. 1.1. Schemat analizy niezawodności obiektu mechanicznego
Fig. 1.1. Diagram of a mechanical object dependability

Celem rozprawy jest opracowanie metodyki prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych polegającej na syntezie wyników ocen lub prognoz częściowych uzyskanych różnymi metodami dla poszczególnych poziomów dekompozycji obiektu na podstawie współczynników pewności ocen. Osiągnięcie przedstawionego celu wymagało uwzględnienia tematyki związanej z szeroko rozumianą teorią i inżynierią niezawodności. Ze względu na złożoność omawianej problematyki zastosowano techniki informatyczne służące do gromadzenia i przetwarzania danych oraz tworzenia baz wiedzy. Realizacja celu pracy wymagała opracowania m.in. następujących zagadnień:

- sprecyzowania pojęć związanych z tematyką pracy (m.in. niezawodność, prognozowanie, obiekt mechaniczny),
- przeanalizowania metod oceny i prognozowania niezawodności obiektów technicznych,
- klasyfikacji stosowanych metod prognozowania, określenia zakresu ich stosowania,
- sformułowania założeń metodyki prognozowania niezawodności bazującej na syntezie wyników prognoz częściowych w oparciu o charakterystykę niepewności informacji,
- analizy modeli stosowanych do opisu charakterystyk i wskaźników niezawodności, poziomów dekompozycji obiektów oraz charakterystyk pewności informacji,
- analizy wyników badań niezawodności wybranych obiektów mechanicznych pod kątem możliwości uzyskania ocen i prognoz niezawodności, określenia wpływu środowiska eksploatacji na niezawodność obiektu oraz oszacowanie współczynników pewności uzyskanych rezultatów,
- sformułowania założeń komputerowej bazy wiedzy służącej wspomaganie prognozowania niezawodności,
- implementacji przykładowej bazy wiedzy do szkieletowego systemu ekspertowego w celu zweryfikowania poprawności działania opracowanej metodyki.

Bazę danych doświadczalnych służących do weryfikowania rozważań teoretycznych stanowią wyniki badań niezawodności różnych obiektów mechanicznych (tab. 1.1), głównie środków transportu i maszyn roboczych. Badania te zostały zrealizowane w latach 1976–1997 przez zespoły badawcze Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej przy istotnym udziale autora (np. [57, 59, 61, 96, 108, 112, 165]).

Stosowane metody oceny i prognozowania obiektów technicznych sklasyfikowano i omówiono w rozdziale 2. Wyróżniono trzy podstawowe klasy metod: metody niezawodności konstrukcyjnej, metody eksperckie i metody analogii statystycznej. Określono zakres zastosowania poszczególnych metod i uzasadniono potrzebę korzystania ze wszystkich dostępnych metod dla danego komponentu w celu uzyskania możliwie wiarygodnego wyniku prognozy.

Założenia proponowanej metodyki prognozowania niezawodności sformułowano w rozdziale 3. Omówiono kolejne elementy uporządkowanej czwórki $\langle o, a, v, cf \rangle$. Założenia dotyczące analizowanego obiektu przedstawiono w p. 3.1, zawartość zbioru atrybutów obejmującego wskaźniki i charakterystyki niezawodności obiektu mecha-

nicznego omówiono w p. 3.2, wartości atrybutów możliwe do oszacowania podczas badania obiektów scharakteryzowano w p. 3.3, a modele reprezentacji danych niezawodnościowych przeanalizowano w p. 3.4. W rozdziale 4. zanalizowano możliwości oszacowania parametrów modeli niezawodności obiektów na podstawie wyników zrealizowanych badań własnych. Omówiono modele ujmujące wpływ czasu (p. 4.1) i wymuszeń otoczenia systemu eksploatacji (p. 4.2) na niezawodność obiektów na różnych poziomach dekompozycji. Wpływ definicji uszkodzenia przedstawiono w p. 4.3 i wskazano na związek z niepewnością rezultatów oceny.

Tabela 1.1. Obszar badań niezawodności obiektów mechanicznych wykorzystanych w pracy

Obiekt badań	Charakterystyka badań			Zakres badań		
	liczność próbek	liczba środowisk eksploatacji	czas badań lata	trwałość	nieuszkodzalność	naprawialność
Autobus miejski Jelcz PR 110U	110	5	5	+	+	+
Autobus międzymiastowy Sanos	26	1	2	+	+	+
Samochód ciężarowy Kamaz	9	1	3	+	+	+
Samochód ciężarowy Skoda	10	1	4	+	+	+
Samochód ciężarowy Fiat	245	1	5	+	+	+
Śródlądowa barka pchana BP-500	480	1	16	+	+	–
Ładowarka budowlana Ł-220	15	5	2	+	+	+
Koparka wielonaczyniowa SRs-2000	5	1	4	+	+	+
Koparka wielonaczyniowa SchRs-1200	7	1	2	+	+	+
Koparka wielonaczyniowa SchRs-800	3	1	3 (4)	+	+	+

Oznaczenia: „+” – występuje, „–” – nie występuje

Zagadnienie niepewności danych niezawodnościowych omówiono w rozdziale 5. Przeanalizowano źródła niepewności danych biorąc pod uwagę badania statystyczne i opinie ekspertów oraz porównując wyniki ocen pochodzących z różnych źródeł.

W celu zweryfikowania poprawności działania proponowanej metodyki opracowano studyjną wersję systemu doradczego wspomagającego prognozowanie niezawodności (rozd. 6.). Proces wnioskowania systemu oparto na regułowej reprezentacji wiedzy, a rezultaty oceny niezawodności gromadzono w ramowej bazie wiedzy. Przedstawiono komputerową realizację systemu doradczego (p. 6.3) z wykorzystaniem edytora szkieletowego systemu ekspertowego EXSYS Professional.

2. KLASYFIKACJA METOD PROGNOZOWANIA NIEZAWODNOŚCI OBIEKTÓW MECHANICZNYCH

Metody opracowywania prognoz niezawodności obiektów technicznych klasyfikuje się według różnych kryteriów [np. 84, 121, 144], w zależności od rodzaju obiektu i celu klasyfikacji. W klasyfikacji metod prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych uwzględniono następujące kryteria, oznaczone przez K_i :

- forma wnioskowania o niezawodności obiektu – K_1 ,
- definicja stanu granicznego obiektu – K_2 ,
- strategia utrzymania zdolności obiektu – K_3 ,
- źródło informacji o niezawodności obiektu – K_4 ,
- analizowany poziom dekompozycji obiektu – K_5 .

Wnioskowanie o niezawodności obiektu może być prowadzone w sposób dedukcyjny ($K_1 = 1$) lub niededukcyjny (redukcyjny) ($K_1 = 0$) [15, 127], w zależności od reguł, służących do sformułowania wniosku, oraz od rodzaju relacji łączącej przesłanki z wnioskiem.

Wnioskowanie dedukcyjne to takie wnioskowanie, w którym wniosek wynika logicznie lub entymematycznie z przesłanek [127]. Reguła dedukcji jest absolutnie niezawodną regułą wnioskowania [15]. Oznacza to, że jeżeli przesłanki są prawdziwe, to także prawdziwy jest wniosek wyprowadzony na podstawie tej reguły. Obowiązuje to w odniesieniu do wszystkich możliwych przesłanek.

Wśród metod wnioskowania niededukcyjnego wyróżnia się [127]:

- wnioskowanie redukcyjne,
- indukcja enumeracyjna (niezupełna),
- wnioskowanie statystyczne.

Wnioskowanie redukcyjne to takie wnioskowanie, w którym przesłanki wynikają entymematycznie z wniosku ze względu na zdania wchodzące w skład wiedzy wnioskującego. **Indukcja enumeracyjna** oznacza, że zdanie stwierdzające jakąś prawidłowość jest uznawane za wniosek na podstawie uznania zdań stwierdzających poszczególne, lecz nie wszystkie przypadki tej prawidłowości. **Wnioskowanie statystyczne** to wnioskowanie, w którym wnioski są uznawane na podstawie zdań sformułowanych metodami statystyki matematycznej według przesłanek będących zmiennymi losowymi.

Forma wnioskowania niededukcyjnego nie jest niezawodna [15]. Można powiedzieć, że jeżeli wniosek jest sformułowany na podstawie przesłanki w procesie wnioskowania niededukcyjnego, to wniosek jest uprawdopodobniony przez tę przesłankę.

Jedna z definicji stanu granicznego obiektu [70, 95] określa go jako stan, po przekroczeniu którego zostają odrzucone założenia projektu. Stany graniczne dzieli się na dwie kategorie [95]:

- graniczne stany nośności (bezpieczeństwa), które w zasadzie dotyczą przekroczenia dopuszczalnego obciążenia ($K_2 = 0$),
- graniczne stany użyteczności, które są określone przez kryteria odpowiadające normalnemu użytkowaniu ($K_2 = 1$).

Stany graniczne nośności dotyczą m.in. [95]:

- utraty wytrzymałości krytycznej przekrojów konstrukcji polegającej na dużych odkształceniach materiału (odkształcenie trwałe) lub zniszczeniu (pęknięcie),
- utraty stateczności ogólnej lub lokalnej (np. wyboczenie).

W pracy [124] wyróżniono trzy stany graniczne. W stanie granicznym nośności różni się stan I – odpowiadający spełnieniu warunku wytrzymałości przy jednokrotnym wystąpieniu obciążeń obliczeniowych i stan II – ujawniający się powstaniem pęknięć lub uszkodzeń zmęczeniowych przy wielokrotnym wystąpieniu obciążeń normowych.

Stany graniczne użyteczności obejmują m.in. [95]:

- odkształcenia utrudniające użytkowanie lub pogarszające wygląd elementów,
- nadmierne drgania pogarszające komfort użytkowania lub oddziałujące szkodliwie na organizm pracowników,
- uszkodzenia miejscowe zmniejszające trwałość elementu.

Kryterium strategii utrzymania zdatności obiektu K_3 wyróżnia dwie koncepcje utrzymania zdatności obiektu [36]:

- koncepcję, w której obiekt jest traktowany jako nienaprawialny ($K_3 = 0$),
- koncepcję uwzględniającą naprawialność obiektu ($K_3 = 1$).

Zgodnie z przyjętą definicją niezawodności, opracowanie prognozy dotyczącej tylko uszkodzenia obiektu naprawialnego nie wystarcza do wnioskowania o jego gotowości. Należy wziąć pod uwagę czynności umożliwiające przywracanie stanu zdatności lub odtwarzanie potencjału eksploatacyjnego obiektu w czasie jego eksploatacji (naprawy bieżące, odnowy profilaktyczne, modernizacje). Pozwala to na oszacowanie charakterystyk naprawialności.

Zgodnie z kryterium K_4 można wyróżnić dwa źródła wiedzy o obiekcie [45]:

- wiedzę obiektywną („głęboką”), wynikającą z podstawowych praw natury ($K_4 = 1$),
- wiedzę subiektywną („płytką”) opartą na doświadczeniu nabytym w trakcie wielokrotnego rozwiązywania problemów ($K_4 = 0$).

Uważa się [19, 155], że w razie braku informacji, uzyskanych w wyniku bezpośredniego, czynnego lub biernego eksperymentu na analizowanych obiektach, można do prognozowania zachowania się obiektów w przyszłości korzystać z opinii ekspertów. Ekspertami są osoby, które miały kontakt z procesem uszkodzeń i odnowy analizowanych obiektów lub obiektów do nich podobnych.

Poziomy dekompozycji obiektu technicznego najczęściej [np. 62, 69] są związane z podziałem opartym na strukturze konstrukcyjnej lub funkcjonalnej obiektu. Według kryterium K_5 wyróżniono:

- metody uwzględniające postać uszkodzenia elementu ($K_5 = 1$),

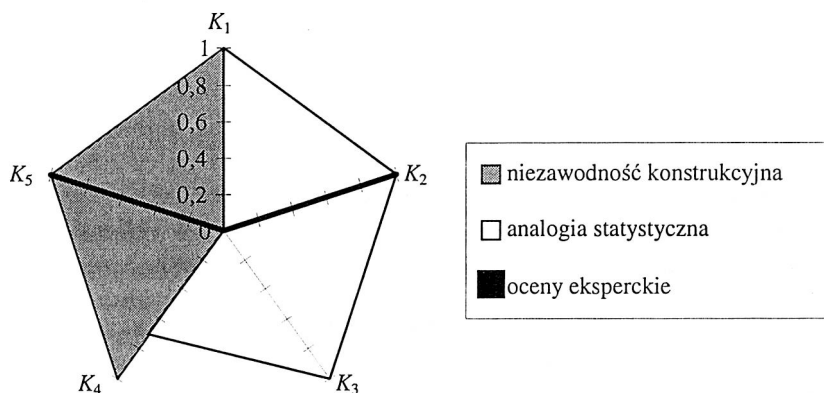
- metody ograniczone do elementu systemu ($K_5 = 0$).

Niektóre metody pozwalają na pogłębioną analizę problemu, zajmując się postacią i przyczyną uszkodzenia elementu [51, 88, 120].

Proponowany podział nie jest w pełni dychotomiczny, tzn. klasa $K_i = 1$ może zawierać pewne elementy klasy $K_i = 0$, ale nie występuje relacja przeciwna. Poszczególne metody prognozowania niezawodności opisano piątką $\{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}$. Wyróżniono 3 podstawowe klasy metod:

- metody niezawodności konstrukcyjnej $\{1; 0; 0; 1; 1\}$,
- metody eksperckie $\{0; 1; 0; 0; 1\}$,
- metody analogii statystycznej $\{1; 1; 1; 0,7; 0\}$.

Na rysunku 2.1 schematycznie przedstawiono zakres stosowania poszczególnych metod. Klasom metod odpowiadają różne obszary wykresu. Obszary metod niezawodności konstrukcyjnej i metod analogii statystycznej są rozłączne. Elementem wspólnym są odcinki ilustrujące klasyfikację metod eksperckich. Sens niepełnego obiektywizmu danych w metodach statystycznych ($K_4 = 0,7$) wyjaśniono w rozdziale 4. Uznano, że najlepszą metodą prognozowania niezawodności obiektu mechanicznego powinna być metoda klasy $\{1, 1, 1, 1, 1\}$, a więc metoda dedukcyjna, obejmująca graniczne stany użyteczności, uwzględniająca naprawialność obiektu i umożliwiającą wnioskowanie o postaci uszkodzenia elementu.



Rys. 2.1. Klasyfikacja metod prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych
Fig. 2.1. Classification of the methods allowing forecasting of mechanical object dependability

2.1. NIEZAWODNOŚĆ KONSTRUKCYJNA $\{1, 0, 0, 1, 1\}$

Metody niezawodności konstrukcyjnej zajmują się problemem uszkodzenia wybranego fragmentu (punktu elementarnego) obiektu spowodowanego osiągnięciem stanu granicznego utraty nośności. Uszkodzenia mają charakter nagły, zużyciowy lub starzeniowy, a zagrożenia naprawialności nie są brane pod uwagę.

Do podstawowych zalet metod niezawodności konstrukcyjnej należy duża dokładność i wiarygodność obliczeń oraz możliwość wprowadzenia tych metod do klasycznych algorytmów obliczeń sprawdzających konstrukcje. Wady polegają na konieczności przyjmowania mocnych założeń upraszczających i braku danych wejściowych dla większości obiektów mechanicznych. Znane zastosowania inżynierskie dotyczą obiektów o dobrze udokumentowanych danych o obciążeniach (np. konstrukcje stalowe [172], obiekty budowlane [17, 95], obiekty pływające [38]).

Ogólnie sformułowany problem niezawodności konstrukcyjnej dotyczy zależności między wektorem zmiennych losowych X , reprezentujących niepewne wielkości opisujące konstrukcję, i funkcją uszkodzalności $g(S, L)$, opisującą stan graniczny konstrukcji [24, 35, 38, 66, 71, 138]. Funkcja uszkodzalności jest zwykle oparta na porównaniu zbioru zmiennych opisujących ogólnie rozumianą wytrzymałość (np. granica plastyczności, wytrzymałość zmęczeniowa, dopuszczalne przemieszczenie, zużycie graniczne, wymiar krytyczny pęknięcia)

$$S = S(X) = [S_1, S_2, \dots, S_k]^T \quad (2.1)$$

i zbioru efektów obciążenia (np. naprężenie, odkształcenie, przemieszczenie, głębokość pęknięcia)

$$L = L(X) = [L_1, L_2, \dots, L_p]^T. \quad (2.2)$$

Funkcja uszkodzalności jest interpretowana tak, że

$$g(S, L) = 0 \quad (2.3)$$

oznacza powierzchnię stanu granicznego, a

$$g(L, S) < 0 \quad (2.4)$$

oznacza przekroczenie stanu granicznego, rozumiane jako uszkodzenie.

Zmienne wytrzymałości i obciążenia są, ogólnie ujmując zagadnienie, funkcjami zmiennych konstrukcyjnych. Funkcjonalna forma $S(X)$ jest zazwyczaj dana jawnie i w rzeczywistości większość zmiennych wytrzymałościowych może być wyselekcjonowana jako zmienne losowe [np. 66]. Funkcjonalna forma $L(X)$ natomiast zazwyczaj nie może być wyrażona w formie jawnej, ponieważ zależy od związku obciążenie–efekt obciążenia. Dla większości konstrukcji ta zależność może być wyrażona tylko w formie algorytmicznej [np. 36, 38].

Obszar zmiennych projektowych można więc podzielić na: obszar zdatności i obszar niezdatności. Na rysunku 2.2 przedstawiono powierzchnię stanu granicznego dwóch zmiennych X_1 i X_2 o gęstościach rozkładu prawdopodobieństwa $f_1(x_1)$ i $f_2(x_2)$. Prawdopodobieństwo uszkodzenia jest określone zależnością [36, 38]

$$P_f = P[g(L, S) \leq 0] = \int_{\Omega^*} f_x(x) dx, \quad (2.5)$$

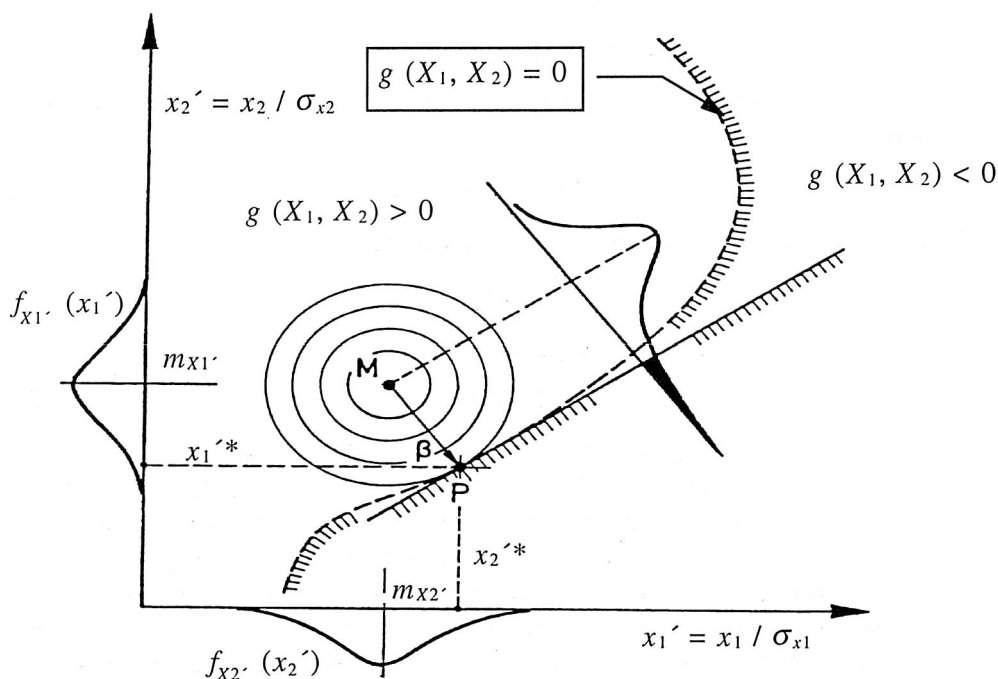
w której:

$f_x(x)$ – łączna funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennych projektowych zebranych w wektorze X ,
 Ω^* – obszar niezdatności.

Przedstawiona formuła nie uwzględnia zależności nieuszkodzalności elementu od czasu. Mimo tego uproszczenia opracowanie sposobów jej wykorzystania w pracach inżynierskich jest trudne. Obecnie prowadzi się dużo prac [36] mających umożliwić analizę niezawodności elementów podlegających degradacji, przede wszystkim zmęczeniu [49, 158].

W zastosowaniach metod niezawodności konstrukcyjnej określono [3, 95] trzy poziomy obliczeń probabilistycznych:

- poziom 1. – metody współczynnika bezpieczeństwa,
- poziom 2. – metody półprobabilistyczne,
- poziom 3. – metody probabilistyczne.



Rys. 2.2. Powierzchnia stanu granicznego dwóch zmiennych projektowych
 Fig. 2.2. The surface of boundary condition of two design variables

2.1.1. METODY POZIOMU 3.

W najlepszej dla projektanta sytuacji znane są rozkłady prawdopodobieństwa zarówno obciążenia, jak i wytrzymałości (poziom 3.). Możliwe jest ilościowe obliczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia w określonym przedziale czasu. Jeżeli:

- zmienne losowe są statystycznie niezależne i niezależne od czasu,
- analizowana jest tylko jedna zmienna projektowa,
- rozpatrywany jest jeden cykl obciążenia,

można niezawodność określić jako prawdopodobieństwo, że wytrzymałość przekracza obciążenie [172] (rys. 2.2)

$$R = P[S > L] = \int_0^{\infty} f_L(L) \left[\int_L^{\infty} f_S(S) dS \right] dL = \int_0^{\infty} f_S \left[\int_0^S f_L(L) dL \right] dS, \quad (2.6)$$

gdzie:

$f_S(S)$ – gęstość prawdopodobieństwa wytrzymałości,

$f_L(L)$ – gęstość prawdopodobieństwa obciążenia.

Jeżeli zmienna losowa $y = S - L$, to

$$R = P(y > 0) = \int_0^{\infty} f(y) dy = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_S(y+L) f_L(L) dL dy. \quad (2.7)$$

Wartość nieuszkodzalności można obliczyć kilkoma sposobami, m.in. [24]:

- analitycznie,
- przez całkowanie numeryczne,
- za pomocą transformacji Mellina,
- metodą Monte Carlo.

Wzory do obliczania prawdopodobieństwa poprawnej pracy przy różnych rodzajach rozkładów wytrzymałości i obciążenia podano m.in. w pracach [66, 95, 141, 172]. Należy podkreślić, że wynik obliczeń zależy od poprawności dopasowania wartości skrajnych funkcji gęstości prawdopodobieństwa, których dopasowanie jest mniej wiarygodne niż dopasowanie wartości centralnych. Rozwiązanie szczegółowe równań (2.6) i (2.7) przy rezygnacji z wprowadzonych założeń jest trudne, ponieważ obliczane prawdopodobieństwo uszkodzenia jest z założenia bardzo małe (10^{-3} i mniej). Gdy liczba zmiennych projektowych przekracza 4–5, całkowanie numeryczne wprowadza błędy tego samego rzędu co wynik obliczeń [12, 36]. Także metody symulacyjne (Monte Carlo) są kosztowne przy wyznaczaniu tak małych prawdopodobieństw uszkodzenia.

2.1.2. METODY POZIOMU 2.

W celu uniknięcia wspomnianych trudności, opracowano metody przybliżone umożliwiające korzystanie z niepełnych informacji o zmiennych projektowych. Założenia upraszczające dotyczą:

- transformacji zmiennych X na zbiór niezależnych standaryzowanych zmiennych normalnych,
- liniowej estymacji prawdopodobieństwa uszkodzenia P_f

$$P_f = \Phi(-\beta), \quad (2.8)$$

gdzie:

Φ – dystrybuanta standaryzowanego rozkładu normalnego,

β – najkrótsza odległość punktu pracy od powierzchni stanu granicznego w przestrzeni rozkładów normalnych (rys. 2.2).

Ze względu na linearyzację powierzchni takie metody nazywa się [36] metodami niezawodności rzędu pierwszego FOR (*First Order Reliability* – ang.).

Gdy standaryzowana przestrzeń normalna jest wypukła, wzór (2.8) reprezentuje dolną granicę prawdopodobieństwa uszkodzenia, a górna granica jest określona wzorem

$$P_f = 1 - X_n^2(\beta^2), \quad (2.9)$$

w którym X_n^2 – dystrybuanta rozkładu chi-kwadrat o n stopniach swobody.

Prawdopodobieństwo uszkodzenia jest określone przez charakterystykę bezpieczeństwa u [172]

$$u = (\bar{S} - \bar{L}) / \sqrt{(\sigma_S^2 + \sigma_L^2)}. \quad (2.10)$$

Jeżeli za współczynnik bezpieczeństwa δ przyjmie się stosunek średniej wartości wytrzymałości $\bar{S}$ do średniej wartości obciążenia $\bar{L}$ ($\delta = \bar{S}/\bar{L}$), to charakterystykę bezpieczeństwa u określa się wzorem

$$u = (\delta - 1) / \sqrt{(\delta v_s)^2 + v_L^2}; \quad u = -\bar{Y}/\sigma_Y, \quad (2.11)$$

w którym:

v_L – współczynnik zmienności obciążenia,

v_s – współczynnik zmienności wytrzymałości.

Dla różnych rodzajów rozkładów prawdopodobieństwa można współczynnik bezpieczeństwa wyrazić przez charakterystykę bezpieczeństwa [65, 172]. Jeżeli zmienne losowe są niezależne i mają rozkład normalny, to prawdopodobieństwo uszkodzenia określa się wzorem analogicznym do (2.8).

2.1.3. METODY POZIOMU 1.

Podejście tradycyjne do współczynnika bezpieczeństwa zakłada, że można wyznaczyć „najgorsze” obciążenie i określić obciążenie, pod działaniem którego konstrukcja ulegnie uszkodzeniu. Współczynnik bezpieczeństwa reprezentuje w sposób jakościowy sumę niepewności w wyznaczaniu tych wielkości. Taki sposób podejścia pozwala w prosty sposób oszacować skutki zmian wymiarów lub materiału wprowadzonych do prawidłowo zrealizowanych konstrukcji. W prognozowaniu stopnia niezawodności konstrukcji metody takie są mało efektywne lub, co gorzej, prowadzą do błędnych wniosków.

Pewnym rozwiązaniem problemu jest wprowadzenie cząstkowych współczynników bezpieczeństwa [70] ujmujących różne odchyłki od założeń projektowych:

- możliwość niekorzystnych odchyłeń obciążenia od wartości charakterystycznych,
- niepewność modelu teoretycznego obciążenia,
- możliwość niekorzystnych odchyłeń losowej wytrzymałości materiału od wartości charakterystycznych,
- niepewność parametrów geometrycznych,
- niepewność relacji między własnościami materiału w konstrukcji i wartościami pomierzonymi na próbkach lub podczas kontroli,
- skutki uszkodzenia lub zniszczenia obiektu,
- inne specyficzne przyczyny niepewności przyjętego modelu.

W zastosowaniach praktycznych stan graniczny może być wyrażony wzorem [70]

$$\gamma_n L(L_d, a_d, \gamma_{Ld}) \leq S(S_d, a_d, C, \gamma_{Sd}), \quad (2.12)$$

w którym:

γ_n – współczynnik konsekwencji zniszczenia,

L_d – obciążenie projektowe,

S_d – wytrzymałość projektowa,

a_d – rozmiary obliczeniowe,

γ_{Ld} – współczynnik określający niepewność modelu obciążenia,

γ_{Sd} – współczynnik określający niepewność modelu wytrzymałości,

C – stałe określające stan użyteczności.

2.2. METODY EKSPERCKIE {0, 1, 0, 0, 1}

Zalety metod eksperckich polegają na możliwości analizowania dowolnego obiektu lub procesu, stosunkowo niskich kosztach zatrudnienia ekspertów, w porównaniu z kosztami prowadzenia badań eksploatacyjnych, i dużym doświadczeniu w stosowaniu tych metod. Metody eksperckie opierają się na wiedzy eksperymentalnej, nabytej podczas wielokrotnego rozwiązywania problemów konstrukcyjnych z sukcesem lub porażką. Ocena przyjętego rozwiązania powstaje podczas eksploatacji maszyny. Metody eksperckie służą do przekazywania doświadczeń wynikających z zaobserwowanych w eksploatacji uszkodzeń. Stosowanie metod ekspertów jest celowe, m.in. gdy [52]:

- brak jest informacji statystycznych lub gdy ich liczba jest niewystarczająca,
- w parametrach prognostycznych, opisujących stan badanego obiektu, występują istotne zmiany, których ocena jest mało znana lub w ogóle nie jest znana,
- wyznacza się prognozy długookresowe za pomocą metod kombinowanych (stanowiących połączenie metod matematycznych i heurystycznych).

Wadami metod eksperckich jest duży rozrzut ilościowych oszacowań i mała przetwarzalność uzyskiwanych wyników oraz trudności w analizie bardziej złożonych systemów naprawialnych i relacji w systemie maszyna–człowiek–otoczenie.

Wiarygodność ocen otrzymanych za pomocą metod jakościowych, opartych w istotny sposób na informacjach uzyskanych od ekspertów, zależy od „jakości” [18, 68, 155] ekspertów indywidualnie i grupowo oraz od rodzaju metod służących do pozyskiwania, gromadzenia i przetwarzania informacji. Miarę oceny kompetencji pojedynczego eksperta w badanym zagadnieniu można określić [52] za pomocą wskaźnika obiektywnego kompetencji, generowanego macierzą zhierarchizowanych składowych cech zasadniczych eksperta, oraz wskaźnika względnej samooceny tego eksperta.

Wiarygodność wypowiedzi grupy ekspertów określa się [52] na podstawie:

- miar kompetencji ekspertów w zakresie badanego problemu,
- miar stabilności grupy charakteryzowanych przez miary rozbieżności opinii ekspertów dla poszczególnych podproblemów,
- miar zgodności opinii grupy określonych przez zgodność opinii w sensie jakościowym i ilościowym oraz współczynnikami korelacji i zgodności ocen,
- miar spójności grupy charakteryzowanych przez oceny względnej rozbieżności idei ekspertów.

W praktyce inżynierskiej stosuje się różne metody oparte na subiektywnej ocenie niezawodności maszyn [86, 101, 150, 170], m.in.:

- FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*,
- FMECA – *Failure Mode and Effects Criticality Analysis*,
- PHA – *Preliminary Hazard Analysis*,
- TTM – *Truth Table Method*,
- GFCM – *Gathered Fault Combination Method*,
- FTA – *Fault Tree Analysis* i metody pochodne: CTM – *Cause Tree Method*, CQTM – *Consequence Tree Method*, CCDM – *Cause-consequence diagram method*,
- HAZOP & HAZAN – *Hazard and Operability Study*,
- „Scenario Prediction”, „Design Checklist”.

Za najczęściej stosowaną i najbardziej efektywną metodę analizy niezawodności, a w zasadzie nieuszkodzalności, uważa się [86, 117] metody FMEA/FMECA. Analiza FMEA obejmuje [139] badanie rodzajów niezdatności, jakie mogą wystąpić w każdej części obiektu i określenie wpływu każdego rodzaju niezdatności na inne części obiektu i na wymagane funkcje obiektu. Analiza FMECA dotyczy [139] rodzajów, skutków i krytyczności niezdatności (uszkodzenia) i obejmuje analizę rodzajów niezdatności i skutków niezdatności wraz z rozważaniem prawdopodobieństwa ich wystąpienia i uszeregowaniem niezdatności według wagi niezdatności. Analiza nie zajmuje się zagadnieniem naprawialności obiektu.

Analiza FMEA składa się z czterech etapów:

1. Zdefiniowania funkcji i elementów analizowanego systemu.
2. Identyfikacji postaci i przyczyn uszkodzenia elementu.
3. Analizy skutków poszczególnych postaci uszkodzenia.

4. Sformułowania wniosków i zaleceń.

Metoda FMECA obejmuje czynności metody FMEA uzupełnione o analizę ilościową częstości pojawienia się zdarzeń, ocenę istotności skutku zdarzenia i ocenę wykrywalności zdarzenia. Rangowanie poszczególnych czynników odbywa się według 10-punktowej skali. Selekcji „słabego ogniwa” służy wskaźnik ryzyka RPN (*Risk Priority Number*) obliczany ze wzoru

$$RPN = P S D, \quad (2.13)$$

w którym:

P – liczba rangująca prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia (częstotliwość pojawiania się danej postaci uszkodzenia),

S – liczba rangująca istotność skutku dla danej postaci uszkodzenia,

D – liczba rangująca możliwość wykrycia danej postaci uszkodzenia.

Wartości rangi P z zakresu od 1 do 10 są różnie definiowane, w zależności od sposobu i celu prowadzonej analizy. Różne kryteria podziału rangi P zestawiono w tabeli 2.1 (na podstawie [90]). Kryterium może być prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia (uszkodzenia) (tab. 2.1 – kol. 2, 3), częstość pojawienia się uszkodzeń rangowana według rozrzutu wokół wartości średniej w danej próbie obiektów (tab. 2.1 – kol. 4) lub częstotliwość uszkodzeń elementu wyrażona stosunkiem liczby uszkodzeń danego elementu w ciągu jednego roku eksploatacji do łącznej liczby uszkodzeń wszystkich elementów danego obiektu (tab. 2.1 – kol. 5).

Tabela 2.1. Kryteria podziału częstości zdarzeń (na podstawie [90])

Ranga	Kryterium podziału			
	prawdopodobieństwo zdarzenia		częstość	częstotliwość
1	2	3	4	5
1		nieprawdopodobne skutek w zasadzie nie przewidywany w trakcie wykonywania zadania ($0,001 > P \geq 0$)	pomijalna nieprawdopodobne pojawienie się uszkodzenia, poniżej $x - 4\sigma$	bardzo mała poniżej 1%
2	0,0002	mało prawdopodobne mała szansa na zaistnienie skutku ($0,01 > P \geq 0,001$)	mała statystycznie możliwe pojawienie się postaci uszkodzenia, co najmniej $x - 3\sigma$	mała 1–10%
3	0,0005			
4	0,001			
5	0,002			
6	0,005	okazjonalne realna możliwość skutku ($0,1 > P \geq 0,01$)	średnia okazjonalne uszkodzenia, co najmniej na $x - 2,5\sigma$	średnia 10–20%
7	0,01	częste średnie prawdopodobieństwo skutku podczas zadania ($0,2 > P \geq 0,1$)	duża częste występowanie zdarzenia, powyżej $x - 2,5\sigma$	
8	0,02			
9	0,05	bardzo częste duże prawdopodobieństwo skutku podczas zadania ($1 > P \geq 0,2$)	bardzo duża niemal pewne pojawienie się uszkodzenia	duża ponad 20%
10	0,1			

Stosowane kryteria podziału rangi P pozwalają na wyróżnienie od 10 do 4 klas. Podział na klasy obejmuje w zasadzie obszar częstości lub prawdopodobieństwa występowania od 0 do 0,2. Zdarzenia o prawdopodobieństwie wystąpienia ponad 0,2 są uważane za pewne.

Ze względów metodycznych można wyróżnić trzy rodzaje analiz FMEA:

- analizę wyrobu o najniższym poziomie dekompozycji,
- analizę wyrobu o wyższym poziomie dekompozycji,
- analizę procesu technologicznego.

W analizie FMEA wyrobu o najniższym poziomie złożoności są rozpatrywane cechy konstrukcyjne jego elementów [169] (geometryczne, materiałowe) oraz własności fizyczne i chemiczne uzyskane w wyniku zalecanej przez konstruktora obróbki, cechy geometryczne elementów współpracujących, warunki współpracy elementów, odporność wyrobu i jego elementów na niekorzystny wpływ otoczenia). Analiza konstrukcji wyrobu o wyższym poziomie złożoności dotyczy zależności pomiędzy wyrobami o niższym poziomie dekompozycji, w tym także o najniższym poziomie dekompozycji.

Analiza jest prowadzona przez odpowiednio dobraną grupę ekspertów (m.in.: moderator, konstruktor, technolog, specjalista ds. jakości, specjalista ds. marketingu, przedstawiciel technicznej obsługi eksploatacji, użytkownik). Moderator sprawuje nadzór nad przygotowaniem, przebiegiem i dokumentowaniem analizy. Zadanie grupy roboczej polega na:

- określeniu dla każdego komponentu badanego obiektu wszystkich możliwych postaci uszkodzenia,
- przypisaniu im miar określających prawdopodobieństwo wystąpienia danego zdarzenia (tab. 2.1), znaczenie (skutek) zdarzenia i prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia,
- syntezie oszacowanych miar w celu określenia wskaźnika ryzyka, który służy do wyselekcjonowania „słabych ogniw” obiektu.

Analiza FMEA może być skuteczna, jeśli stosuje się ją w odniesieniu do systemu, w którym uszkodzenia są wynikiem uszkodzeń pojedynczych składników [13]. Podczas analizy każde uszkodzenie jest rozpatrywane jako oddzielne zdarzenie nie mające związku z innymi uszkodzeniami systemu. Analiza FMEA nie jest zatem odpowiednim środkiem analizy systemowej o sporym stopniu redundancji. Dla takich systemów lepszą metodą jest analiza drzewa zdarzeń FTA lub metoda analizy zdarzeń zależnych GFCM [170].

2.3. METODY ANALOGII STATYSTYCZNEJ {1, 1, 1, 1, 0}

Najbardziej wiarygodną ocenę niezawodności maszyn uzyskuje się z badań eksploatacyjnych niezawodności obiektów w rzeczywistych warunkach użytkowania i obsługi, tzn. ocenę rzeczywistego wpływu otoczenia systemu eksploatacji i człowieka. Metody analogii statystycznej służą do prognozowania niezawodności

analizowanego obiektu na podstawie wyników badań niezawodności innych istniejących maszyn. Możliwe jest przeniesienie oceny naprawialności obiektu, choć brak jest odpowiedniej metody postępowania, choćby takiej, jak zaproponowana dla obiektów elektronicznych w [146]. Wadą metody jest korzystanie z danych pochodzących z obiektów już eksploatowanych – danych „historycznych”. Podczas korzystania z modeli prognostycznych konieczne jest stosowanie mocnych założeń upraszczających.

W praktyce inżynierskiej stosowane są 2 grupy metod:

- metody Parts Count i Part Stress Analysis sformułowane w poradniku MIL-HDBK-217,
- modele wzrostu niezawodności.

2.3.1. MODEL INTENSYWNOŚCI USZKODZENIA ELEMENTU

Modele intensywności uszkodzeń elementów opierają się na metodzie sformułowanej dla elementów elektrycznych i elektronicznych w normie MIL-HDBK-217 [76, 117, 144]. Metoda ta służy w zasadzie do ekstrapolowania oceny nieuszkodzalności z danych bazowych warunków eksploatacji na inne warunki, a nie do prognozowania przyszłej wartości intensywności uszkodzeń. Modele biorą pod uwagę:

- podstawową postać uszkodzenia typową dla danego elementu,
- współczynniki charakteryzujące warunki eksploatacji elementu.

Eksploatacyjna intensywność uszkodzeń λ jest określona równaniem

$$\lambda = \lambda_0 \pi_E \pi_A \pi_Q \pi_n, \quad (2.14)$$

w którym:

- λ_0 – bazowa intensywność uszkodzeń, obliczana na podstawie badań niezawodności prowadzonych w normatywnych warunkach eksploatacji,
- π_E – współczynnik środowiska; uwzględnia wpływ charakterystyki środowiska w danych warunkach użytkowania,
- π_A – współczynnik adaptacji; ujmuje drugorzędne obciążenia i specyficzne warunki użytkowania mogące wpływać na intensywność uszkodzeń,
- π_Q – współczynnik jakości; uwzględnia jakość wykonania komponentu,
- π_n – dodatkowy współczynnik pozwalający na uwzględnienie innych parametrów wpływających na uszkadzalność elementu (np. liczbę cykli pracy).

Trudności i wynikające z nich ograniczenia w stosowaniu metody do elementów mechanicznych dotyczą następujących problemów [11]:

- rozkłady prawdopodobieństwa uszkodzenia elementów nie są, w zasadzie, wykładnicze,
- występuje wiele trudności w gromadzeniu danych niezawodnościowych,
- istotną przyczyną uszkodzenia może być zmęczenie materiału,
- wiele elementów mechanicznych jest projektowanych do specyficznych (nietypowych) zastosowań,
- uszkodzenia elementów mogą być zdarzeniami zależnymi.

Niektóre z problemów związanych z wnioskowaniem o niezawodności obiektów mechanicznych na podstawie danych pochodzących z badań eksploatacyjnych uwzględniono w metodzie podanej w DOD-HDBK-344 [98]. Zastosowanie modelu jest ograniczone do obiektów, które w czasie normalnej eksploatacji przepracują co najmniej kilkaset godzin do osiągnięcia stanu granicznego. Obliczane wartości dotyczą okresu po dotarciu, a przed okresem przyspieszonego zużycia.

Eksploatacyjny parametr strumienia uszkodzeń ω dla pojedynczego obiektu mechanicznego, eksploatowanego w określonych warunkach (otoczenie systemu eksploatacji), jest obliczany ze wzoru

$$\omega = \omega_0 \pi_A, \quad (2.15)$$

w którym:

ω_0 – bazowy parametr strumienia uszkodzeń [$1/10^6$ h],

π_A – współczynnik adaptacji.

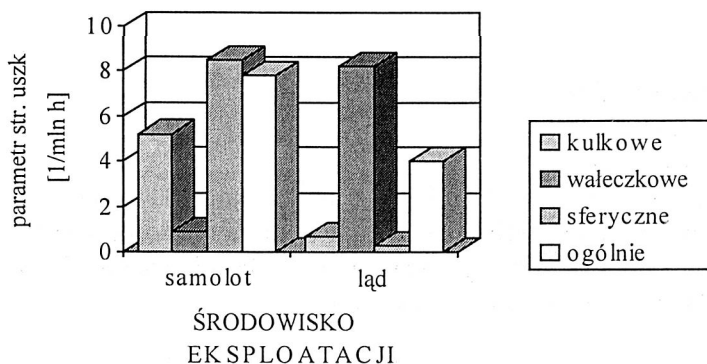
W równaniu (2.15) nie uwzględniono współczynników jakości produkcji, uważa się bowiem, że możliwe jest wykorzystanie współczynników dotyczących przechowywania elementów elektronicznych. Współczynniki warunków eksploatacji są określone dla 5 środowisk: pojazdy lądowe, statki – chronione, statki – narażone, samoloty – chronione, samoloty – narażone.

Oprócz punktowej estymacji wartości średniej parametru strumienia uszkodzeń oszacowano 60% przedziały (test chi-kwadrat). Dla elementów, które nie uszkodziły się w trakcie badań, a których czas pracy przekroczył 50 000 godzin, oszacowano 60% górny przedział ufności wartości średniej parametru strumienia uszkodzeń. Jednorodność danych pochodzących z różnych źródeł informacji badano testem F Snedecora. Jeżeli nie było podstaw do odrzucenia hipotezy o jednorodności danych, zbiory danych zostały połączone. Jeżeli różnice były istotne, podano współczynniki oszacowane dla zbioru o najdłuższym łącznym czasie badań.

Struktura bazy wiedzy zawiera następujące elementy:

- nazwę klasy, do której należy element (np. urządzenie mechaniczne),
- typ elementu (podsystemu, np. sprzęgło, przekładnia, wał przekładni),
- środowisko; 10 rodzajów (np. samolot transportowy, przechowywanie, laboratorium),
- kod użytkownika (wojsko, przemysł (handel), nieznan),
- średni parametr strumienia uszkodzeń [$1/10^6$ h],
- 60% górny przedział ufności parametru oszacowany dla nieuszkodzonych elementów,
- 60% górny i dolny przedział ufności parametru,
- ilość danych wykorzystanych do estymacji parametru,
- łączna ilość uszkodzeń zawartych w wykorzystanych rekordach,
- całkowity czas pracy obserwowanych elementów [10^6 h].

Przykład informacji dotyczącej łożysk dostępnej w bazie wiedzy pokazano na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Średnie wartości parametru strumienia uszkodzeń łożysk

Fig. 2.3. Mean values of failure rate of a bearing

Omawiane „numeryczne” podejście do prognozowania niezawodności obiektu mechanicznego jest obciążone istotnymi wadami [116], m.in.:

- zjawisko uszkodzenia jest wynikiem oddziaływania wielu fizycznych i ludzkich procesów i ich interakcji, których modele nie uwzględniają,
- opracowanie zbioru odpowiednich współczynników jest czasochłonne i kosztowne, a uzyskane rezultaty są kontrowersyjne,
- dobór współczynników ma większy wpływ na końcowy rezultat obliczeń niż bazowa intensywność uszkodzeń.

2.3.2. MATEMATYCZNE MODELE WZROSTU NIEZAWODNOŚCI

Modele wzrostu niezawodności dotyczą nieuszkodzalności obiektu i opisują poprawę wartości wskaźników niezawodności w funkcji skumulowanego czasu poprawnej pracy [137].

Pierwszym historycznie modelem wzrostu niezawodności jest model zaproponowany przez Duane’a, w którym skumulowana intensywność uszkodzeń nowego obiektu jest odwrotnie proporcjonalna do czasu eksploatacji obiektu podniesionego do potęgi mniejszej niż jeden [65]

$$\Lambda(t) = \lambda_1 t^{-m}, \quad (2.16)$$

gdzie:

λ_1 – zakładana intensywność uszkodzeń pierwszego obiektu,

m – wykładnik potęgi.

Stosowane obecnie monotoniczne modele wzrostu (Weibulla, wykładniczy, logarytmiczny) należą najczęściej [65] do rodziny modeli gamma, których funkcja gęstości jest określona wzorem

$$f(t) = \frac{\beta^\delta t^{\delta-1}}{\Gamma(\delta)} \exp(-\beta t), \quad (2.17)$$

w którym:

t – czas,
 δ – parametr kształtu,
 β – parametr skali,
 $\Gamma(\delta)$ – funkcja gamma.

Modele graniczne (np. model Lloyda-Lipowa, model Gompertza) opierają się na założeniu, że obiekt ma właściwą sobie granicę niezawodności, wynikającą z nieusuwalnych przyczyn, którą osiąga po nieskończonej liczbie usprawnień lub modernizacji. Niezawodność j -tego modelu obiektu wynosi

$$R_j = R_{\inf} - \alpha f(j); \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.18)$$

gdzie:

$R_{\inf}$ – graniczna niezawodność obiektu,
 α – parametr modyfikacji wzrostu,
 $f(j)$ – funkcja j o dodatniej pierwszej pochodnej względem j i ujemnej odpowiedniej drugiej pochodnej (np. $1/j$ lub $\exp(-\beta t)$).

Omówione modele są monotoniczne, co w rzeczywistości jest dość optymistycznym założeniem. Można przyjąć (np. model Box-Jenkinsa), że niezawodność rośnie w dłuższym okresie, ale chwilowe wahania zmieniają ten trend.

3. ZAŁOŻENIA METODYKI PROGNOZOWANIA NIEZAWODNOŚCI OBIEKTÓW MECHANICZNYCH

Rezultaty dotychczas stosowanych metod prognozowania niezawodności (omówione w rozdz. 2.) są sformułowane w postaci uporządkowanej trójki

$$\langle o, a, v \rangle = \langle \text{OBIEKT, NAZWA ATRYBUTU, WARTOŚĆ ATRYBUTU} \rangle, \quad (3.1)$$

a więc bez uwzględniania niepewności danego stwierdzenia.

Istota omawianej metodyki polega na uzupełnieniu oceny lub prognozy niezawodności o odpowiadający jej współczynnik pewności *cf*

$$\begin{aligned} \langle o, a, v, cf \rangle = \\ = \langle \text{OBIEKT, NAZWA ATRYBUTU, WARTOŚĆ ATRYBUTU,} \\ \text{WSPÓŁCZYNNIK PEWNOŚCI} \rangle \end{aligned} \quad (3.2)$$

oraz syntezie informacji na podstawie przetwarzania wartości miary *cf*. Wynikiem prognozowania są wskaźniki niezawodności o najlepszej charakterystyce pewności informacji.

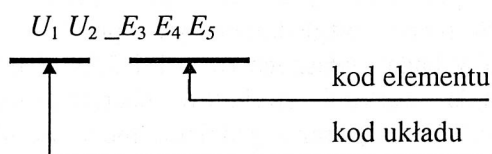
Pierwsze dwa elementy stwierdzenia (3.1) (OBIEKT, NAZWA ATRYBUTU) są dokładnie omówione w podstawowej literaturze poświęconej teorii i inżynierii niezawodności, np. [62]. W pracy uwzględniono tylko problemy charakterystyczne dla analizowanych wyników badań własnych (p. 3.1 i 3.2). Więcej uwagi poświęcono problematyce określania wartości atrybutów charakteryzujących niezawodność obiektów mechanicznych (p. 3.3) oraz zagadnieniu modelowania charakterystyk pewności miar niezawodności obiektów (p. 3.4).

3.1. OBIEKT

W zrealizowanych badaniach niezawodności wyróżniano od 2 do 4 poziomów dekompozycji obiektu mechanicznego (tab. 3.1). Nazwa obiektu uwzględnia przyjęty w badaniach sposób dekompozycji obiektu. Początkowo stosowano nazwę – kod dwuczłonowy pięciocyfrowy (rys. 3.1). W projektowanych później systemach informacyjnych badań eksploatacyjnych zrezygnowano z nazw kodowanych; rozwój mikrokomputerów umożliwił korzystanie z pełnych określeń w języku technicznym na dowolnym poziomie dekompozycji maszyny.

Tabela 3.1. Poziomy dekompozycji badanych obiektów mechanicznych

Obiekt badań	Liczba poziomów dekompozycji	Wyróżnione poziomy dekompozycji
1	2	3
Autobus miejski Jelcz PR 110U	3	autobus, układ, element
Autobus międzymiastowy Sanos	2	pojazd, zespół (element)
Samochód ciężarowy Kamaz	2	pojazd, zespół (element)
Samochód ciężarowy Skoda	2	pojazd, zespół (element)
Samochód ciężarowy Fiat	2	pojazd, zespół (element)
Śródlądowa barka pchana BP-500	2	barka, element
Ładowarka budowlana Ł-220	3	ładownica, układ, element
Koparka wielonaczyniowa SRS-2000	4 (7)	koparka, układ, zespół, podzespół
Koparka wielonaczyniowa SchRs-1200	2	koparka, element
Koparka wielonaczyniowa SchRs-800	2	koparka, element

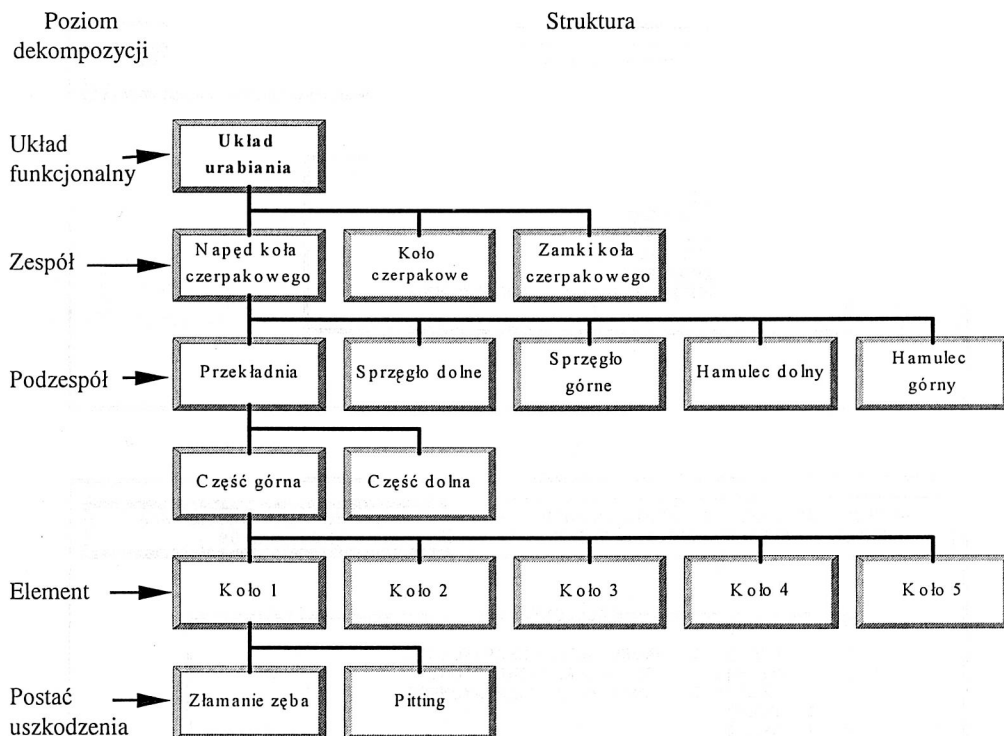


Rys. 3.1. Schemat kodowania ocenianego komponentu obiektu

Fig. 3.1. Diagram of coding of the object component being evaluated

Na rysunku 3.2 pokazano fragment drzewa dekompozycji układu urabiania koparki wielonaczyniowej. Ze względu na szczegółową analizę niezawodności przekładni koła czerpakowego [61] wyróżniono 7 poziomów dekompozycji, aż do postaci uszkodzenia koła zębatego.

Przykład komputerowych ekranów rozwijanego menu służącego identyfikacji elementów koparki wielonaczyniowej – układu funkcjonalnego koparki, zespołu i podzespołu przedstawiono na rysunku 3.3.



Rys. 3.2. Fragment drzewa dekompozycji układu urabiania koparki wielonaczyniowej
 Fig. 3.2. Fragment of the decomposition tree of mining system of bucket wheel excavator

Założono, że metodyka prognozowania niezawodności nie uwzględnia relacji zachodzących między poszczególnymi poziomami dekompozycji systemu. Wnioskowanie jest prowadzone na danym poziomie dekompozycji, a więc system i jego podsystemy są traktowane jako niepodzielne elementy. Wyniki wnioskowania o niezawodności systemu są niezależne od wyników wnioskowania o niezawodności odpowiednich podsystemów i elementów.

3.2. NAZWA ATRYBUTU

Zbiór atrybutów obejmuje wskaźniki i charakterystyki niezawodności maszyny. Znormalizowany zbiór miar niezawodności i zasady wyboru wskaźników ocenowych [142] nie odpowiada wymaganiom stawianym przy systematyzacji ocen niezawodności obiektów mechanicznych.

Możliwości otrzymania różnych charakterystyk niezawodności przedstawiono schematycznie na rysunku 3.4. Zastosowano 3-stopniową klasyfikację charakterystyk niezawodności [96], biorąc pod uwagę:

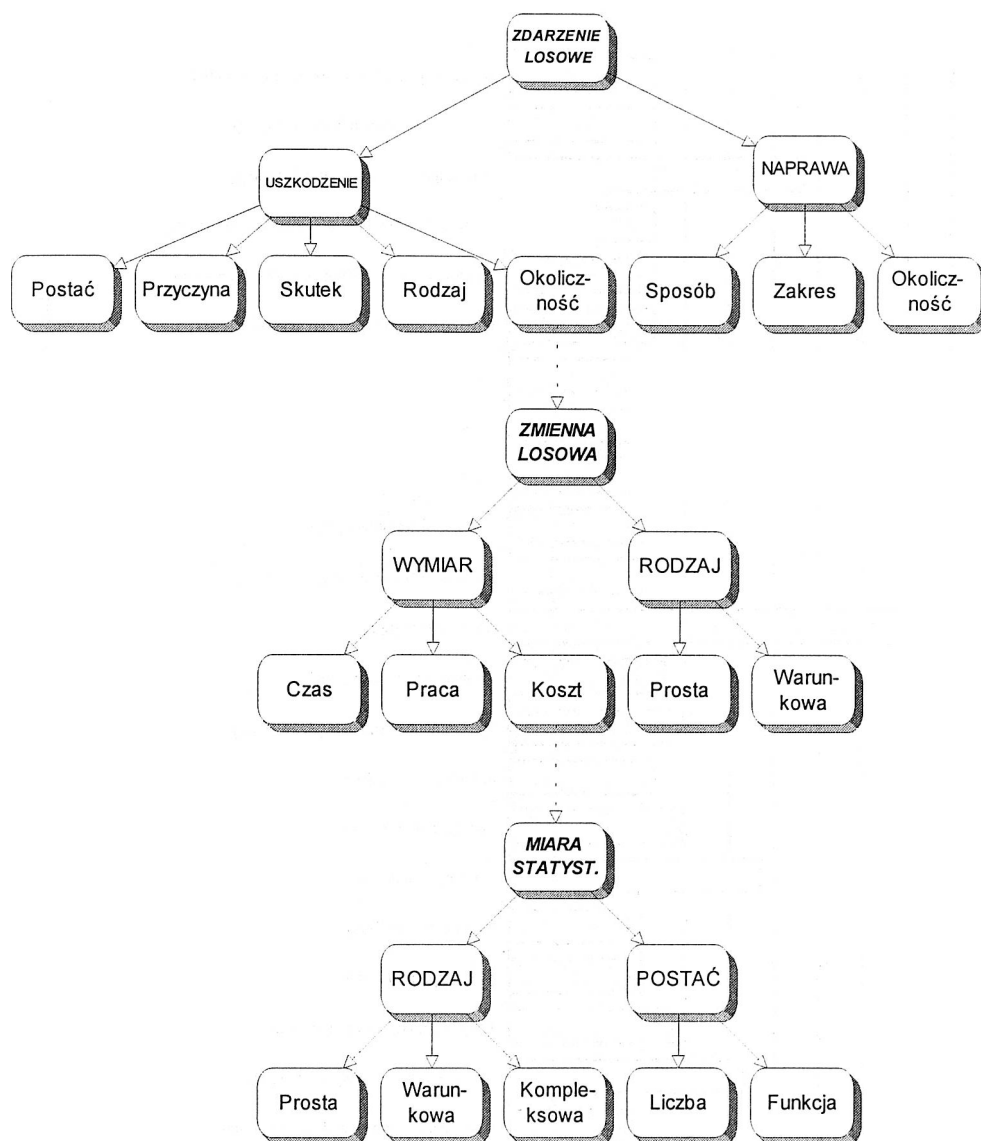
SYSTEM ZBIERANIA I PRZETWARZANIA DANYCH O NIEZAWODNOSCI KOPAREK	POLITECHNIKA WROCLAWSKA IKEM - 1989												
 UKLAD 													
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 5%;">1</td><td>PODWOZIE</td></tr> <tr><td>2</td><td>MECHANIZM OBROTU</td></tr> <tr><td>3</td><td>UKLAD URABIANIA</td></tr> <tr><td>4</td><td>TRANSPORT UROBKU</td></tr> <tr><td>5</td><td>UKLAD ZWODZENIA</td></tr> <tr><td>6</td><td>URZADZENIA DZWIGOWE I PODDOZOROWE</td></tr> </table>		1	PODWOZIE	2	MECHANIZM OBROTU	3	UKLAD URABIANIA	4	TRANSPORT UROBKU	5	UKLAD ZWODZENIA	6	URZADZENIA DZWIGOWE I PODDOZOROWE
1	PODWOZIE												
2	MECHANIZM OBROTU												
3	UKLAD URABIANIA												
4	TRANSPORT UROBKU												
5	UKLAD ZWODZENIA												
6	URZADZENIA DZWIGOWE I PODDOZOROWE												

SYSTEM ZBIERANIA I PRZETWARZANIA DANYCH O NIEZAWODNOSCI KOPAREK	POLITECHNIKA WROCLAWSKA IKEM - 1989																		
 ZESPOL 																			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 5%;">1</td><td>PODW</td></tr> <tr><td>2</td><td>MECH</td></tr> <tr><td>3</td><td>UKLA</td></tr> <tr><td>4</td><td>TRAN</td></tr> <tr><td>5</td><td>UKLA</td></tr> <tr><td>6</td><td>URZA</td></tr> </table>	1	PODW	2	MECH	3	UKLA	4	TRAN	5	UKLA	6	URZA	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 5%;">1</td><td>NAPED KOLA CZERPAKOWEGO</td></tr> <tr><td>2</td><td>KOLO CZERPAKOWE Z OSIA</td></tr> <tr><td>3</td><td>ZAMEK KOLA CZERPAKOWEGO</td></tr> </table>	1	NAPED KOLA CZERPAKOWEGO	2	KOLO CZERPAKOWE Z OSIA	3	ZAMEK KOLA CZERPAKOWEGO
1	PODW																		
2	MECH																		
3	UKLA																		
4	TRAN																		
5	UKLA																		
6	URZA																		
1	NAPED KOLA CZERPAKOWEGO																		
2	KOLO CZERPAKOWE Z OSIA																		
3	ZAMEK KOLA CZERPAKOWEGO																		

SYSTEM ZBIERANIA I PRZETWARZANIA DANYCH O NIEZAWODNOSCI KOPAREK	POLITECHNIKA WROCLAWSKA IKEM - 1989																		
 PODZESPOL 																			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 5%;">1</td><td>PODW</td></tr> <tr><td>2</td><td>MECH</td></tr> <tr><td>3</td><td>UKLA</td></tr> <tr><td>4</td><td>TRAN</td></tr> <tr><td>5</td><td>UKLA</td></tr> <tr><td>6</td><td>URZA</td></tr> </table>	1	PODW	2	MECH	3	UKLA	4	TRAN	5	UKLA	6	URZA	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 5%;">1</td><td>NAPE</td></tr> <tr><td>2</td><td>KOLO</td></tr> <tr><td>3</td><td>ZAME</td></tr> </table>	1	NAPE	2	KOLO	3	ZAME
1	PODW																		
2	MECH																		
3	UKLA																		
4	TRAN																		
5	UKLA																		
6	URZA																		
1	NAPE																		
2	KOLO																		
3	ZAME																		
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 5%;">1</td><td>PRZEKLADNIA</td></tr> <tr><td>2</td><td>SPRZEGLO PRZECIAZENIOWE DOLNE 400 (710)</td></tr> <tr><td>3</td><td>SPRZEGLO PRZECIAZENIOWE GORNE 400 (710)</td></tr> <tr><td>4</td><td>ZAWIESZENIE TYLNE PRZEKLADNI</td></tr> <tr><td>5</td><td>SILNIK GORNY</td></tr> <tr><td>6</td><td>SILNIK DOLNY</td></tr> </table>		1	PRZEKLADNIA	2	SPRZEGLO PRZECIAZENIOWE DOLNE 400 (710)	3	SPRZEGLO PRZECIAZENIOWE GORNE 400 (710)	4	ZAWIESZENIE TYLNE PRZEKLADNI	5	SILNIK GORNY	6	SILNIK DOLNY						
1	PRZEKLADNIA																		
2	SPRZEGLO PRZECIAZENIOWE DOLNE 400 (710)																		
3	SPRZEGLO PRZECIAZENIOWE GORNE 400 (710)																		
4	ZAWIESZENIE TYLNE PRZEKLADNI																		
5	SILNIK GORNY																		
6	SILNIK DOLNY																		

Rys. 3.3. Przykład ekranów programu SNK wspomagającego identyfikację elementów koparki SRs-2000

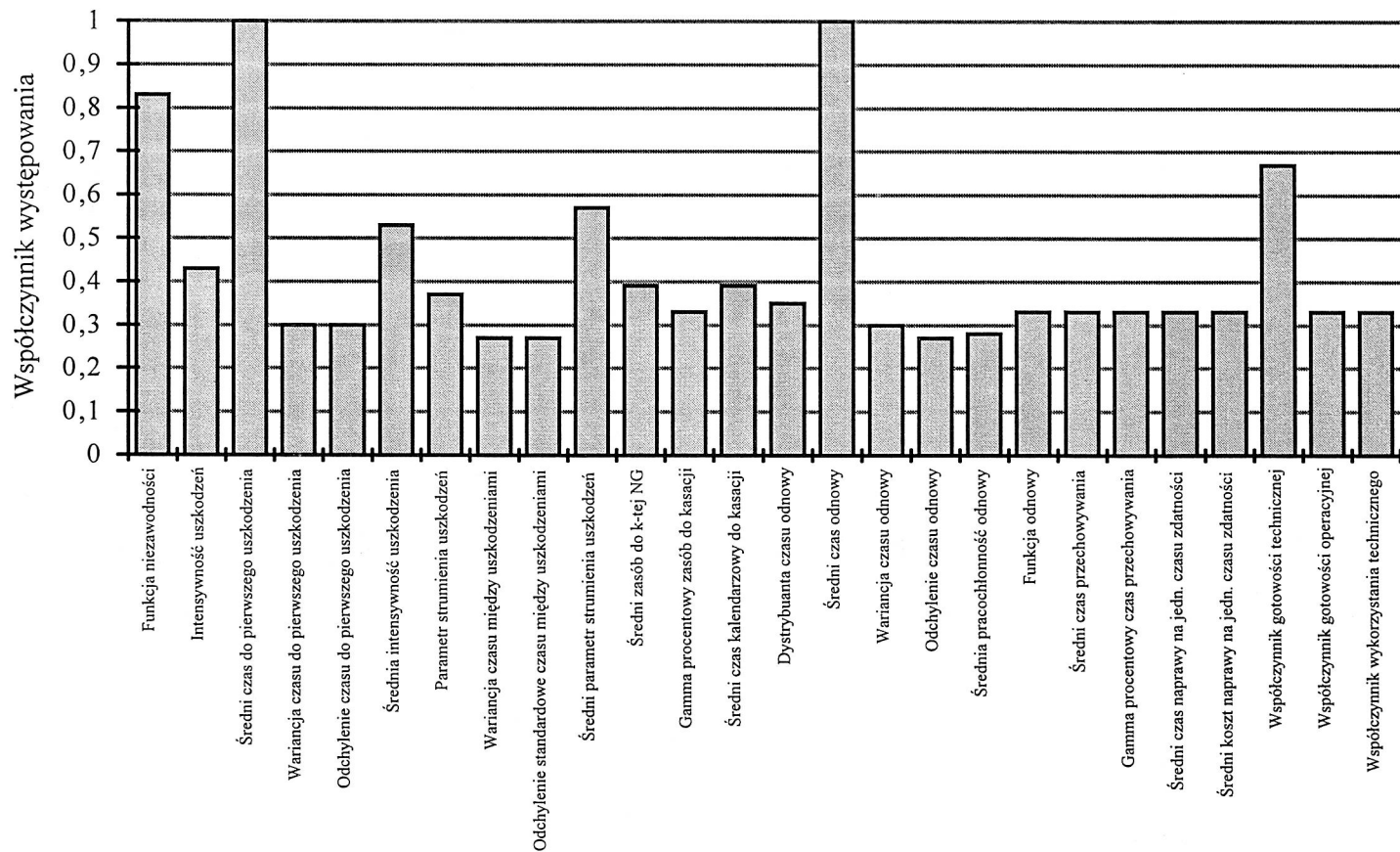
Fig. 3.3. Example of screens of the SNK programme assisting in identification of the SRs-2000 excavator elements



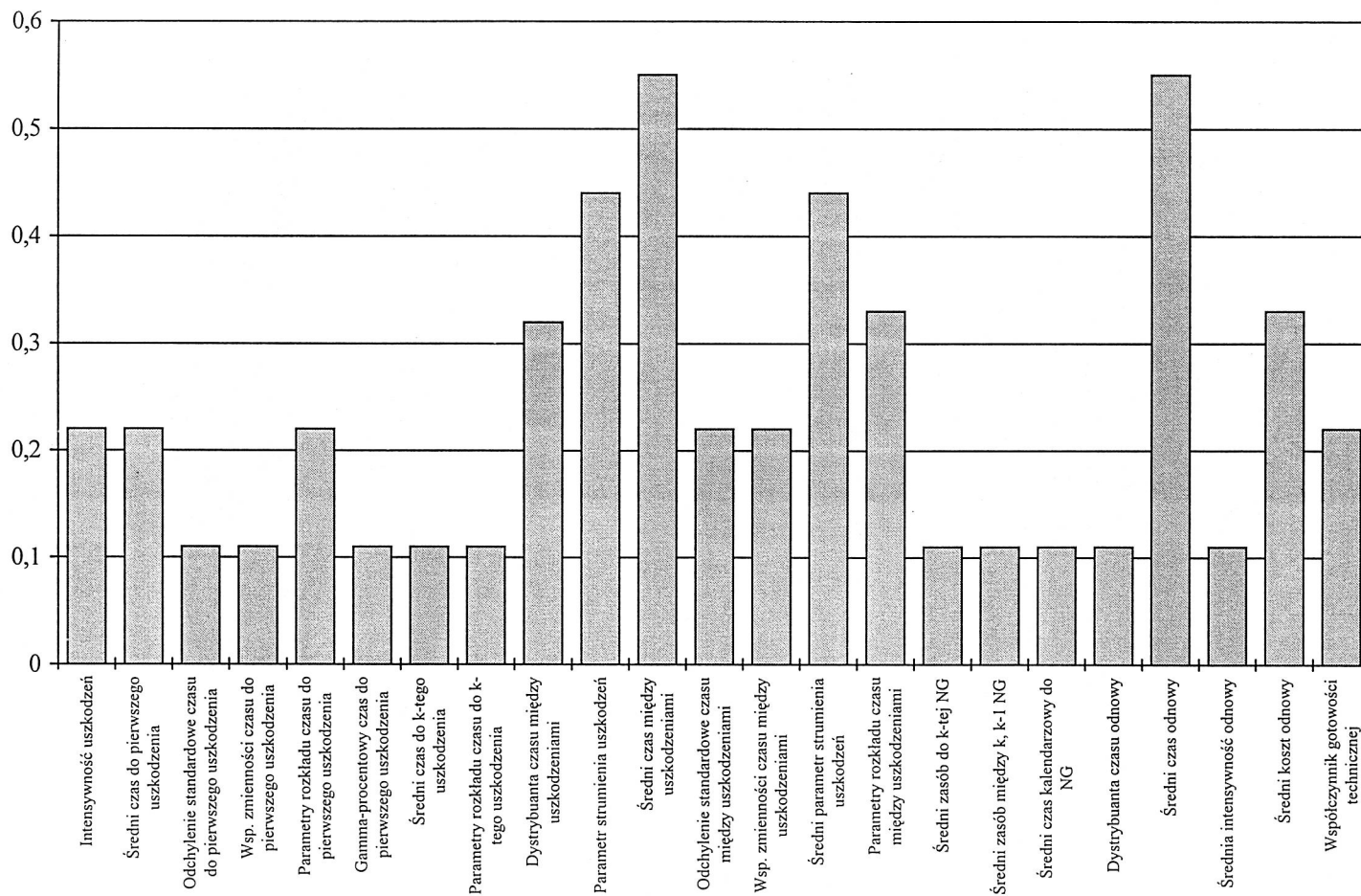
Rys. 3.4. Klasyfikacja miar niezawodności maszyn
 Fig. 3.4. Classification of reliability measures of machines

- identyfikację zdarzenia losowego opisującego niezawodność obiektu,
- opis zmiennej losowej charakteryzującej zdarzenie,
- oszacowanie miary statystycznej zmiennej losowej.

Teoretycznie można więc z informacji zgromadzonych w badaniach niezawodności otrzymać ponad 3000 różnych charakterystyk niezawodności. Przeglądu charakterystyk niezawodności dokonano [57] w celu określenia maksymalnego zbioru charakterystyk



Rys. 3.5. Najczęściej występujące charakterystyki niezawodności obiektów mechanicznych
 Fig. 3.5. Reliability characteristics most often applied



Rys. 3.6. Częstość korzystania z charakterystyk niezawodności

Fig. 3.6. Frequency of using the reliability characteristics

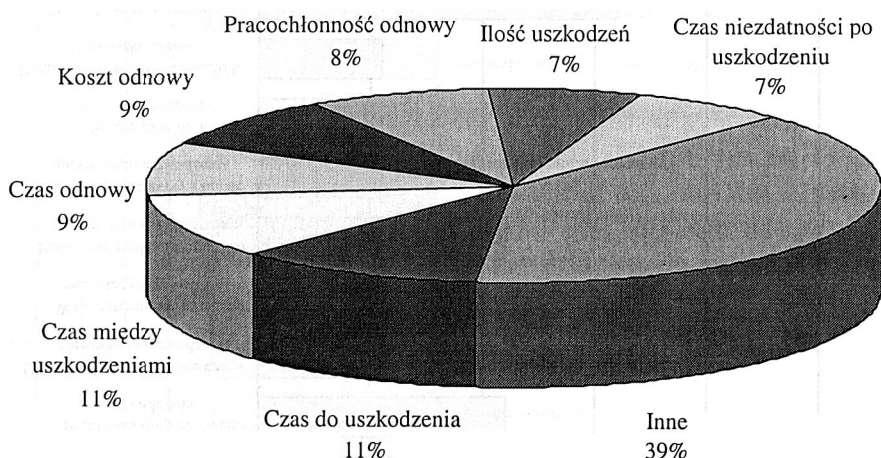
szacowanych w badaniach obiektów mechanicznych w Polsce oraz objętych normami PN, CEB, TGL. Analiza charakterystyk niezawodności pozwoliła na wyróżnienie ponad 70 różnych charakterystyk. Zebrane charakterystyki uporządkowano według malejącej wartości współczynnika występowania k_s i przedstawiono na rysunku 3.5.

Wartości współczynnika k_s odpowiadają względnej częstości występowania danej charakterystyki niezawodności w analizowanym zbiorze źródłowym. Wartość $k_s = 1$ oznacza, że dana charakterystyka jest szacowana we wszystkich badaniach. Wartością $k_s = 1$ charakteryzują się: średni czas zdatności do pierwszego uszkodzenia, średni czas zdatności między uszkodzeniami i średni czas odnowy.

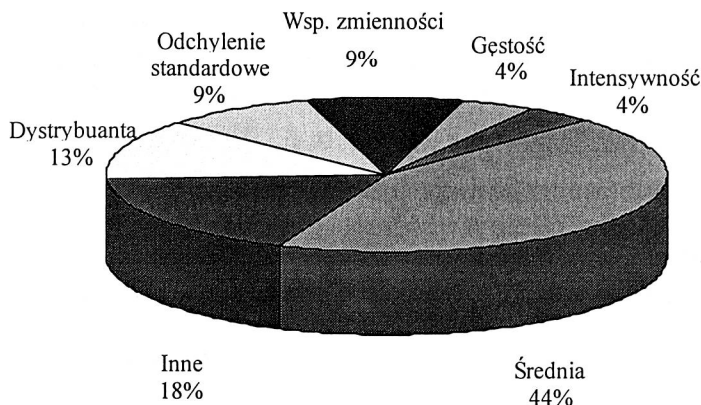
Ze wskaźników niezawodności korzysta się przede wszystkim w zagadnieniach związanych ze wzrostem efektywności eksploatacji obiektu i podniesieniem jego niezawodności przez modernizację konstrukcji. Na przykładzie badań niezawodności autobusu miejskiego przeanalizowano [57] zakres korzystania z poszczególnych wskaźników niezawodności do realizacji szczegółowych celów badań niezawodności.

Na rysunku 3.6 przedstawiono wartości współczynnika wykorzystania k_k obliczonego dla poszczególnych wskaźników niezawodności. Współczynnik k_k określa częstość korzystania z danego wskaźnika podczas opracowania danych z badań niezawodności obiektu.

Do najczęściej wykorzystywanych (spośród 17 analizowanych) zmiennych losowych należą (rys. 3.7): czas zdatności do i między uszkodzeniami oraz czas i koszt odnowy. Najczęściej wykorzystywaną miarą charakterystyki niezawodności (rys. 3.8) jest wartość średnia.



Rys. 3.7. Najczęściej wykorzystywane zmienne losowe służące do oceny niezawodności maszyny
Fig. 3.7. Random variables most often applied in reliability evaluation



Rys. 3.8. Najczęściej wykorzystywane miary statystyczne charakterystyk niezawodności
 Fig. 3.8. Statistical measures of reliability characteristics most often applied

3.3. WARTOŚCI ATRYBUTÓW

Charakterystyki niezawodności analizowano w celu określenia zbioru wartości atrybutów ujętych w formule (3.2). Zgodnie z definicjami niezawodności (rozdz. 1.), charakterystyki nieuszkodzalności i naprawialności są funkcjami:

- ogólnie rozumianego czasu eksploatacji obiektu (m.in.: czasu kalendarzowego, ilości wykonanej pracy, liczby zdarzeń),
- zbioru czynników charakteryzujących wymuszenia otoczenia systemu eksploatacji (warunków użytkowania i obsługi),
- zbiór wymagań dla cech obiektu, których spełnienie jest warunkiem koniecznym i wystarczającym poprawnego funkcjonowania obiektu (parametrów definiujących stan niezawodnościowy obiektu).

Przy szacowaniu charakterystyk niezawodności obiektu zakłada się, że poszczególne grupy czynników wpływających na niezawodność są niezależne i analizuje się ich wpływ oddzielnie. Ponadto przyjmuje się, że warunki eksploatacji oraz wymagania definiujące uszkodzenie są ustalone i analizuje się wyłącznie wpływ czasu na niezawodność obiektu. Oddziaływanie otoczenia na niezawodność maszyny wymaga znacznie większej ilości zgromadzonych danych i stosunkowo rzadko jest przedmiotem analizy. Nie był natomiast dotychczas rozpatrywany problem wpływu wymagań definiujących stan zdadności obiektu na rezultat oceny niezawodności.

3.3.1. WPLYW CZASU EKSPLOATACJI NA WARTOŚCI CHARAKTERYSTYK NIEZAWODNOŚCI

Estymacja rozkładu prawdopodobieństwa metodami statystycznymi wymaga dużej liczby doświadczeń. Doświadczenia te prowadzi się zawsze w ograniczonym

przedziale czasu. W zasadzie nie można [159] nic powiedzieć o niezawodności elementu poza granicami tego przedziału. Natomiast, gdy postać funkcji niezawodności jest znana z dokładnością do jednego lub kilku nieznanymi parametrów

$$F(t) = F(t, \alpha, \beta, \dots), \quad (3.9)$$

estymacja tych parametrów wymaga znacznie mniejszej liczby doświadczeń, a oszacowana funkcja dotyczy całego nieskończonego przedziału czasu.

Postać funkcji losowej można wyznaczyć dwoma sposobami:

- statystycznie – sprawdzając hipotezę o przynależności rozkładu do danej rodziny rozkładów,
- fizycznie – budując fizyczny model uszkodzeń i badając go metodami matematycznymi.

3.3.1.1. METODY STATYSTYCZNE

Metody statystyczne weryfikują hipotezę o przynależności rozkładu do danej rodziny rozkładów w danym przedziale czasu, co nie oznacza, że postać rozkładu zachowa się poza granicami tego przedziału czasu (z upływem czasu mogą wyniknąć nowe fizyczne czynniki mające wpływ na niezawodność). Rozkłady prawdopodobieństwa używane jako modele matematyczne rozkładów czasów poprawnej pracy są klasyfikowane ze względu na [10, 65, 95, 142]:

- typ rozkładu prawdopodobieństwa,
- charakter przebiegu funkcji intensywności uszkodzeń.

Ze względu na typ rozkładu prawdopodobieństwa można wyróżnić:

- grupę rozkładów związanych z uogólnionym rozkładem gamma o dystrybucjach:

$$\begin{aligned} F(t) &= \Gamma[p, (t/\delta)^v] / \Gamma(p), & v > 0, \\ F(t) &= 1 - \Gamma[p, (t/\delta)^v] / \Gamma(p), & v < 0, \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$(t > 0, \delta > 0, p > 0, v \neq 0),$$

gdzie:

$\Gamma[p, (t/\delta)^v]$ – niepełna funkcja gamma,
 $\Gamma(p)$ – funkcja gamma;

do tej rodziny należą m.in.: rozkład wykładniczy, Weibulla, Erlanga;

- grupę rozkładów związanych z rozkładem normalnym o dystrybucjach określonej wzorem

$$F(t) = c + g\Phi[a(t)], \quad c > 0, g > 0, \quad (3.11)$$

w którym:

$a(t)$ – ciągła funkcja rzeczywista spełniająca warunek $-\infty < a(t) < \infty$,

$\Phi(t)$ – całka Laplace'a;

• grupę rozkładów wartości ekstremalnych, w szczególności I rodzaju (Gambela) o dystrybucie

$$F(t) = \exp(-e^{-\xi}) \quad (3.12)$$

dla rozkładu wartości największych i

$$F(t) = 1 - \exp(-e^{\xi}) \quad (3.13)$$

dla rozkładu wartości najmniejszych,

gdzie ξ – zmienna standaryzowana;

- grupę dodatkowych prostych rozkładów zmiennych losowych, m.in.:
– rozkład potęgowy o dystrybucie

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ (t/b)^{\delta}, & 0 < t < b \\ 1, & t \geq b \end{cases} \quad (3.14)$$

dla parametru kształtu $\delta = 1$ jest to rozkład równomierny,

– rozkład beta określony w przedziale (a, b) :

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{B(p, q)} \frac{(t-a)^{p-1} (b-t)^{q-1}}{(b-a)^{p+q-1}}, & a < t < b \\ 0, & t \leq a, t \geq b \end{cases}, \quad (3.15)$$

przy czym $B(p, q)$ jest funkcją beta Eulera,

których użyteczność wynika z ich zdolności do wygodnej reprezentacji zmiennych losowych ograniczonych z góry i dołu pewnymi wartościami;

- grupę rozkładów modyfikowanych przez:
 - przekształcenia funkcyjne, np. rozkłady z przesunięciem,
 - modyfikacje końców rozkładu, np. rozkłady ucięte lub cenzurowane,
 - złożenie z innym rozkładem prawdopodobieństwa, np. traktowanie parametrów danego rozkładu jako zmiennych losowych,
 - superpozycje kilku rozkładów;
- rozkłady złożone przedziałami z kilku rozkładów prawdopodobieństwa.

Klasyfikacja rozkładów czasu poprawnej pracy zależnie od charakteru zmian funkcji intensywności uszkodzeń wyróżnia [142]:

- rozkłady o funkcji $\lambda(t)$ niezależnej od czasu ($\lambda(t) = \lambda = \text{const}$),
- rozkłady, dla których $\lambda(t)$ jest monotonicznie malejąca,
- rozkłady, dla których $\lambda(t)$ jest monotonicznie rosnąca,
- rozkłady, dla których $\lambda(t)$ ma jedno minimum,
- rozkłady, dla których $\lambda(t)$ ma jedno maksimum.

Duże znaczenie, zwłaszcza w przybliżonych (eksperymentalnych) metodach oceny niezawodności obiektu technicznego, ma klasa rozkładów czasu pracy obiektów sta-

rzejących się. Do najważniejszych klas tego typu rozkładów należą [65, 143]:

- klasa IFR (rosnąca intensywność uszkodzeń) zawierająca rozkłady $F(t)$, których warunkowa funkcja niezawodności $R(x|t)$ jest nierosnącą funkcją argumentu t ,

- klasa IFRA (rosnąca średnia intensywność uszkodzeń) zawierająca rozkłady $F(t)$, których średnia intensywność uszkodzeń $\frac{1}{t} \int_0^t \lambda(u) du = \frac{1}{t} A(t)$ jest niemalejąca względem t ,

- klasa DMRL (malejący średni resztkowy czas pracy) zawierająca rozkłady $F(t)$, których wartość oczekiwana resztkowego czasu pracy $\bar{T}(t)$ jest nierosnącą funkcją zmiennej t ,

- klasa NBU (nowe lepsze niż używane) zawierająca rozkłady $F(t)$, których warunkowa funkcja niezawodności jest nie większa niż funkcja niezawodności

$$R(x|t) \leq R(x) \text{ dla dowolnych } t, x \geq 0, \quad (3.16)$$

- klasa NBUE (nowe lepsze od używanego w sensie średnich) zawierająca rozkłady $F(t)$, których wartość oczekiwana resztkowego czasu pracy $\bar{T}(t)$ jest nie większa niż średni czas pracy $\bar{T}$.

Między wymienionymi klasami zachodzą relacje zawierania się:

$$IFR \subset IFRA \subset NBU \subset NBUE, \quad IFR \subset DMRL \subset NBUE. \quad (3.17)$$

3.3.1.2. METODY FIZYCZNE

Podejście fizyczne wymaga obszernej i głębokiej informacji o fizycznej naturze uszkodzeń, a więc danych, które najczęściej są nieznane. Rozpatrując [10, 54, 80, 143, 160] procesy fizyczne zachodzące w elementach podczas eksploatacji, wyróżnia się następujące modele uszkodzeń:

- uszkodzenia spowodowane impulsowym działaniem obciążenia (uszkodzenia katastroficzne, nagłe),

- uszkodzenia spowodowane kumulacyjnym działaniem obciążenia (uszkodzenia stopniowe, parametryczne starzeniowe, zużyciowe),

- uszkodzenia spowodowane relaksacyjnym działaniem obciążenia.

Impulsowe działanie obciążeń powoduje uszkodzenie nagłe wówczas, gdy wartość chwilowego obciążenia przekroczy chwilową wytrzymałość materiału. Ponieważ zmiany obciążenia są zmiennymi losowymi, więc chwila powstania uszkodzenia też jest losowa. Jeżeli wytrzymałość elementu nie ulega zmianie w czasie eksploatacji, to uszkodzenia spowodowane takim oddziaływaniem obciążeń są niezależne od czasu eksploatacji obiektu, a więc od jego stanu fizycznego.

Kumulacyjne działanie obciążeń powoduje uszkodzenie w wyniku stopniowego zużywania się lub starzenia elementu. Poprawna praca obiektu wymaga, aby wartości

cech mierzalnych (parametrów) i niemierzalnych określających jego stan fizyczny mieściły się w określonych granicach. Procesy zachodzące w trakcie eksploatacji powodują zmiany (pogarszanie się) cech. Osiągnięcie przez wartości cech mierzalnych wartości dopuszczalnych jest równoznaczne z wystąpieniem uszkodzenia.

Relaksacyjne działanie obciążenia jest przyczyną uszkodzeń, których prawdopodobieństwo pojawienia wzrasta w miarę starzenia się obiektu. Kumulacyjne działanie obciążeń sprzyja powstaniu uszkodzenia, które jednak jest wywołane nie przekroczeniem dopuszczalnej wartości cech charakteryzujących stan fizyczny, lecz pojawieniem się innego czynnika (np. skokowego) powodującego uszkodzenie. Ten model łączy w sobie, w pewnym sensie, model powstawania niezdatności spowodowanych obciążeniami skokowymi i model opisujący kumulacyjne działanie obciążenia.

Poszczególnym modelom przypisuje się odpowiadające rozkłady prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy (m.in. [54, 80]).

Podczas eksploatacji elementu jego uszkodzenie może być wynikiem wszystkich sposobów oddziaływania obciążenia. Jeżeli obciążenia są niezależne, próbuje się wyodrębnić dominujący sposób powstawania niezdatności i w sposób przybliżony opisać model uszkodzenia obiektu.

Problemy modelowania naprawialności są analizowane znacznie rzadziej niż zagadnienia utraty zdatności. W pracy [72] proponuje się wykorzystanie rozkładu trójkątnego do modelowania czasu naprawy elementu. Uważa się, że ze względu na przesłanki fizyczne i techniczne zmienne losowe, takie jak: czas odnowy lub czas kontroli stanu, są obustronnie ograniczone. Czas odnowy jest ograniczony od dołu czasem organizacyjnym, czasem lokalizacji uszkodzeń, czasem demontażu i montażu uszkodzonego elementu. Czas trwania naprawy wyznacza ograniczenie czasu odnowy od góry. Czas naprawy najczęściej uszkadzających się obiektów wyznacza wartość modalną czasu odnowy.

3.3.2. WPŁYW OTOCZENIA NA NIEZAWODNOŚĆ ELEMENTÓW MASZYN

Wyróżnienie systemu eksploatacji z otoczenia systemu ma w zagadnieniach niezawodności znaczenie zasadnicze. Otoczenie można określić [50] jako te aspekty świata zewnętrznego, które mają wpływ na skutki działania, ale same nie są pod jego wpływem. System eksploatacji jest uważany za będący pod naszym wpływem, a otoczenie jest niezależnym źródłem egzegetycznych oddziaływań. Ujmując zagadnienie najbardziej ogólnie, przez otoczenie (środowisko) systemu eksploatacji rozumie się [176] zmienne warunki fizyczne, w których działa (znajduje się) obiekt techniczny po wyprodukowaniu, a więc podczas transportu, magazynowania, obsługi i użytkowania. Inaczej, środowiskiem nazywa się [157] przestrzeń zewnętrzną względem umownego brzegu obiektu lub fragment rzeczywistości znajdujący się na zewnątrz obiektu. Ścisłe zdefiniowanie czynników charakteryzujących otoczenie jest trudne ze względu na obszerność problemu. Klasyfikacja czynników [112, 143, 156] obejmuje m.in. podział na:

- otoczenie energetyczne, materiałowe i informacyjne,
 - środowisko swobodne ustalone przez procesy naturalne i środowisko wymuszone wytworzone sztucznie,
 - warunki subiektywne wynikające z działalności człowieka i warunki obiektywne,
 - czynniki uwarunkowane funkcjonowaniem obiektu (czynniki robocze; wewnętrzne) i czynniki zewnętrzne, oddziałujące w wyniku samej swojej obecności w otoczeniu,
 - otoczenie podsystemu użytkowania i podsystemu obsługi,
 - mikrootoczenie (otoczenie bliskie) i makrootoczenie (otoczenie dalekie) systemu,
 - czynniki mierzalne i niemierzalne,
 - czynniki ustalone i będące funkcją czasu, działające długo lub krótkotrwale.
- Warunki otoczenia są więc opisane przez wektor zmiennych losowych

$$\kappa(t) = \{ \kappa_i(t) \}, \quad (3.18)$$

gdzie $\kappa_i(t)$ – poszczególne czynniki wymuszające.

Wektor ten, ogólnie rzecz ujmując, zmienia się w czasie i jest wielowymiarowym procesem stochastycznym $\kappa = \kappa(t)$ [159]. Czas poprawnej pracy elementu zależy od warunków otoczenia w sposób bardzo złożony. Jeżeli trajektoria warunków otoczenia zostanie ustalona, to prawdopodobieństwo poprawnej pracy będzie pewnym funkcjonalem procesu κ

$$P\{T > t | \kappa\} = R(t; \kappa). \quad (3.19)$$

Funkcjonał ten zależy od czynników otoczenia działających na obiekt do chwili t i nie zależy od przyszłych wymuszeń otoczenia. Aby znaleźć bezwarunkową funkcję niezawodności, należy uśrednić warunkowe prawdopodobieństwo (3.19) względem trajektorii κ . Wówczas dla ustalonego zbioru wymagań ω_ϕ , nieuszkodzalność obiektu jest określona wzorem

$$R(t) = R(t; \kappa(t); \omega_\phi) = E_\kappa \left\{ \exp \left(- \int_0^t \lambda(\tau, \kappa(\tau)) d\tau \right) \right\}. \quad (3.20)$$

Aby wykorzystać tak ogólny wzór, należy przyjąć założenia o probabilistycznej naturze procesu $\kappa(t)$ i charakterze zależności niezawodności od warunków zewnętrznych.

W praktyce nie ma możliwości zbudowania pełnego modelu matematycznego niezawodności dla obiektu mechanicznego. W literaturze proponuje się dwa podejścia do problemu modelowania wpływu otoczenia na niezawodność obiektu:

- podejście statystyczne, polegające na obserwacji próbki obiektów w różnych środowiskach eksploatacji,
- podejście analityczne, bazujące na analizie zjawisk fizykochemicznych prowadzących do utraty odporności (degradacji) elementu na działanie wymuszeń otoczenia.

W przypadku elementów mechanicznych korzysta się przede wszystkim z modeli statystycznych opisujących funkcję intensywności uszkodzeń. Podejście analityczne ogranicza się do modelowania wybranych aspektów degradacji elementów, wynikających np. ze zmęczenia materiału [42, 43, 158], zużycia [138] lub korozji [44].

Funkcja intensywności uszkodzeń $\lambda(t, \kappa(t))$ (funkcja ryzyka, warunkowa intensywność uszkodzeń) określa prawdopodobieństwo, że obiekt uszkodzi się w prawostronnym otoczeniu Δt chwili t , pod warunkiem, że obiekt był zdalny w chwili t

$$\lambda(t, \kappa(t)) = \lambda[t, \kappa_1(t), \kappa_2(t), \dots]. \quad (3.21)$$

Przyjmuje się założenia upraszczające, które prowadzą do następujących metod pozwalających na uwzględnienie warunków eksploatacji w modelu niezawodności obiektu:

- metoda podobieństwa,
- model regresyjny,
- model proporcjonalnego ryzyka PHM.

3.3.2.1. METODA PODOBIENSTWA

Metoda podobieństwa jest oparta na porównaniu ilości czasu poprawnej pracy T obiektu w różnych warunkach eksploatacji. Zakłada się, że [157]:

- obiekt może pracować w ustalonych warunkach eksploatacji $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \dots$,
- prawdopodobieństwo uszkodzenia w warunkach κ_i wynosi p_i ,
- rozkład czasu poprawnej pracy T można aproksymować za pomocą rozkładu Weibulla.

Wówczas, przez porównanie oczekiwanego czasu pracy do uszkodzenia w i -tych oraz $(i+1)$ -szych warunkach pracy, można wyznaczyć współczynnik przejścia

$$\xi_{i,i+1} = \frac{E(T_i)}{E(T_{i+1})} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\delta_i}\right) \{-\ln[1 - p_{i+1}(t)]\}^{\frac{1}{\delta_{i+1}}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\delta_{i+1}}\right) \{-\ln[1 - p_i(t)]\}^{\frac{1}{\delta_i}}} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\delta_i}\right) [p_{i+1}(t)]^{\frac{1}{\delta_{i+1}}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\delta_{i+1}}\right) [p_i(t)]^{\frac{1}{\delta_i}}}, \quad (3.22)$$

stąd prawdopodobieństwo uszkodzenia w $(i+1)$ -szych warunkach eksploatacji wynosi

$$p_{i+1}(t) = \xi_{i,i+1}^{\delta_{i+1}} [p_i(t)]^{\frac{\delta_{i+1}}{\delta_i}}. \quad (3.23)$$

Jeżeli parametry kształtu rozkładu Weibulla są równe ($\delta_i = \delta_{i+1}$), to

$$p_{i+1}(t) = \xi_{i,i+1}^{\delta} p_i(t). \quad (3.24)$$

Proponowany sposób podejścia jest stosowany w większości prac dotyczących problemu bez świadomego powołania się na przyjęte założenia. Współczynnik ξ nazywany jest także współczynnikiem korekcyjnym lub współczynnikiem adaptacji.

Przez adaptację [112] rozumie się zdolność obiektu do wykonywania zadań w warunkach różnych od warunków nominalnych.

Dla dwóch poziomów wymuszenia (np. rzeczywiste i nominalne (bazowe) lub rzeczywiste i najkorzystniejsze) proponuje się dwa wskaźniki:

- współczynnik adaptacji

$$\pi_A = \lambda / \lambda_0, \quad (3.25)$$

- poprawkę na adaptację

$$\pi_S = \lambda - \lambda_0, \quad (3.26)$$

gdzie λ_0 – bazowa intensywność uszkodzeń.

3.3.2.2. MODEL REGRESYJNY

Model umożliwia opis obiektu o nieznanach charakterystykach na podstawie wartości wejść (wymuszeń charakteryzujących warunki eksploatacji obiektu) i wyjść (miar niezawodności). Poszukuje się modelu G o postaci [159]

$$G(X) = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i = \bar{\beta} \bar{x}. \quad (3.27)$$

Przyjmuje się, że:

- wymuszenia są wzajemnie niezależne,
- tylko niektóre wymuszenia mają istotny wpływ na niezawodność obiektu,
- obiekt pracuje w warunkach stacjonarnych ($\lambda(t) = \lambda = \text{const}$),
- poziom wymuszeń działających na badany obiekt jest stały w analizowanym przedziale czasu ($\kappa_i(t) = \kappa_i = \text{const}$).

Wówczas można wyznaczyć funkcję postaci

$$\lambda(t, \kappa(t)) = \lambda(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \dots, \kappa_s) = f(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \dots, \kappa_s, b_0, b_1, b_2, b_3, \dots, b_s), \quad (3.28)$$

zawierającą $s + 1$ nieznanach współczynników b_k .

W badaniach [111] ograniczono się do szukania rozwiązań w klasie funkcji stopnia nie większego niż drugi ze względu na wystarczającą dokładność oszacowania i brak istotnych przesłanek z punktu widzenia interpretacji wyników.

3.3.2.3. MODEL PROPORCJONALNEGO RYZYKA

Model proporcjonalnego ryzyka jest modelem funkcji ryzyka $h(t, \kappa(t))$ służącym do analizy niezawodności systemu z punktu widzenia wpływu czynników otoczenia systemu eksploatacji opisanych wektorem $\kappa(t)$ [9, 73, 174]. Funkcja ryzyka $h_{\kappa(t)}$ jest definiowana jako prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia obiektu w prawostronnym otoczeniu Δt chwili t , pod warunkiem, że uszkodzenie nie wystąpiło do chwili t , a na obiekt działają wymuszenia $\kappa(t)$

$$h_{\kappa(t)}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(\tau \in \langle t, t + \Delta t \rangle | \kappa(t), \tau \geq t)}{\Delta t}. \quad (3.29)$$

Modelem ryzyka proporcjonalnego $h_{\kappa(t)}$ nazywa się model regresyjny funkcji ryzyka składający się z dwóch multiplikatywnych czynników:

- funkcji ryzyka rozkładu bazowego $h_0(t)$,
- funkcji $g(\kappa(t))$, która uwzględnia czynniki środowiska eksploatacji $\kappa(t)$

$$h_{\kappa(t)}(t) = h_0(t) g(\kappa(t)), \quad (3.30)$$

przy czym funkcja ryzyka bazowego $h_0(t)$ jest określona wzorem

$$h_0(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(\tau \in \langle t, t + \Delta t \rangle | \tau \geq t)}{\Delta t}. \quad (3.31)$$

Funkcja $g(\kappa(t))$ musi spełniać warunek

$$\forall_{\kappa(t)} g(\kappa(t)) > 0. \quad (3.32)$$

Warunek (3.32) spełnia dla wszystkich czynników otoczenia funkcja wykładnicza

$$g(\kappa(t)) = \exp(\beta \kappa(t)), \quad (3.33)$$

gdzie $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_s)$ jest wektorem współczynników regresji odpowiednich dla elementów κ_i wektora κ .

Wówczas

$$h_{\kappa(t)}(t) = h_0(t) \exp(\beta \kappa(t)). \quad (3.34)$$

Wykładnicza postać funkcji $g(\kappa(t))$ jest często stosowana do analizy wyników badań eksploatacyjnych [9].

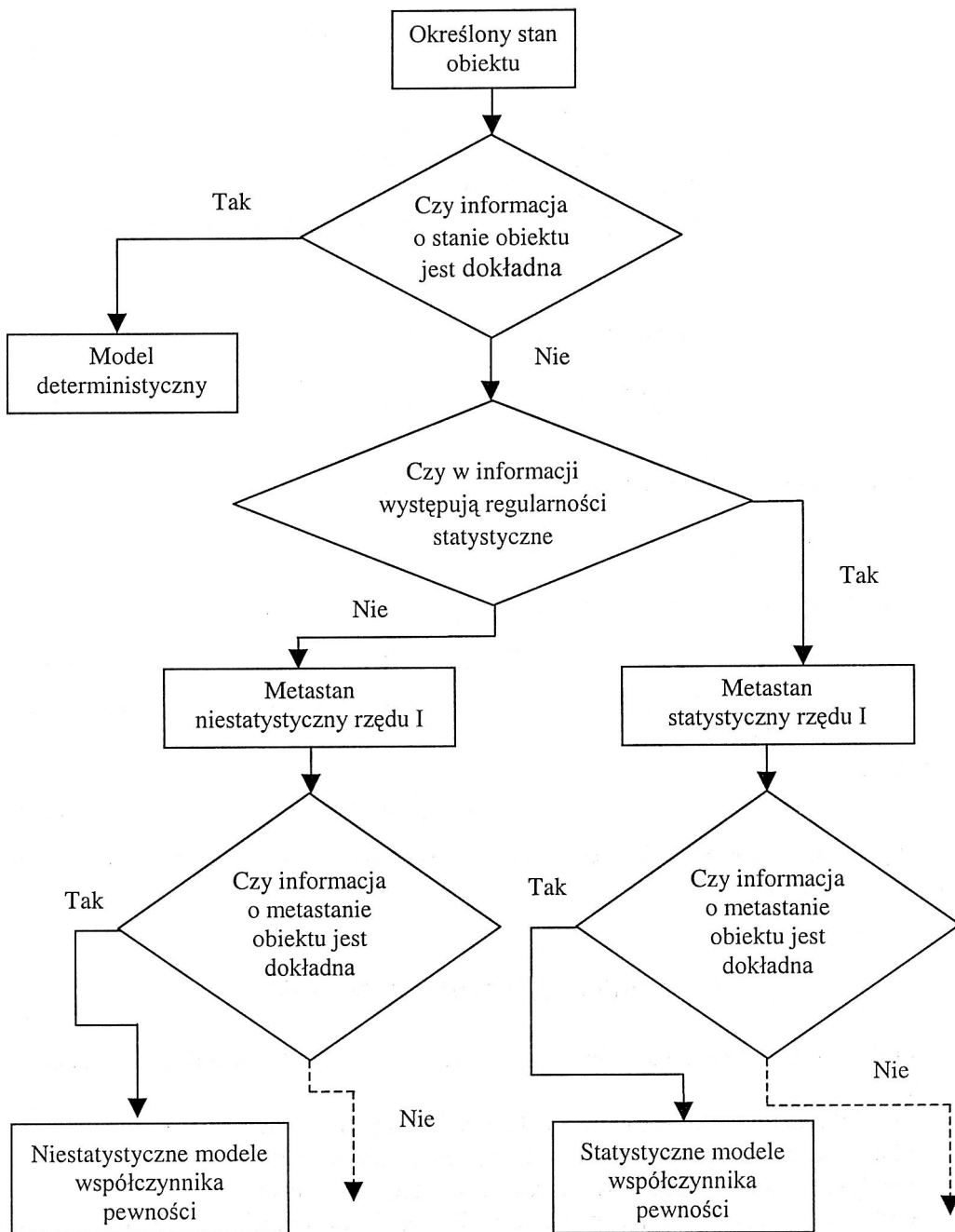
3.4. WSPÓŁCZYNNIK PEWNOŚCI

Problemy przetwarzania informacji niepewnej dotyczą 3 zasadniczych aspektów [16]:

- modelu matematycznego reprezentacji informacji niepewnej,
- łączenia miar niepewności informacji pochodzących z różnych źródeł,
- propagacji miar niepewności w trakcie procesu wnioskowania.

Podstawowe znaczenie na etapie formalizowania informacji charakteryzujących niezawodność obiektu ma sposób modelowania współczynnika pewności. Po wprowadzeniu [153] dwóch binarnych cech:

- informacja o stanie jest dokładna lub niedokładna,
- informacja statystyczna może lub nie może być użyta,



Rys. 3.9. Podstawowe rodzaje relacji między dostępną informacją a stanem obiektu, który tę relację generuje

Fig. 3.9. Basic relations between available information and a state of machine element generating given relation

można sklasyfikować szereg stanów obiektu (rys. 3.9). Na tej podstawie wyróżniono dwa podstawowe modele niepewności: statystyczne, gdy informacja o stanie obiektu jest niedokładna, ale podlega regułom statystycznym, oraz modele niestatystyczne, gdy reguły statystyczne nie występują.

Wobec tego dotychczas stosowane modele niezawodności są, w sensie informacyjnym, modelami deterministycznymi. Na przykład rozkład prawdopodobieństwa czasu naprawy jest modelem deterministycznym, ponieważ losowość (niepewność) dotyczy modelowanego zjawiska (naprawy), a nie wiarygodności (niepewności) samego modelu.

3.4.1. MODELE STATYSTYCZNE

Modele statystyczne różnią się w zależności od sposobu interpretowania istoty prawdopodobieństwa. Wyróżnia się [16, 170] interpretacje obiektywną i subiektywną.

3.4.1.1. PODEJŚCIE OBIEKTYWNE

W podejściu obiektywnym (częstotliwościowym) prawdopodobieństwo oznacza frakcję zdarzeń sprzyjających występujących w zbiorze wielokrotnie powtarzanych prób. Niepewność obliczeń probabilistycznych określa częstość zdarzeń występujących w identycznych okolicznościach. W tym sensie trudno jest mówić o prawdopodobieństwie jako wewnętrznej własności pojedynczego zdarzenia. Podejście częstotliwościowe naraża wiele trudności praktycznych (m.in. należy ustalić dostateczną liczbę obserwacji lub zapewnić powtarzalność warunków eksperymentu), ale pozwala na korzystanie z metod statystycznych stosowanych w czasie badań eksploatacyjnych obiektów technicznych.

Metoda badań statystycznych wymaga pobrania n -elementowej próbki losowej.

Liczność próbki w istotny sposób wpływa na poziom ufności oszacowanych wskaźników. Liczność próbki zależy m.in. od [80]:

- rozkładu statystycznego badanej cechy,
- poziomu ufności β , z jakim będą wyznaczone wskaźniki eksploatacyjne,
- części γ zbioru obiektów, do której ma się odnosić wyznaczony wskaźnik,
- rodzaju przedziału pokrywającego nieznaną wartość wskaźnika,
- ograniczeń wynikających z przyjętej metody opracowania informacji, np. ograniczenia wynikające z ucięcia próbki,
- dopuszczalnych kosztów badań.

Zastosowanie modelu statystycznego do opisu niepewności miary niezawodności obiektu opiera się na wyznaczeniu wartości przedziału ufności estymatorów punktowych ϑ . Dwustronny przedział ufności oznacza prawdopodobieństwo

$$P(\vartheta_{dd} \leq \vartheta \leq \vartheta_{dg}) = \beta, \quad (3.35)$$

gdzie:

β – poziom ufności,

ϑ_{dd} , ϑ_{dg} – dolna i górna granica dwustronnego przedziału ufności.

Granice przedziału ufności zależą od:

- wartości ϑ^* wyznaczonej na podstawie n danych doświadczalnych,
- wartości poziomu ufności β .

Każdy parametr rozkładu statystycznego dotyczy całego zbioru populacji obiektów. W zastosowaniu dąży się do poznania sytuacji poszczególnych obiektów. Wymaga to rozpoznania prawdopodobieństwa β zdarzenia, że określona część γ zbioru obiektów ma wartość badanej cechy większą od określonej wartości tej cechy. Oznacza to wyznaczenie przedziału tolerancji statystycznej, który z zadany poziomem ufności β obejmuje, ze względu na badaną cechę, część γ zbioru obiektów.

Przedział tolerancji statystycznej może być: jednostronny, ograniczony z dołu lub góry i dwustronny (symetryczny)

$$P\left(\int_{x_{\text{dd}}}^{x_{\text{dg}}} f(x) dx \geq \gamma/n\right) = \beta. \quad (3.36)$$

Wyznaczenie granic parametrycznego przedziału tolerancji statystycznej wymaga znajomości rozkładu statystycznego zmiennej losowej X , tzn. funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f(x)$.

Podstawowe znaczenie do wyznaczenia nieparametrycznego przedziału tolerancji ma nierówność Czebyszewa

$$P(EX - \varepsilon \leq X \leq EX + \varepsilon) \geq 1 - \frac{D^2 X}{\varepsilon^2}, \quad (3.37)$$

w której ε – dowolna liczba dodatnia.

Zakłada się, że badana cecha X jest ciągła, a wartość oczekiwana EX i wariancja $D^2 X$ mają wartości skończone. Estymatorem parametru EX jest wartość średnia $\bar{X}$, a estymatorem parametru $D^2 X$ jest wariancja empiryczna s^2 .

Można wykazać, że statystyka $\frac{\bar{x} - EX}{s} \sqrt{n}$ ma asymptotyczny rozkład Studenta o $n - 1$ stopniach swobody, prawdopodobieństwo β wynosi zatem

$$P\left\{t_{n-1; \frac{1-\beta}{2}} \leq \frac{\bar{x} - EX}{s} \sqrt{n} \leq t_{n-1; \frac{1+\beta}{2}}\right\} = \beta. \quad (3.38)$$

Statystyka $\frac{s - \sqrt{D^2 X}}{\sqrt{D^2 X}} \sqrt{2n}$ ma natomiast rozkład asymptotycznie normalny o warto-

ści oczekiwanej $\sqrt{D^2 X}$ i wariancji $\sqrt{\frac{D^2 X}{2n}}$, a więc z prawdopodobieństwem γ jest spełniony warunek

$$P\left\{\frac{s - \sqrt{D^2 X}}{\sqrt{D^2 X}} \sqrt{2n} \geq y_{1-\gamma}\right\} = \gamma, \quad (3.39)$$

wówczas przedział tolerancji statystycznej można określić wzorem

$$P\left\{\int_{x_{dd}}^{x_{dg}} f(x) dx \geq \gamma/n\right\} = P\{\bar{x} - K_d s \leq X \leq \bar{x} + K_d s\} \geq 1 - \frac{1}{k^2}, \quad (3.40)$$

w którym k – dowolna liczba dodatnia,

$$K_d = \frac{t_{n-1; \frac{1+\beta}{2}}}{\sqrt{n}} + \frac{k}{1 - y_\gamma \frac{1}{\sqrt{2n}}}, \quad (3.41)$$

$$\varepsilon = k\sqrt{D^2 X}. \quad (3.42)$$

Granice nieparametrycznego, dwustronnego przedziału tolerancji statystycznej wynoszą

$$\begin{aligned} x_{dd} &= \bar{x} - K_d s, \\ x_{dg} &= \bar{x} + K_d s. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Podobnie oblicza się granice jednostronne przedziału tolerancji.

Jeżeli wiadomo, że badana cecha X ma rozkład jednomodalny i symetryczny, to obowiązuje nierówność Campa-Meidella

$$P(EX - \varepsilon \leq X \leq EX + \varepsilon) \geq 1 - \frac{D^2 X}{2,25\varepsilon^2}, \quad (3.44)$$

wówczas

$$\begin{aligned} x_{dd} &= \bar{x} - K_{dc} s, \\ x_{dg} &= \bar{x} + K_{dc} s, \end{aligned} \quad (3.45)$$

gdzie

$$K_{dc} = \frac{t_{n-1; \frac{1+\beta}{2}}}{\sqrt{n}} + \frac{1}{\left(1 - y_\gamma \frac{1}{\sqrt{2n}}\right) \sqrt{2,25(1-\gamma\beta)}}. \quad (3.46)$$

Jeżeli wiadomo, że badana cecha X ma rozkład normalny o parametrach μ i σ , to granice tolerancji wynoszą:

$$\begin{aligned}x_{dd} &= \mu - u_\gamma \sigma, \\x_{dg} &= \mu + u_\gamma \sigma,\end{aligned}\tag{3.47}$$

gdzie u_γ – kwantyl rozkładu normalnego rzędu γ .

Jeżeli część γ zbioru obiektów, do której ma się odnosić wyznaczony wskaźnik, będzie uważana za miarę niepewności danej statystycznej, to przy ustalonym poziomie ufności oszacowania i ustalonej wielkości próbki statystycznej współczynnik pewności będzie tym większy, im więcej będzie wiadomo o charakterze rozkładu prawdopodobieństwa badanej cechy.

3.4.1.2. PODEJŚCIE SUBIEKTYWNE

W podejściu subiektywnym (Bayesowskim) prawdopodobieństwo interpretuje się [2, 6, 16] jako stopień zaufania do postawionej hipotezy. Interpretacja subiektywna przyjmuje, że prawdopodobieństwo jest pewną liczbą charakterystyczną dla danego zdarzenia losowego spełniającą aksjomaty [16]:

$$\begin{aligned}P(f) &= 0, \\P(t) &= 1,\end{aligned}\tag{3.48}$$

$$\forall a, b \in F, \text{ jeśli } a \wedge b = f, \text{ to } P(a \vee b) = P(a) + P(b),$$

gdzie:

F – skończony zbiór zdań,

t – formuła zawsze prawdziwa,

f – formuła zawsze fałszywa.

Punktem wyjścia do reprezentacji informacji niepewnej jest twierdzenie Bayesa [16]. Zakłada się, że dany jest zbiór hipotez (zdarzeń lub zdań) $H = \{h_1, \dots, h_n\}$ takich, że:

$$\forall i \neq j \ h_i \wedge h_j = f,$$

$$\bigcup_{i=1}^n h_i = t,$$

$$P(h_i) > 0, i = 1, \dots, n.\tag{3.49}$$

Dany jest także zbiór obserwacji $\{e_1, \dots, e_n\}$. Każda obserwacja jest niezależna warunkowo względem każdej hipotezy

$$P(e_1, \dots, e_m | h_i) = \prod_{j=1}^m P(e_j | h_i), \quad i = 1, \dots, n.\tag{3.50}$$

Według twierdzenia Bayesa prawdopodobieństwo hipotez a posteriori $P(h_i | e_1, \dots, e_m)$ w zależności od prawdopodobieństwa a priori $P(h_i)$ wynosi

$$P(h_i | e_1, \dots, e_m) = \frac{P(e_1, \dots, e_m | h_i) P(h_i)}{\sum_{k=1}^n P(e_1, \dots, e_m | h_k) P(h_k)} = \frac{\prod_{j=1}^m P(e_j | h_i)}{\sum_{k=1}^n \prod_{j=1}^m P(e_j | h_k) P(h_k)} P(h_i). \quad (3.51)$$

Po zastosowaniu reguły „jeżeli e , to h ” wzór (3.51) upraszcza się do postaci

$$P(h|e) = \frac{P(e|h)P(h)}{P(e)}. \quad (3.52)$$

Wprowadzenie dodatkowego założenia [16]

$$P(e_1, \dots, e_m | \neg h_i) = \prod_{j=1}^m P(e_j | \neg h_i) \quad (3.53)$$

pozwała na sformułowanie alternatywnej formy reguły Bayesa

$$\frac{P(h|e)}{P(\neg h|e)} = \frac{P(e|h)}{P(e|\neg h)} \frac{P(h)}{P(\neg h)}. \quad (3.54)$$

Zdefiniowane [16, 20] wielkości nazwano szansą a priori

$$O(h) = \frac{P(h)}{P(\neg h)} \quad (3.55)$$

i szansą a posteriori

$$O(h|e) = \frac{P(h|e)}{P(\neg h|e)} \quad (3.56)$$

oraz współczynnikiem wiarygodności

$$\lambda = \frac{P(e|h)}{P(e|\neg h)}, \quad (3.57)$$

wówczas reguła Bayesa może być zapisana jako

$$O(h|e) = \lambda O(h). \quad (3.58)$$

Współczynnik λ wskazuje, w jaki sposób szansa znana a priori hipotezy h przenosi się na szansę hipotezy a posteriori pod warunkiem, że obserwacja e była prawdziwa. Można wyznaczyć szansę hipotezy h , gdy obserwacja e była fałszywa

$$O(h|\neg e) = \bar{\lambda} O(h), \quad (3.59)$$

gdzie

$$\bar{\lambda} = \frac{P(\neg e|h)}{P(\neg e|\neg h)}. \quad (3.60)$$

Duża wartość współczynnika λ może wskazywać, że obserwacja e jest wystarczająca dla hipotezy h , mała wartość współczynnika $\bar{\lambda}$ może natomiast wskazywać, że e jest konieczne dla h .

Inną wielkością opisującą niepewność informacji jest entropia. Jest to [1, 16] funkcjonal przyporządkowujący funkcji prawdopodobieństwa nieujemną liczbę:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i. \quad (3.61)$$

Entropia mierzy zawartość informacyjną rozpatrywanego zbioru zdań lub zdarzeń. Można ją interpretować jako średnią niepewność posiadanej wiedzy.

Dla obiektu dwustanowego entropie oszacowano zgodnie ze wzorem

$$H = -K_g \log_2 K_g - (1 - K_g) \log_2 (1 - K_g), \quad (3.62)$$

w którym K_g – współczynnik gotowości uśredniony dla podsystemów danego poziomu dekompozycji obiektu.

Wówczas wartość entropii zmienia się w przedziale $H = [0, 1]$. Gdy istnieje pewność określonego stanu ($p = 0$ lub $p = 1$)

$$H(0) = H(1) = 0. \quad (3.63)$$

Najmniej korzystna sytuacja, ze względu na cel analizy, występuje wtedy, gdy prawdopodobieństwa wystąpienia wszystkich stanów obiektu są sobie równe. Wówczas wartość entropii osiąga maksimum; dla obiektów dwustanowych $H_{\max} = 1$.

3.4.2. MODELE NIESTATYSTYCZNE

Do niestatystycznych modeli informacji niepewnej należą m.in. [16, 20, 34, 118]:

- miara przekonania i wyobraźności w teorii Schafera–Dempstera,
- współczynnik pewności systemu ekspertowego MYCIN,
- funkcja przynależności zbioru rozmytego.

3.4.2.1. TEORIA DEMPSTERA–SHAFERA

Teoria Dempstera–Shafera należy do metod przybliżonych uzupełniających model probabilistyczny. Wyznacza się prawdopodobieństwo, z jakim dane hipotezy można udowodnić na podstawie posiadanej informacji, a nie prawdopodobieństwo prawdziwości tych hipotez. Wprowadza się zbiór $T \subseteq F$ elementów ogniskowych – zdań, o których ma się jakieś informacje. Elementy z T nie muszą być zdaniami elementarnymi.

nymi oraz wzajemnie wyłączającymi się. Dostępne informacje o elementach T są zapisywane w postaci rozkładu bazowego prawdopodobieństwa, który reprezentuje częściowe przekonania. Rozkład bazowego prawdopodobieństwa jest przekształceniem F w odcinek $[0, 1]$, spełniającym warunki:

$$\begin{aligned} m(f) &= 0, \\ \sum_{a \in T} m(a) &= 1. \end{aligned} \quad (3.64)$$

Dla wszystkich pozostałych $a \in F$ $m(a) = 0$.

Ignorancja w tym modelu jest reprezentowana przez wartość $m(t)$. Rozkład $m(t) = 1$ oznacza całkowitą niewiedzę związaną z rozpatrywanym problemem.

Wprowadza się dwie miary nazywane przekonaniem MP i wyobrażalnością MW . Funkcja przekonania jest określona wzorem

$$MP(a) = \sum_{(b \Rightarrow a) = t} m(b), \quad (3.65)$$

a funkcja wyobrażalności oznacza

$$MW(a) = \sum_{(b \Rightarrow a) = f} m(b). \quad (3.66)$$

Niepewność danego zdania $a \in F$ może być reprezentowana przez odcinek

$$[MP(a), MW(a)]. \quad (3.67)$$

3.4.2.2. MODEL MYCIN

Współczynnik pewności w systemie ekspertowym MYCIN [16, 27] jest interpretowany jako przyrost prawdopodobieństw warunkowych. Współczynnik pewności $cf(h, e)$ jest określony jako różnica miary wiarygodności MB i miary niewiarygodności MD . Miara wiarygodności $MB(h, e)$ reprezentuje stopień potwierdzenia (wzmocnienia) hipotezy h przez obserwację e . Miara niewiarygodności $MD(h, e)$ określa stopień niepotwierdzenia (osłabienia) hipotezy h przez obserwację e . Wówczas

$$cf(h, e) = MB(h, e) - MD(h, e). \quad (3.68)$$

Interpretacja probabilistyczna wiąże współczynnik cf z prawdopodobieństwem a priori hipotezy h – $P(h)$ i prawdopodobieństwem a posteriori $P(h|e)$:

$$cf(h, e) = \begin{cases} 1, & P(h) = 1, \\ MB(h, e), & P(h|e) > P(h), \\ 0, & P(h|e) = P(h), \\ -MD(h, e), & P(h|e) < P(h), \\ -1, & P(h) = 0, \end{cases} \quad (3.69)$$

$$MB(h, e) = \begin{cases} \frac{P(h|e) - P(h)}{1 - P(h)} & P(h|e) > P(h), \\ 0, & \text{w przeciwnym razie,} \end{cases} \quad (3.70)$$

$$MD(h, e) = \begin{cases} \frac{P(h) - P(h|e)}{P(h)} & P(h|e) < P(h), \\ 0, & \text{w przeciwnym razie,} \end{cases} \quad (3.71)$$

wówczas

$$P(h|e) = \begin{cases} P(h) + cf(h, e)[1 - P(h)], & cf(h, e) > 0, \\ P(h) - |cf(h, e)|P(h), & cf(h, e) < 0. \end{cases} \quad (3.72)$$

3.4.2.3. TEORIA ZBIORÓW ROZMYTYCH

Wielu autorów [16, 27, 29, 118] uważa, że połączenie metod reprezentacji informacji niepewnej z teorią zbiorów rozmytych w sposób bardziej naturalny opisuje rzeczywiste systemy człowiek–maszyna–otoczenie.

Niech $O = \{o\}$ oznacza przestrzeń rozważanych obiektów. Zbiór rozmyty A określony na O jest definiowany przez parę uporządkowaną

$$\{(o, \mu_A(o))\}, \quad (3.73)$$

gdzie: $o \in O$, $\mu_A : A \rightarrow [0, 1]$ jest funkcją przynależności zbioru A .

Funkcja przynależności $\mu_A(o) \in [0, 1]$ jest stopniem przynależności o w A , przyjmującym wartości od 0 dla zupełnego braku przynależności do wartości 1 dla pełnej przynależności.

Do określenia charakterystyk niepewności stosuje się liczby rozmyte. Liczbą rozmytą nazywa się [16] wypukły i znormalizowany zbiór rozmyty z przestrzeni R taki, że:

- istnieje dokładnie jedno $x_0 \in R$, dla którego $\mu_L(x_0) = 1$; x_0 jest nazywane średnią wartością L ,
- funkcja μ_L jest ciągła (dokładnie – półciągła z góry).

W zastosowaniach praktycznych wprowadzane są liczby rozmyte o z góry określonych funkcjach przynależności, np. liczby typu $L - R$ [118] lub typu $a - b$.

Liczba rozmyta L typu $a - b$ jest reprezentowana przez czwórkę (a, b, α, β) . Pierwsze dwa parametry oznaczają przedział, w którym funkcja przynależności osiąga wartość 1; trzeci i czwarty parametr oznaczają lewą i prawą szerokość rozkładu. Funkcja przynależności jest zdefiniowana następująco

$$\mu_L(x) = \begin{cases} 0, & x < a - \alpha, \\ (1/\alpha)(x - a + \alpha), & x \in [a - \alpha, a], \\ 1, & x \in [a, b], \\ (1/\beta)(b + \beta - x), & x \in (b, b + \beta], \\ 0, & x > b + \beta. \end{cases} \quad (3.74)$$

Funkcja rozkładu możliwości jest określana [27] dla stwierdzenia, że wartością zmiennej y jest rozmyty element L . Funkcja przyjmuje wartość $p(y)$ będącą możliwością tego, że wartością y jest L . Wartości liczbowe funkcji rozkładu możliwości oraz funkcja przynależności zbioru rozmytego są równe

$$p(y) = \mu_L(x) \text{ dla każdego } y = x. \quad (3.75)$$

Miara możliwości tego, że zbiór rozmyty A zawiera liczbę rozmytą L wynosi

$$MM(A) = \max_{o \in O} [\min [p(o), \mu_L(o)]]. \quad (3.76)$$

Pojęcie miary konieczności wprowadzono w celu określenia miary braku możliwości stwierdzenia A

$$MK(A) = \min_{o \in O} [\max [1 - p(o), \mu_L(o)]]. \quad (3.77)$$

Stwierdzenie A , którego miara konieczności $MK(A) = 1$, jest stwierdzeniem w pełni prawdziwym. Stwierdzenie A , którego miara możliwości $MM(A) = 0$, jest stwierdzeniem w pełni fałszywym. Wartości miar konieczności $MK(A)$ i możliwości $MM(A)$ mogą być rozpatrywane jako ograniczenia wielkości określającej stopień słuszności (współczynnik pewności) stwierdzenia A . Wówczas współczynnik pewności może być zdefiniowany jako [27]

$$cf(A) = \frac{MM(A) + MK(A)}{2}. \quad (3.78)$$

3.4.3. PORÓWNANIE MODELI

W systemie przetwarzania informacji niepewnej wyróżnia się trzy poziomy: reprezentacji, wnioskowania i sterowania. W pracy rozważany jest problem reprezentacji danych niezawodnościowych, który określa strukturę umożliwiającą opisanie dostępnej informacji i informacji dodatkowych. W strukturach tych jest przewidziane miejsce umożliwiające wartościowanie numeryczne niepewności. Wymagania dotyczące poziomu reprezentacji stwierdzają, że [16]:

I. Powinna istnieć możliwość bezpośredniej reprezentacji całej dostępnej informacji wspierającej lub obalającej każdą przypuszczalną hipotezę – wiedza systemu.

II. Powinna istnieć możliwość bezpośredniej reprezentacji wiedzy o posiadanej informacji – metawiedza systemu.

III. Reprezentacja powinna dawać możliwość opisu niepewności na dostępnym poziomie jej wyszczególnienia.

IV. Powinna istnieć możliwość bezpośredniej reprezentacji zgodności; miary zgodności mają umożliwić wykrywanie potencjalnych informacji konfliktowych i identyfikację głównych składników powodujących konflikt.

V. Powinna istnieć możliwość bezpośredniej reprezentacji ignorancji – wyrażania przez użytkownika braku przekonania o pewności zdarzeń,

VI. Reprezentacja powinna być naturalna, aby użytkownik był w stanie opisać niepewność na wejściu systemu i zinterpretować niepewność na wyjściu systemu oraz aby ekspert mógł określać zgodne wagi reprezentujące siłę implikacji każdej reguły.

Porównanie omówionych metod numerycznej reprezentacji informacji niepewnej przedstawiono w tabeli 3.2. Zestawiono oceny realizacji wymagań stawianych systemowi reprezentacji [16].

Z przedstawionego porównania wynika, że modele:

- przedziału prawdopodobieństwa,
- Dempstera–Shafera,
- liczb rozmytych,

w takim samym stopniu spełniają postawione wymagania. Brak modelu pozwalającego na bezpośrednią reprezentację wiedzy o dostępnej informacji (warunek II) wskazuje na zasadnicze trudności w ocenie współczynnika pewności danych gromadzonych w trakcie badań rzeczywistych obiektów.

Tabela 3.2. Porównanie metod numerycznej reprezentacji informacji niepewnej

Model	Wymagania					
	I	II	III	IV	V	VI
Przedział prawdopodobieństwa	T	N	T	T	T	T
Bayesa	N	N	N	N	N	T
MYCIN	T	N	N	N	T	N
Dempstera–Shafera	T	N	T	T	T	T
Liczby rozmyte	T	N	T	T	T	T

Oznaczenia: T – wymaganie spełnione,

N – wymaganie nie spełnione.

4. ANALIZA CHARAKTERYSTYK NIEZAWODNOŚCI OBIEKTÓW MECHANICZNYCH

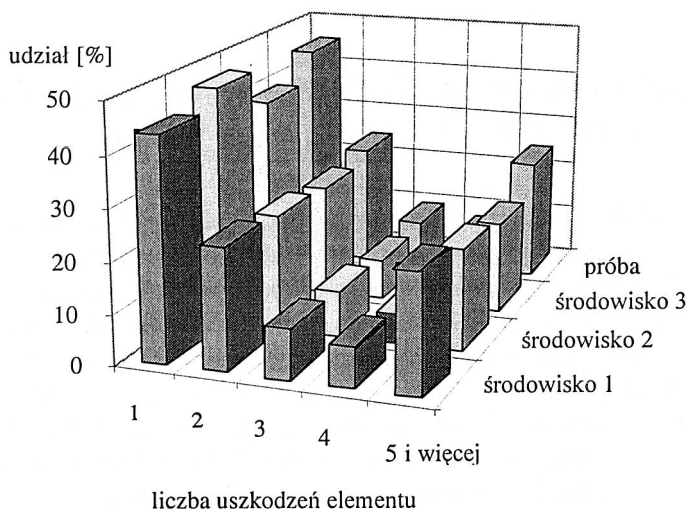
Możliwości oszacowania charakterystyk niezawodności obiektu mechanicznego (np. rozkładu prawdopodobieństwa czasu pracy do uszkodzenia, czasu naprawy lub funkcji gotowości) przeanalizowano na podstawie wyników badań prowadzonych w latach 1975–1997 (tab. 1.1). Celem analizy było określenie zbioru wartości atrybutów, dla których powinna być zaprojektowana baza wiedzy systemu doradczego wspomagającego prognozowanie niezawodności. Możliwości szacowania wartości atrybutów – charakterystyk niezawodności oraz możliwości oszacowania wpływu czasu eksploatacji, czynników otoczenia lub definicji uszkodzenia obiektu na te atrybuty – są różne. Najistotniejszą przyczyną jest analizowany poziom dekompozycji obiektu.

4.1. WPŁYW CZASU EKSPLOATACJI

Najtrudniej jest uzyskać wiarygodne oszacowania elementów maszyny, nie mówiąc już o poziomie postaci uszkodzenia. W czasie badań uszkodzeniom ulega od 10 do 20% zbioru elementów maszyny (w sensie asortymentu) i to w większości przypadków tylko jeden raz. Dla pozostałych elementów możliwości oszacowania wskaźników nieuszkodzalności są ograniczone do obliczenia jednostronnego przedziału ufności czasu pracy do uszkodzenia oraz brakuje sposobu na określenie wskaźników naprawialności.

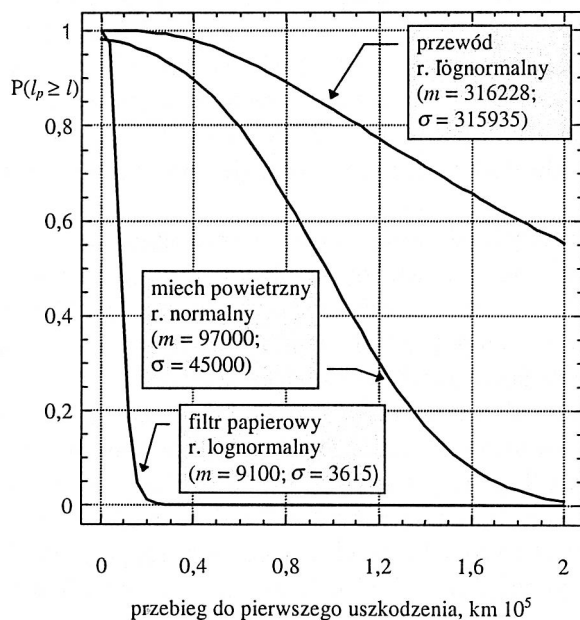
Spośród analizowanych zbiorów danych niezawodnościowych, najlepszą (w sensie ilości i zupełności danych) bazę zgromadzono w trakcie badań kolejnych faz produkcyjnych (B, CD, F) autobusu miejskiego Jelcz PR 110 U [96]. Problem liczby danych na poziomie dekompozycji element zilustrowano na rysunku 4.1. Tylko dla około 20% elementów zarejestrowano 5 i więcej zdarzeń.

Rozkłady prawdopodobieństwa aproksymowano dla najliczniejszego zbioru pojazdów (50 sztuk) eksploatowanego w jednym środowisku. Spośród ponad 2000 elementów autobusu (według przyjętej w badaniach struktury niezawodnościowej) udało się oszacować rozkłady dla mniej niż 50 najbardziej uszkodzalnych elementów. Zakres aproksymowanych rozkładów przebiegu do pierwszego uszkodzenia pokazano na rysunku 4.2, przebiegu między uszkodzeniami – na rysunku 4.3, a czasu naprawy – na rysunku 4.4. Stosowano różne rozkłady prawdopodobieństwa, przy czym najczęściej korzystano z rozkładu Weibulla, ze względu na jego uniwersalny charakter. Trudno jest powiązać rodzaj aproksymowanych rozkładów z fizycznymi przyczynami uszkodzeń. Rozkłady czasu naprawy są często zbliżone do rozkładu normalnego.



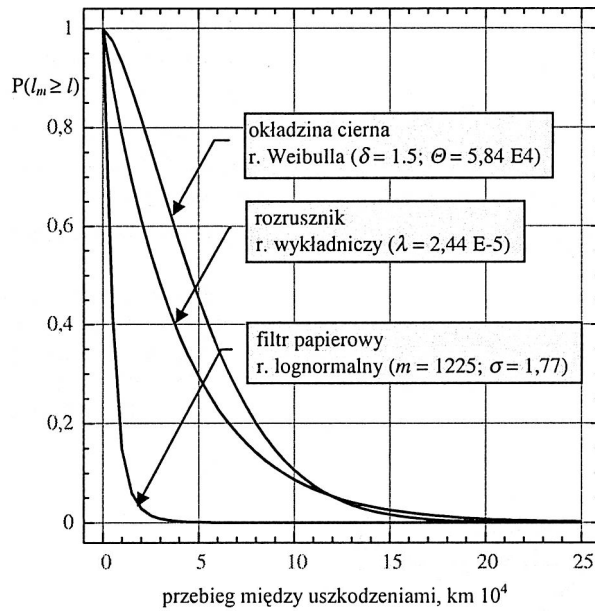
Rys. 4.1. Udział ilości uszkodzeń elementów autobusu Jelcz PR 110 U (faza B)

Fig. 4.1. Number of damages of the elements of the Jelcz PR 110 U bus (the B phase) failures



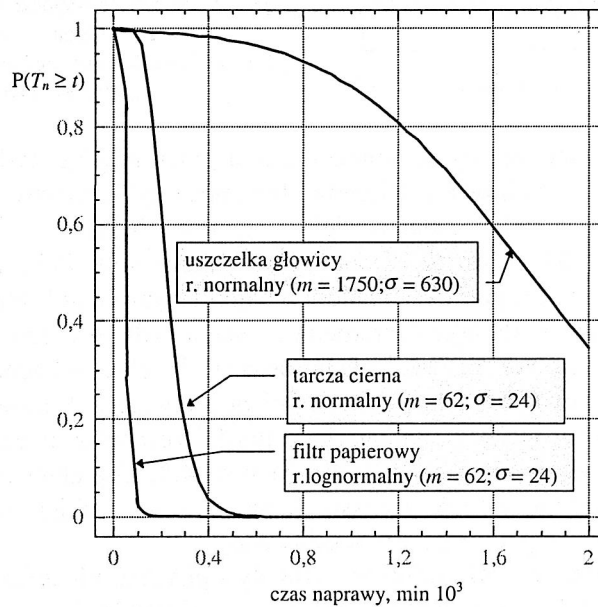
Rys. 4.2. Rozkłady prawdopodobieństwa przebiegu do pierwszego uszkodzenia elementów autobusu Jelcz PR 110 U

Fig. 4.2. Probability distribution of mileage to the first failure of the elements of the Jelcz PR 110 U bus



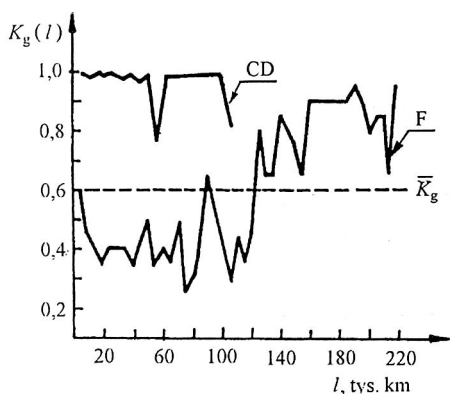
Rys. 4.3. Rozkłady prawdopodobieństwa przebiegu między uszkodzeniami elementów autobusu Jelcz PR 110 U

Fig. 4.3. Probability distributions of mileage between failures of the elements of the Jelcz PR 110 U bus



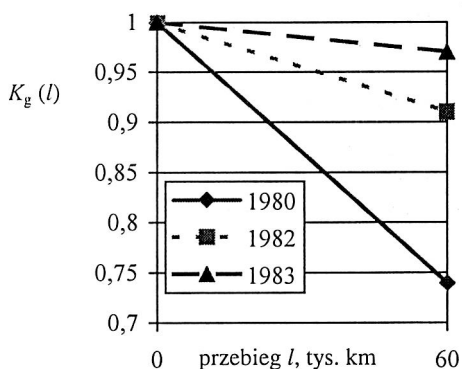
Rys. 4.4. Rozkłady prawdopodobieństwa czasu naprawy elementów autobusu Jelcz PR 110 U

Fig. 4.4. Probability distributions of repair time of the Jelcz PR 110 U bus elements



Współczynnik gotowości pojazdów zmienia się w funkcji czasu eksploatacji w sposób nieregularny. Przebieg zmian może zależeć także od fazy produkcyjnej autobusu (rys. 4.5) i daty wyprodukowania pojazdów (rys. 4.6 dotyczy wersji międzymiastowej autobusu).

Rys. 4.5. Funkcja gotowości autobusów Jelcz PR 110 U fazy produkcyjnej CD i F
Fig. 4.5. Availability function of the Jelcz PR 110 U buses undergoing the CD and F production phases



Rys. 4.6. Zależność współczynnika gotowości od przebiegu (autobus Jelcz PR 110 IL)
Fig. 4.6. Availability coefficient versus mileage (the Jelcz PR 110 IL bus)

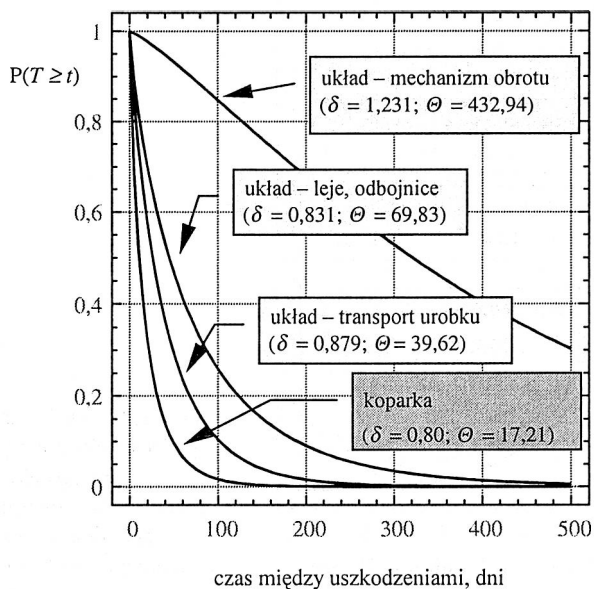
Relacje zachodzące między rozkładami czasu pracy między uszkodzeniami (rozkład Weibulla) poszczególnych poziomów dekompozycji maszyny pokazano na rysunku 4.7, dotyczącym badań koparek wielonaczyniowych [61].

Poszczególne rozkłady różnią się nie tylko parametrem skali, a więc wartością oczekiwaną (pokazano krzywe dla układów o najkrótszym i najdłuższym czasie pracy między uszkodzeniami), ale także parametrem kształtu (dla jednego układu – mechanizmu obrotu – funkcja ryzyka jest funkcją rosnącą). W okresie badań czas eksploatacji koparek był stosunkowo krótki, jak na ich planowany czas użytkowania.

Zakres zmienności rozkładów nieuszkodzalności zespołów należących do układu o największej uszkodzalności pokazano na rysunku 4.8. Charakter zmian prawdopodobieństwa uszkodzenia w funkcji czasu eksploatacji wszystkich zespołów jest podobny, różnice dotyczą tylko wartości oczekiwanej.

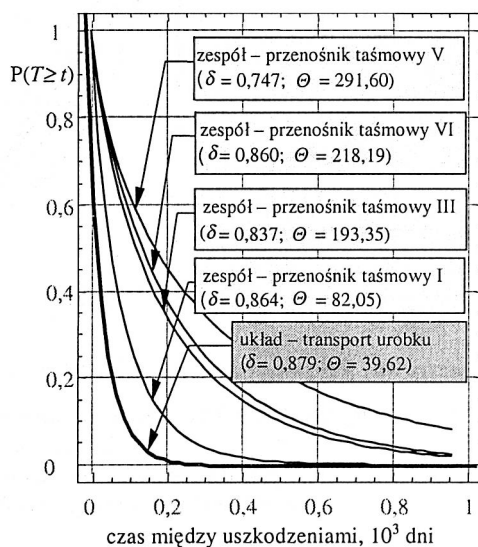
Znacznie bardziej są zróżnicowane rozkłady opisujące nieuszkodzalność podzespołów (rys. 4.9 i 4.10). Szczególnie widoczny jest zupełnie inny przebieg funkcji ryzyka dla napędów i przenośnika – napęd lewy charakteryzuje się wyraźnie rosnącą funkcją ryzyka ($\delta > 1$), natomiast dla napędu prawego ta funkcja jest malejąca ($\delta < 1$).

Analiza struktury konstrukcyjnej i funkcjonalnej nie daje podstaw do uzasadnienia przyczyn tak istotnej różnicy.



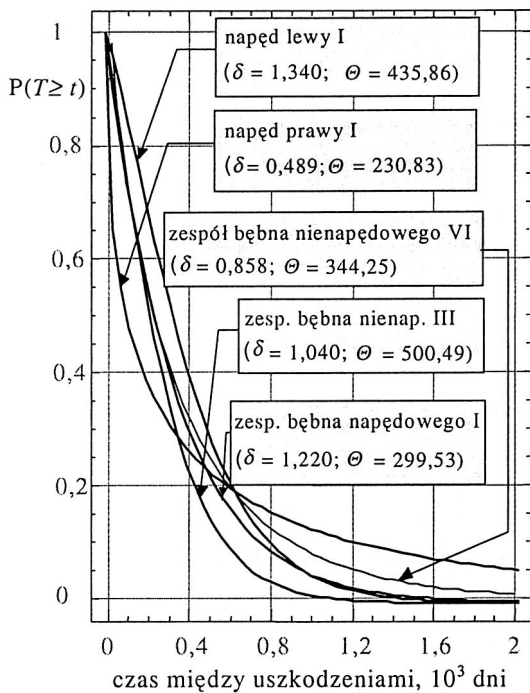
Rys. 4.7. Rozkłady czasu poprawnej pracy koparki SRs-2000 i jej układów funkcjonalnych

Fig. 4.7. Time distributions of a correct operation of the SRs-2000 excavator and its functional blocks

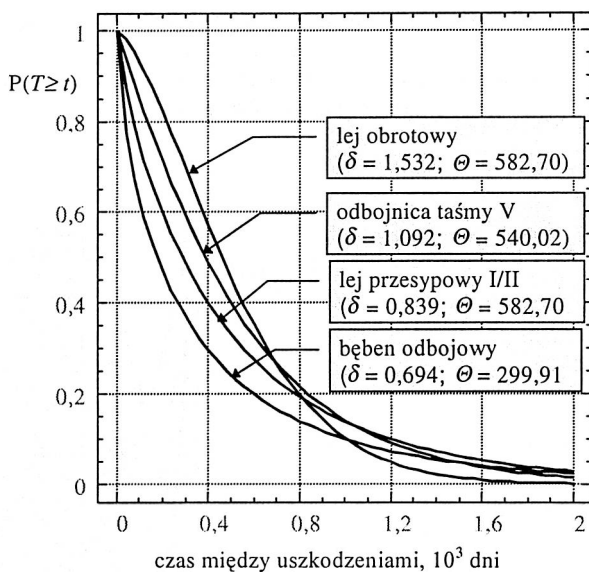


Rys. 4.8. Rozkład czasu poprawnej pracy zespołów należących do układu: transport urobku

Fig. 4.8. Time distribution of a correct work of the operation of the assemblies belonging to the output transport system



Rys. 4.9. Rozkład czasu poprawnej pracy podzespołów należących do zespołu: przenośniki taśmowe
Fig. 4.9. Time distribution of a correct operation of sub-assemblies belonging to the belt conveyor assembly



Rys. 4.10. Rozkład czasu poprawnej pracy podzespołów należących do zespołów: leje, odbojnice i bębny odbojowe

Fig. 4.10. Time distribution of a correct operation of sub-assemblies belonging to the following assemblies: hoppers, guard timbers and drums

Ze względu na zdefiniowanie niezawodności przez gotowość obiektu konieczne jest obliczanie odpowiednich wskaźników na podstawie oszacowanych z danych doświadczalnych wskaźników nieuszkodzalności i naprawialności. W praktyce możliwe jest określenie stacjonarnych wartości współczynnika gotowości.

Na rysunkach 4.11–4.13 pokazano wykresy Ishikawy charakteryzujące układy i elementy ładowarki budowlanej Ł-220 [59, 60, 165]. Główny pień wykresu reprezentuje poziom dekompozycji – maszyna. Kolejne gałęzie odpowiadają najważniejszym, ze względu na przyjęte kryterium, układom funkcjonalnym, a gałęzie II rzędu – najważniejszym elementom.

Na rysunku 4.11 przedstawiono układy i elementy o najkrótszym średnim czasie poprawnej pracy, na rysunku 4.12 – o najdłuższym średnim czasie naprawy, a na rysunku 4.13 – o najmniejszych wartościach współczynnika gotowości.

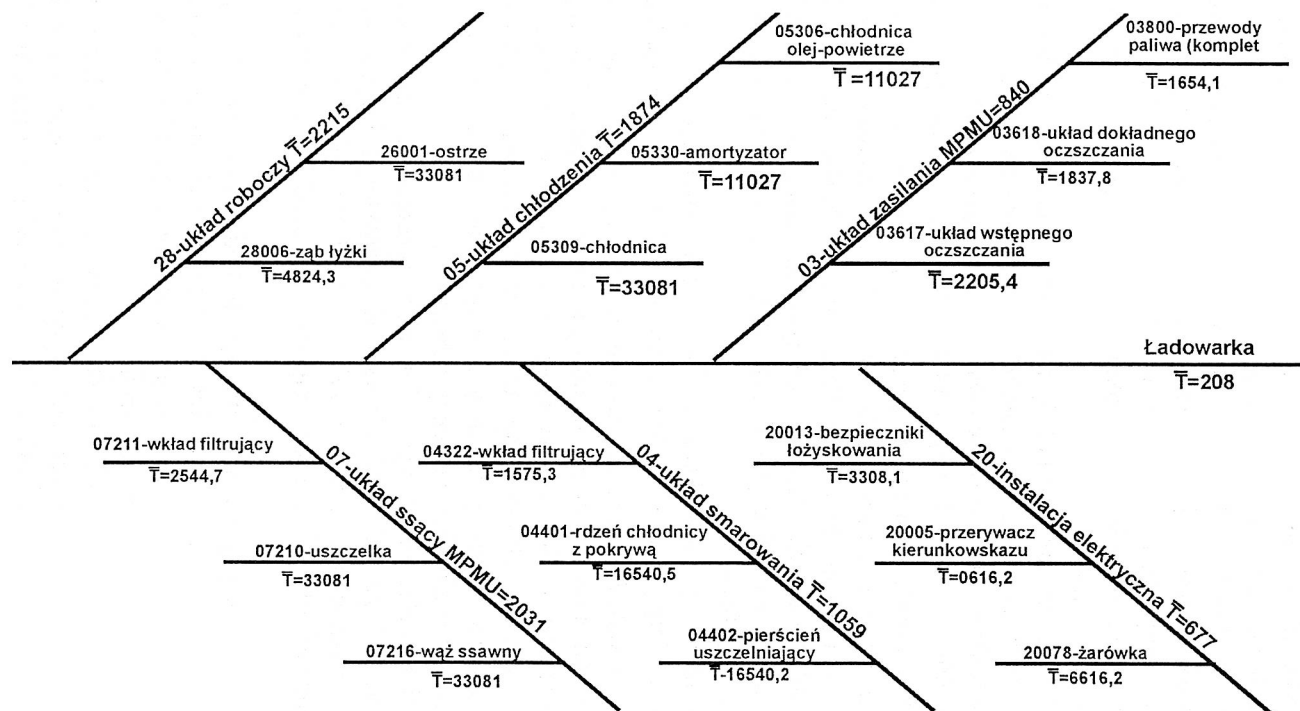
Wśród elementów o najmniejszej wartości średniego czasu poprawnej pracy ($\bar{T} < 10\,000$ mtg) dominują elementy przeznaczone do częstej wymiany podczas obsługi technicznych, np. filtry, bezpieczniki. Na 235 uszkodzonych w okresie badań elementów 26 spełnia podane kryterium. Ponad 40% uszkodzeń dotyczy elementów trzech układów funkcjonalnych: instalacji elektrycznej, układu zasilania i układu smarowania. Najistotniejszymi przyczynami uszkodzeń są: wada produkcyjna (14,0%) i wada materiałowa (12,0%).

Wśród elementów o największych wartościach średniego czasu naprawy ($\bar{T}_n > 1000$ min) dominują najczęściej inne elementy niż w zbiorze wyselekcjonowanym ze względu na wskaźniki nieuszkodzalności. Łączny czas naprawy elementów czterech układów (zmiennik momentu, układ hydrauliczny II, przekładnie, podwozie i nadwozie) wynosi prawie 50% sumarycznego czasu naprawy wszystkich układów. Wprowadzone do bazy danych informacje dotyczące czasu naprawy są kontrowersyjne. Można przypuszczać, że czasy naprawy są rozpisywane z czasów naprawy węzła konstrukcyjnego; często na podstawie oceny subiektywnej.

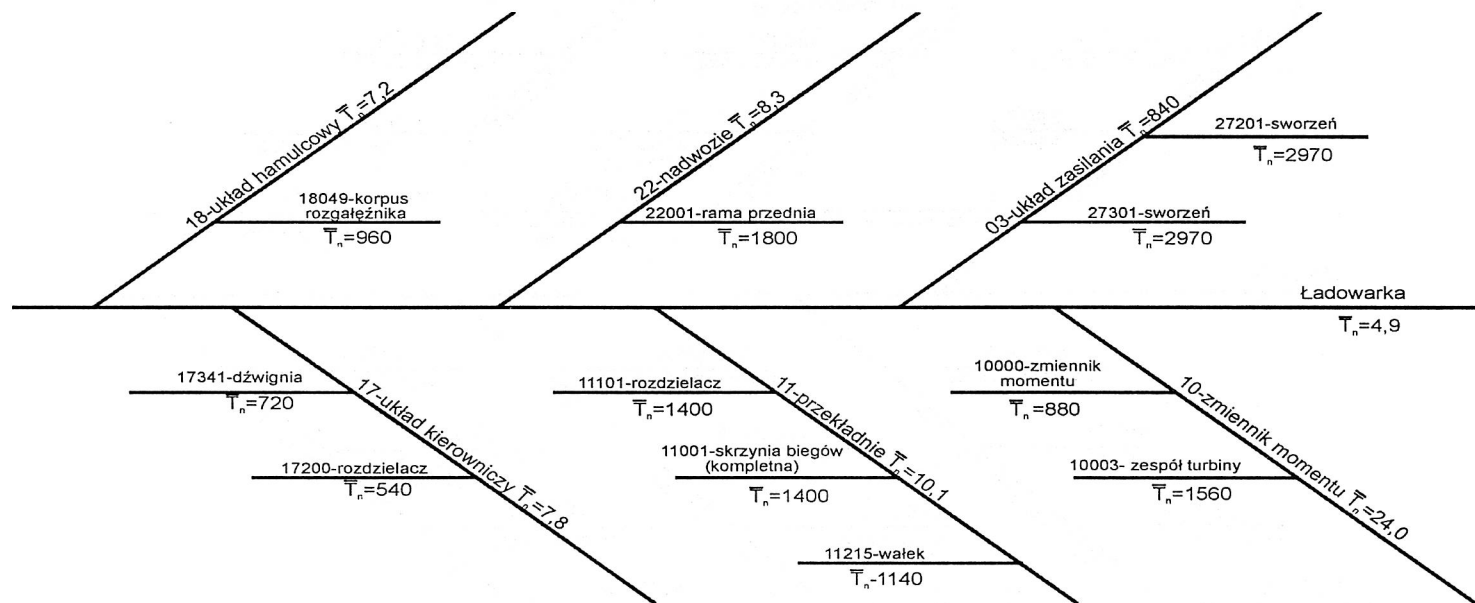
Porównanie zbioru elementów wyróżnionych ze względu na niski współczynnik gotowości technicznej ze zbiorami elementów charakteryzujących się wysoką uszkadzalnością i niską naprawialnością wykazuje większy wpływ na współczynnik gotowości technicznej długich czasów naprawy niż krótkich czasów poprawnej pracy.

Elementy nadwozia czy przekładni ulegają uszkodzeniom sporadycznie. Jeżeli przyjąć, że koszty eksploatacji są skorelowane z gotowością obiektu, to problemy z uzyskaniem wiarygodnej oceny czasów naprawy w istotny sposób mogą wpływać na podejmowane decyzje w procesie eksploatacji.

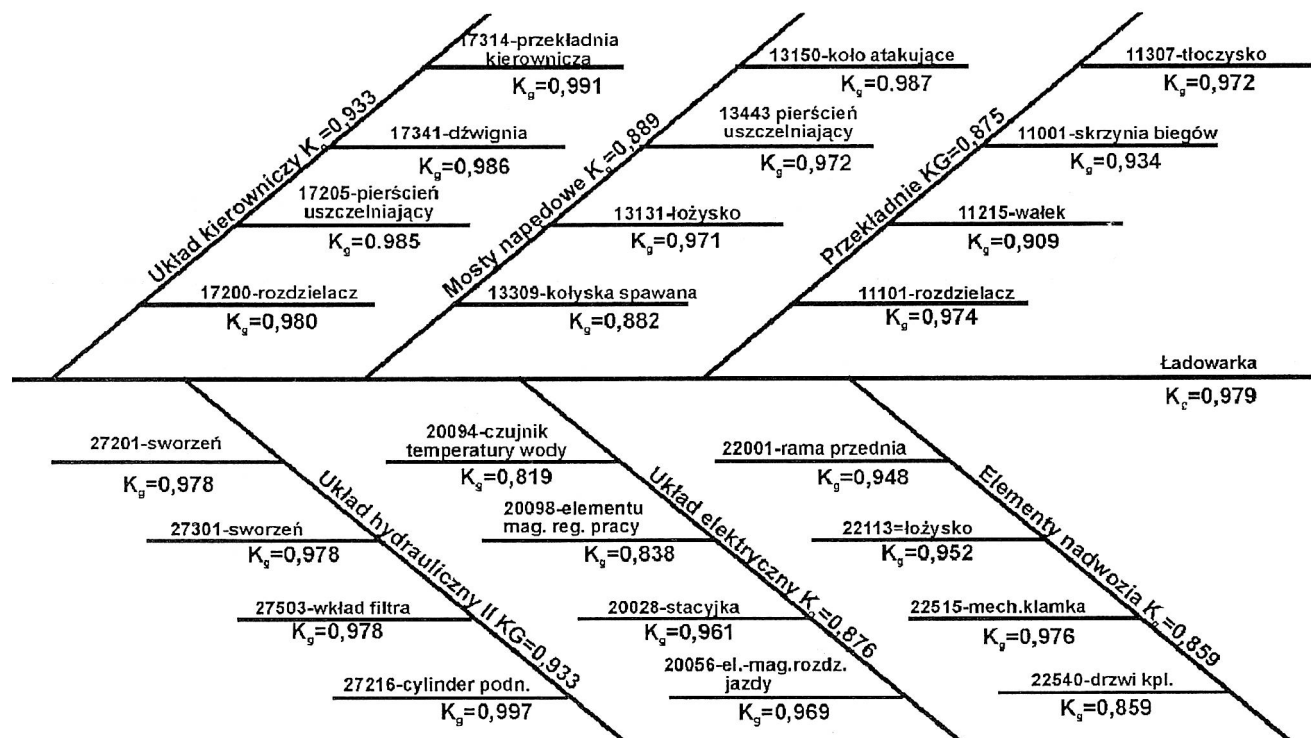
W badaniach niezawodności realizowanych na podstawie archiwalnych informacji eksploatacyjnych nie udało się uwzględnić wpływu czasu na wartości wskaźników niezawodności elementów maszyn. Mimo dużej liczności próby (tabela 1.1), występujące braki danych pozwoliły na oszacowanie odpowiednich charakterystyk tylko na poziomie obiektu.



Rys. 4.11. Średni czas poprawnej pracy ładowarki L-220, mtg
 Fig. 4.11. Mean time of a correct operation of the L-220 loader, mtg

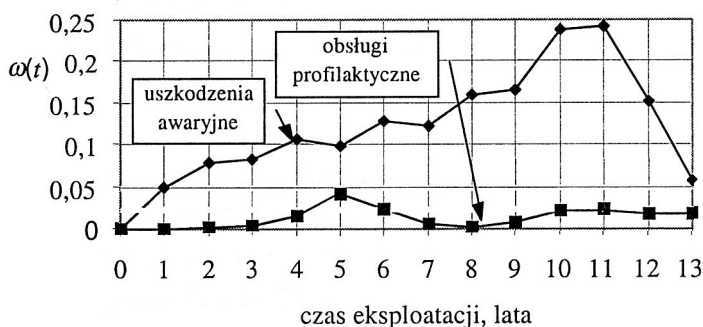


Rys. 4.12. Średni czas naprawy ładowarki Ł-220, min
 Fig. 4.12. Mean time of repair of the L-220 loader, min



Rys. 4.13. Współczynniki gotowości ładowarki Ł-220
Fig. 4.13. Availability coefficient of the Ł-220 loader

Na rysunku 4.14 pokazano wyniki oszacowania dla barki pchanej [105, 108].



Rys. 4.14. Rozkłady parametru strumieni uszkodzeń i obsług barki pchanej BP-500

Fig. 4.14. Distributions of the failure rate and repair rate of a dumb barge

Widoczny jest spadek intensywności uszkodzeń awaryjnych po obsłudze profilaktycznej wykonywanej po około 10 latach eksploatacji. Różnice w interpretacji pojęcia „naprawa bieżąca” w poszczególnych stocznich (wynikające z prowadzonej przez przedsiębiorstwa polityki ekonomicznej) pozwoliły tylko na oszacowanie przedziału zmienności intensywności występowania tego rodzaju obsług ($0,02 < \omega < 0,05$).

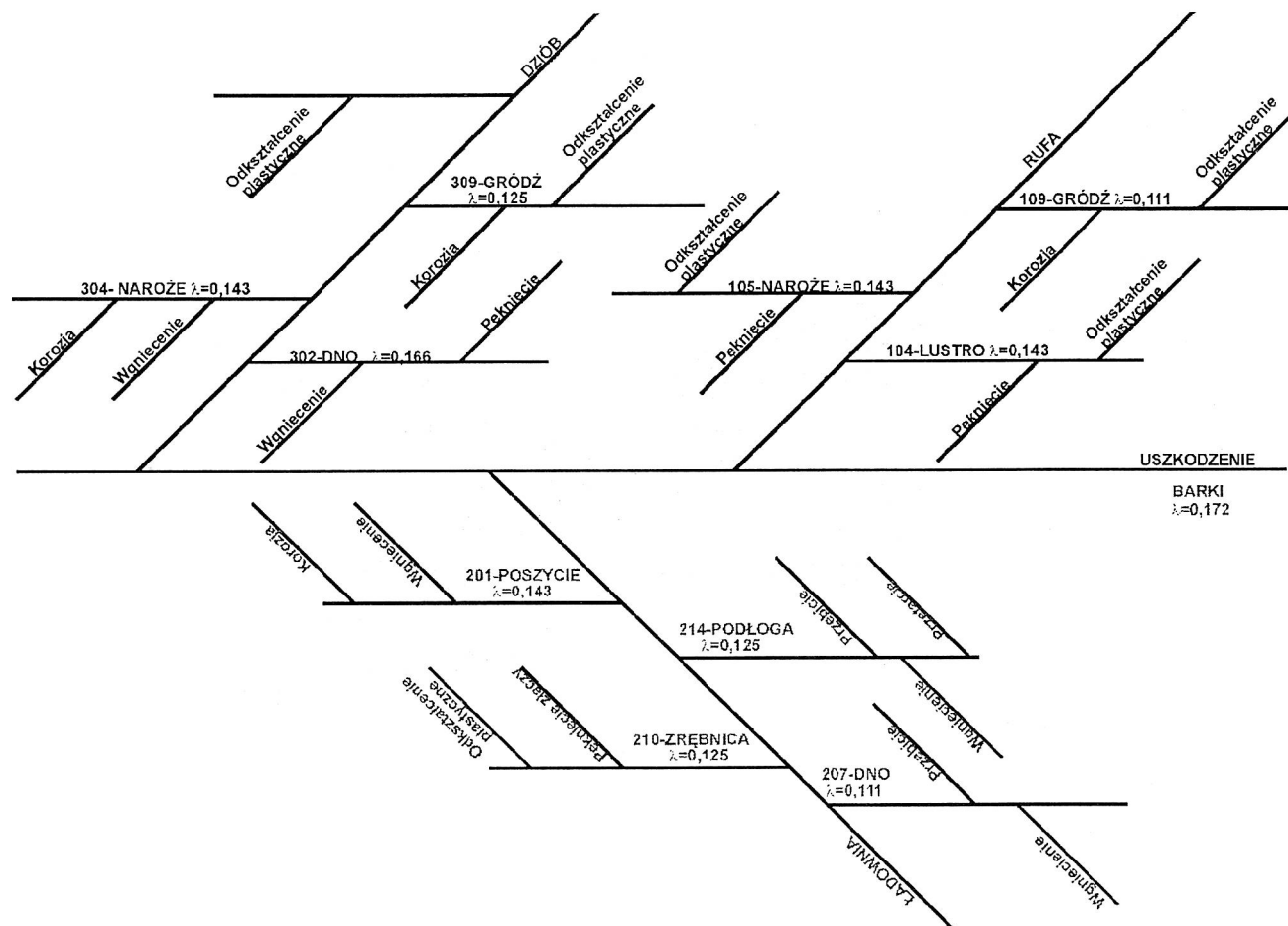
Uszkodzalność poszczególnych elementów barki została scharakteryzowana średnim czasem poprawnej pracy do naprawy (poawaryjnej, profilaktycznej lub bieżącej – rys. 4.15).

Najistotniejszą przyczyną powstawania uszkodzeń (rys. 4.16) są odkształcenia plastyczne wywołane uderzeniami i korozją (średnia szybkość korozji dochodzi do 0,5 mm/rok, przy grubości blach poszycia 5–8 mm).

Czasy (pracochłonność) poszczególnych czynności wykonywanych podczas naprawy barek zostały unormowane przez przedsiębiorstwo i rzeczywistego czasu trwania naprawy lub czasu oczekiwania na naprawę nie rejestrowano w dokumentacji eksploatacyjnej.



Rys. 4.15. Średni czas pracy do uszkodzenia elementów barki pchanej
 Fig 4.15. Mean time of operation to dumb barge elements failure

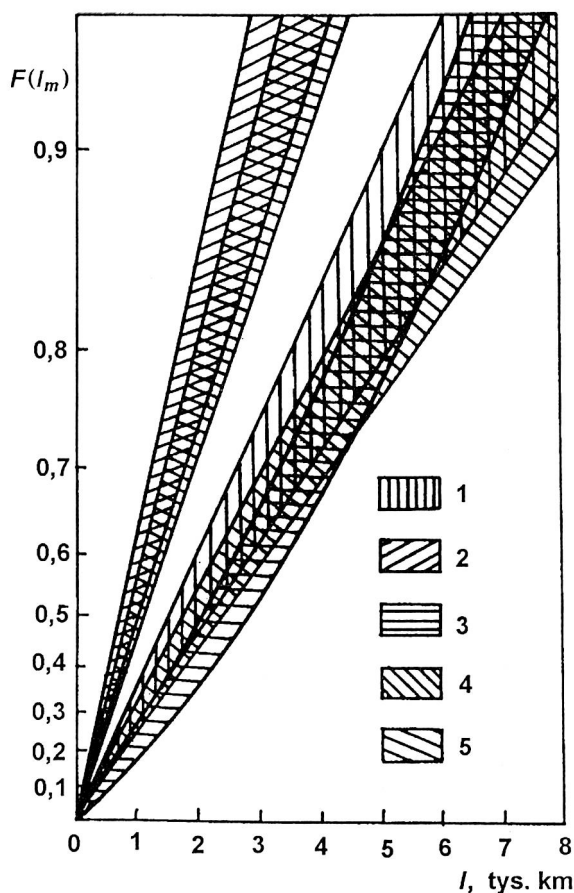


Rys. 4.16. Przyczyny powstawania uszkodzeń barki BP-500
Fig. 4.16. Causes of failures of BP-500 barges

4.2. WPŁYW OTOCZENIA

W zrealizowanych badaniach obiektów mechanicznych (tab. 1.1) wpływ otoczenia na niezawodność maszyn analizowano w badaniach autobusów miejskich [96, 112] i ładowarek budowlanych [62, 165]. Najdokładniej zanalizowano autobusy, nie tylko uzasadniając, że charakterystyki niezawodności obiektu, układu i elementu różnią się dla maszyn eksploatowanych w różnych środowiskach eksploatacji, ale także poszukując przyczyn występujących zmienności.

Na poziomie złożoności „obiekt” można było oszacować charakterystyki funkcyjne niezawodności. Przedziały ufności dystrybuanty rozkładu przebiegu między uszkodzeniami autobusu pokazano na rysunku 4.17.

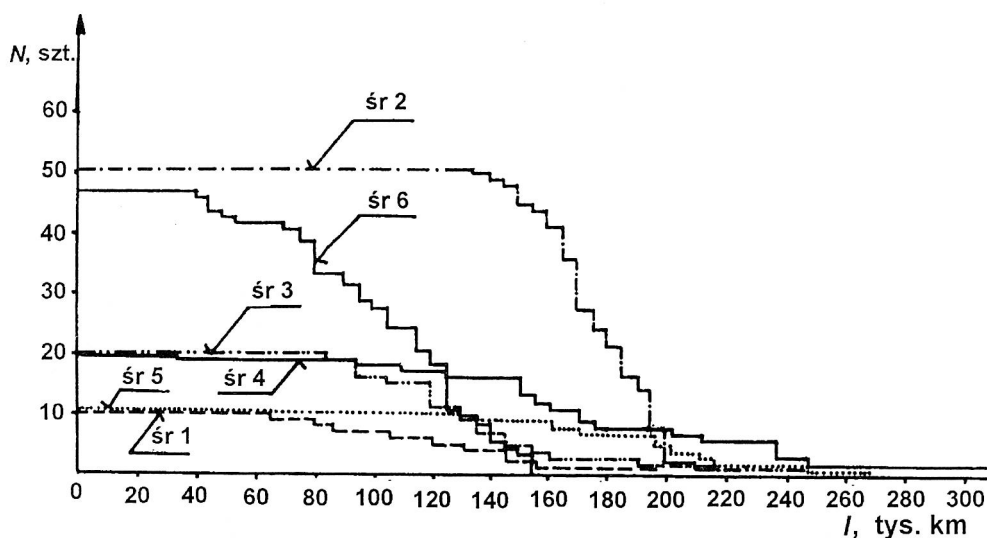


Rys. 4.17. Przedziały ufności dystrybuant przebiegu autobusu między uszkodzeniami w środowiskach eksploatacji

Fig. 4.17. Confidence intervals of the distribution function of bus mileage between failures in operation environments

Zastosowano siatkę prawdopodobieństwa rozkładu wykładniczego. W poszczególnych środowiskach rozkłady różnią się nie tylko parametrami, ale także rodzajem rozkładu – w środowisku 3 przebieg aproksymowano rozkładem Weibulla. Można wyróżnić dwie grupy środowisk o podobnym oddziaływaniu na nieuszkodzalność autobusu.

Podobnie zróżnicowana jest trwałość pojazdów. Scharakteryzowano ją przebiegiem do naprawy renowacyjnej NR (nietyпова obsługa przywracająca stan zdatności autobusu, wykonana przez producenta) – rysunek 4.18. Średni przebieg do NR wynosił 160 tys. km; w środowiskach od 131 tys. km (środowisko 4) do 185 tys. km (środowisko 5). O ile w środowisku 6 autobusy nie przekroczyły 155 tys. km, o tyle w środowisku 4 jeden autobus przejechał ponad 300 tys. km.

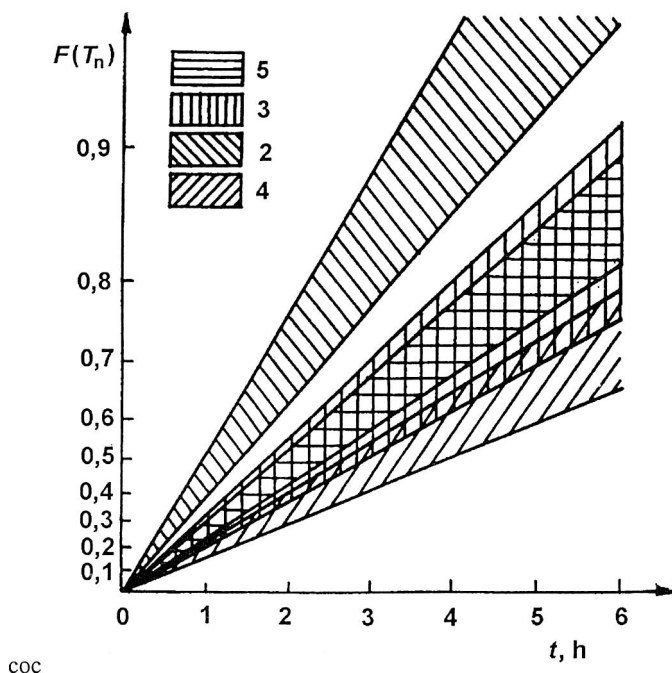


Rys. 4.18. Przebieg pojazdów skierowanych do naprawy renowacyjnej
Fig. 4.18. Distribution of the number of vehicles subjected to renovation repair

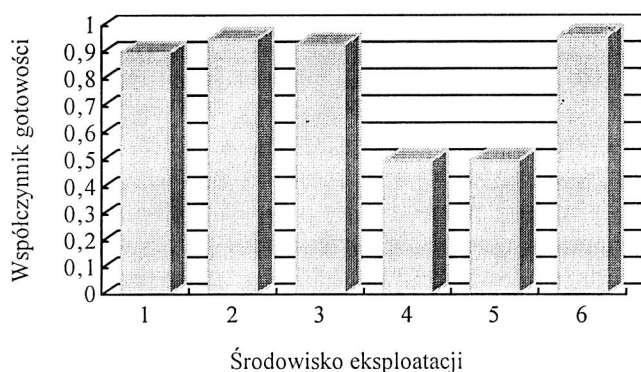
Średnie czasy naprawy autobusów także istotnie różnią się w poszczególnych środowiskach: od 1,57 h (środowisko 2) do 7,86 h (środowisko 1). Średni czas naprawy w próbie wynosił 2,76 h. Przedziały ufności dystrybucji czasu naprawy silnika – traktowanego jako całość – pokazano na rysunku 4.19. Proporcje między średnimi czasami naprawy silnika są podobne do proporcji między czasami naprawy autobusu w środowiskach.

Tak duże zróżnicowanie we współczynnikach nieuszkodzalności i naprawialności wyraża się zmiennością współczynnika gotowości w poszczególnych środowiskach. Jest to charakterystyczne nie tylko dla autobusów w wersji miejskiej, ale także wersji międzymiastowej (rys. 4.20).

Przyczyn powodujących zmienność niezawodności poszukiwano w otoczeniu podsystemu użytkowania [112] i podsystemu obsługi [96].



Rys. 4.19. Przedziały ufności dystrybuant czasu naprawy silnika w środowiskach eksploatacji
Fig. 4.19. Confidence intervals of the distribution functions of engine repair time in operation environments



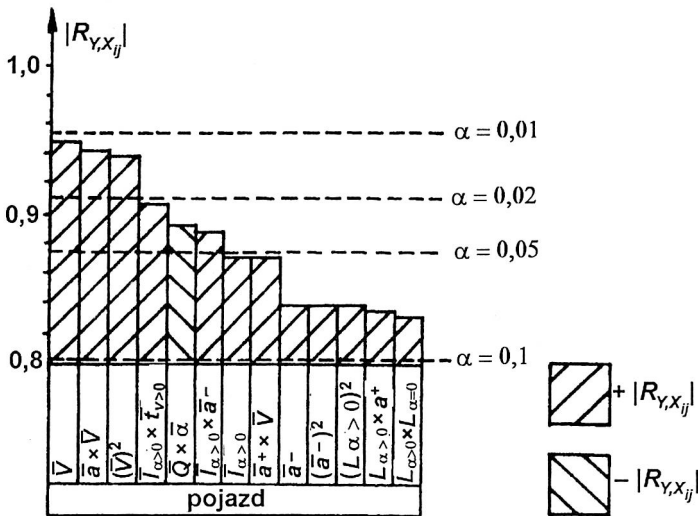
Rys. 4.20. Średnie wartości współczynnika gotowości autobusu w środowiskach eksploatacji
Fig. 4.20. Mean values of the availability coefficient of a bus in operation environments

Wyniki badań [112] pozwoliły na zbudowanie modelu warunków użytkowania autobusu i określenie czynników wpływających na nieuszkodzalność pojazdu. Na podstawie modelu regresyjnego stwierdzono, że średni czas między uszkodzeniami autobusu rośnie wówczas, gdy jest użytkowany w warunkach ruchu swobodnego (rys.

4.21). Funkcja regresji określająca średni przebieg między uszkodzeniami autobusu ma postać

$$\bar{l} = -1,81 + 0,17 \bar{v}, \quad (4.1)$$

gdzie $\bar{v}$ – średnia prędkość jazdy.



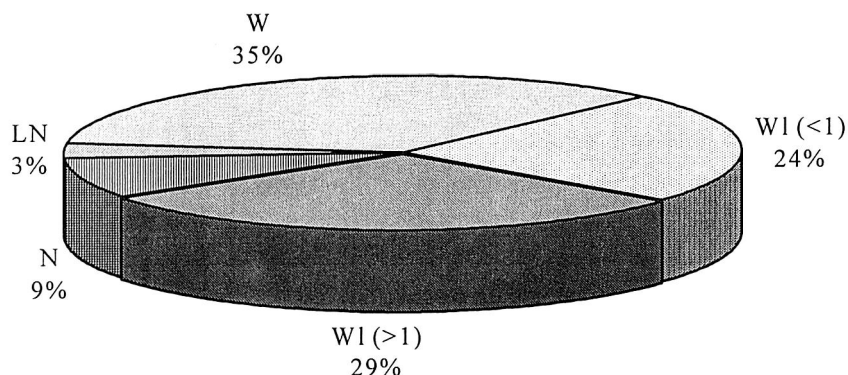
Rys. 4.21. Współczynniki korelacji między parametrami warunków użytkowania a średnim przebiegiem między uszkodzeniami autobusu

Fig. 4.21. Coefficients of correlation between the parameters of operating conditions and mean mileage between a bus failures

Warunki obsługiwanego [96] badano metodą wywiadów z pracownikami bazy obsługowej i analizy stosowanych w niej dokumentów źródłowych i wtórnych. Wykazano nieprzystosowanie systemu obsługowego do przyjęcia do eksploatacji autobusu nowej generacji, co w istotny sposób wpłynęło na obniżenie jego niezawodności. Wskazano na cechy kierowców i pracowników obsługi wpływające na zwiększenie uszkodzalności pojazdów (m.in.: mały staż pracy w przedsiębiorstwie komunikacyjnym, wiek i stan cywilny, kategorie prawa jazdy lub organizację czasu pracy).

Na poziomie złożoności „układ” możliwości wnikliwej analizy przyczyn powodujących spadek niezawodności obiektu są bardzo ograniczone. W tabeli 4.1 zestawiono rodzaje rozkładów prawdopodobieństwa przebiegu układów autobusu (bez silnika) między uszkodzeniami oraz wartości współczynnika zmienności współczynnika adaptacji v_A .

Tylko dla 3 układów (z 14 analizowanych) można było oszacować rozkłady prawdopodobieństwa we wszystkich środowiskach eksploatacji. W pozostałych przypadkach brak było dostatecznej ilości danych. Najczęściej aproksymowano przebieg między uszkodzeniami rozkładem wykładniczym (rys. 4.22).



Rys. 4.22. Udziały rodzajów rozkładów prawdopodobieństwa nieuszkodzalności układów autobusu
Fig. 4.22. Various kinds of probability distributions of reliability of bus systems

Wartości współczynnika zmienności v_A wskazują na zróżnicowanie wartości oczekiwanej przebiegu między uszkodzeniami układów między poszczególnymi środowiskami eksploatacji. Im wartość współczynnika jest większa, tym różnice między wartościami oczekiwanymi są większe. Najmniejsze wartości współczynnika są zbliżone do wartości współczynnika obliczonej dla całego pojazdu $v_A = 0,35$ (tab. 4.1).

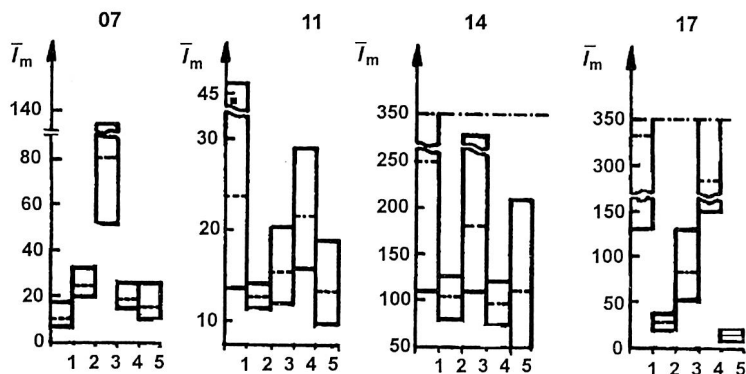
Tabela 4.1. Charakterystyki nieuszkodzalności układów autobusu

Układ		Środowisko					v_A
kod	nazwa	1	2	3	4	5	
07	sprzęgło	W1 (<1)	W1 (<1)	W1 (<1)	W1 (>1)	W	0,92
08	skrzynia biegów	–	W1 (<1)	–	W1 (>1)	–	0,26
09	oś tylna	–	–	W1 (>1)	W1 (>1)	–	0,68
10	tylny most	–	W1 (>1)	W1 (>1)	–	–	0,38
11	hamulcowy	W1 (<1)	W1 (>1)	W	W1 (>1)	W	0,34
12	koła jezdne	–	W1 (<1)	–	–	–	0,73
13	kierowniczy	–	W	–	LN	–	0,40
14	zawieszenie przednie	–	N	–	N	–	0,44
15	zawieszenie tylne	W	W	W	W1 (<1)	W	0,37
16	wał napędowy	–	N	–	–	–	0,35
17	pneumatyczny	–	W	W1 (>1)	–	W1 (<1)	1,0
18	ogrzewanie i wentylacja	–	W1 (<1)	–	–	W	0,93
19	elektryczny	–	–	W	W1 (<1)	W	1,52
20	nadwozie	W1 (>1)	W	W1 (>1)	W1 (<1)	–	0,91

Oznaczenia rozkładów: W – wykładniczy, W1 (<1) – Weibulla z parametrem kształtu mniejszym od 1, W1 (>1) – Weibulla z parametrem kształtu większym od 1, N – normalny, LN – logarytmnormalny.

Przedziały ufności wartości oczekiwanej przebiegu między uszkodzeniami układów uznanych za odporne na oddziaływanie otoczenia (np. 11 i 14) oraz podatnych na taki wpływ (np. 07 i 17) pokazano na rysunku 4.23. Odpowiednie funkcje regresji

wielokrotnej wiążącej średni przebieg układu z parametrami warunków użytkowania zestawiono w tabeli 4.2.



Rys. 4.23. Przedziały ufności przebiegu między uszkodzeniami wybranych układów w środowiskach eksploatacji

Fig. 4.23. Confidence intervals of mileage between failures of the selected systems in operation conditions

Tabela 4.2. Postacie funkcji regresji dla wybranych układów autobusu

Kod układu	Funkcja regresji	Współczynnik korelacji
07	$-157,9 + 243,8 \bar{\alpha} \bar{a}$	0,928
11	$4,68 - 0,54 \bar{\alpha} \bar{a} - 0,014 \bar{v} \bar{t}_{v=0}$	0,948
14	$-281,6 + 0,02 \bar{\delta} \bar{t}_{\alpha=0} + 3,67 \bar{Q} \bar{a}$	0,967
17	$117,9 - 15,96 \bar{Q} \bar{\alpha} - 0,073 \bar{Q} \bar{t}_{\alpha>1}$	0,892

Oznaczenia: $\bar{a}$ – średnie opóźnienie jazdy, $\bar{\alpha}$ – średni kąt skrętu kół przednich, $\bar{v}$ – średnia prędkość jazdy, $\bar{t}_{v=0}$ – średni czas jazdy na wprost, $\bar{Q}$ – średnie obciążenie względne pojazdu, $\bar{\delta}$ – średnia wartość współczynnika nierówności nawierzchni, $\bar{t}_{a=0}$ – średnia odległość przejechana na wprost, $\bar{t}_{\alpha>1}$ – średnia odległość przejechana po łuku.

Dla układów 14 i 17 [171] zanalizowano wpływ otoczenia metodą ryzyka proporcjonalnego PHM. Wybrane wyniki analizy zestawiono w tabeli 4.3. Podano wartości parametrów β oszacowanych dla istotnych czynników, prawdopodobieństwo p przypadkowego wystąpienia danego parametru i współczynnik M określający wpływ danego czynnika na bazową funkcję ryzyka. Jako podstawowe zmienne κ_1 – κ_3 przyjęto przebieg między uszkodzeniami w badanych środowiskach. Środowisko 2 przyjęto jako bazowe ze względu na największą liczbę próbek. Dodatkowo wprowadzono zmienną κ_6

$$\kappa_6 = \begin{cases} 1 - \text{pierwsze zdarzenie,} \\ 0 - \text{następne zdarzenia.} \end{cases} \quad (4.2)$$

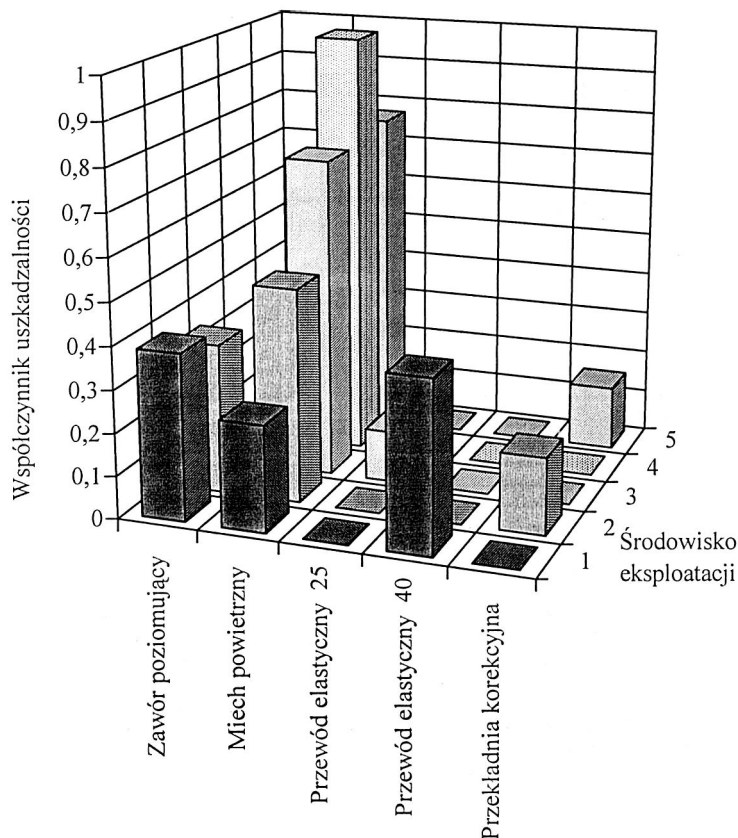
Dla obu układów otrzymano modele na wysokim poziomie istotności. Wyniki wskazują na mniejsze ryzyko pojawienia się pierwszego uszkodzenia niż następnych. Podobnie jak przy poprzedniej metodzie, stwierdzono, że nie ma różnic w oddziaływaniu środowiska na układ 14, występują natomiast istotne różnice we wpływie otoczenia na układ 17. Nie ma różnicy między środowiskami 2 i 3, przebieg między uszkodzeniami w środowiskach 1 i 4 jest dłuższy, a w środowisku 5 krótszy niż w środowisku 2.

Metoda pozwala na oszacowanie zmiany niezawodności obiektu względem przyjętego środowiska bazowego.

Tabela 4.3. Wyniki analizy wpływu środowiska eksploatacji na niezawodność układu metodą PHM

Układ	14			17		
Parametry modelu	β	p	M	β	p	M
κ_1	0	0	0	-1,754	0,0014	0,17
κ_2	baza			baza		
κ_3	0	0	0	0	0	0
κ_4	0	0	0	-1,891	0,000	0,15
κ_5	0	0	0	0,954	0,000	2,60
κ_6	-1,386	0,000	0,25	-1,030	0,000	0,36
Współczynnik istotności (wartość krytyczna)*	30,900 (3,841)			161,243 (9,488)		

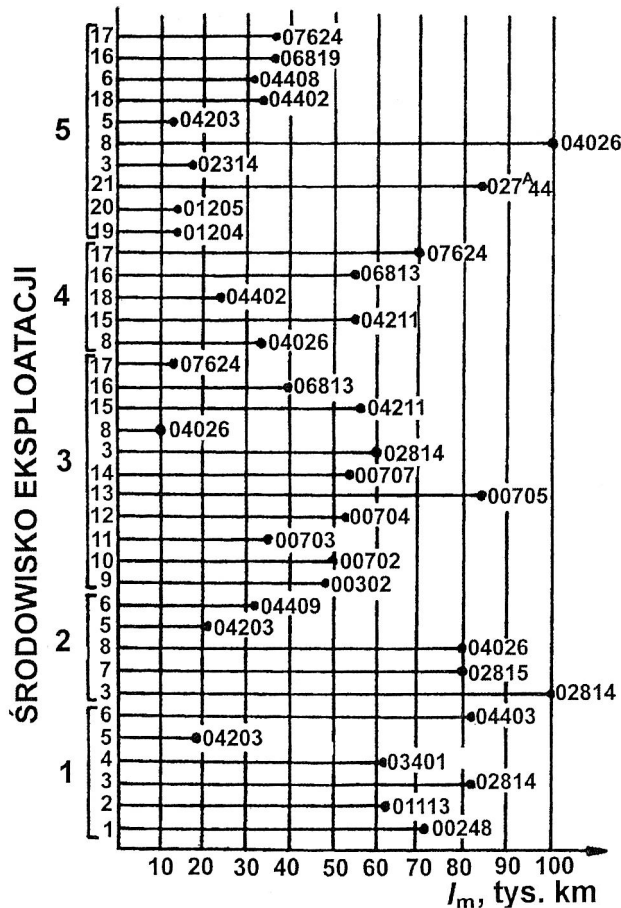
Na poziomie złożoności „element” tylko w nielicznych przypadkach udało się porównać nieuszkodzalność elementów w różnych środowiskach eksploatacji. Przedstawione przykłady dotyczą obiektu o największej liczności badanego zbioru (autobusu miejskiego) i układów najbardziej podatnych na oddziaływanie otoczenia. Na rysunku 4.24 przedstawiono wartości współczynników uszkadzalności elementów układu pneumatycznego uznanych w poszczególnych środowiskach eksploatacji za „słabe ogniwa”. Jedyńm elementem, którego uszkodzenia zarejestrowano we wszystkich 5 środowiskach eksploatacji jest miech powietrzny, którego wartości współczynnika uszkadzalności (udziału liczby uszkodzeń danego elementu w liczbie uszkodzeń wszystkich elementów układu) zawierają się w przedziale od 0,25 do 1,0. Pozostałe „słabe ogniwa” tego układu są charakterystyczne dla poszczególnych środowisk eksploatacji. Na rysunku 4.25 pokazano wartości średniego przebiegu między uszkodzeniami „słabych ogniw” silnika. Żaden element nie powtarza się we wszystkich środowiskach. Omawiany problem świadczy nie tylko o zróżnicowaniu uszkadzalności w poszczególnych środowiskach, ale także o pomijaniu w trakcie gromadzenia danych informacji o wymianie podlegających wymianie profilaktycznej (jak np. filtr oleju).



Rys. 4.24. Współczynniki uszkodzalności „słabych ogniw” układu pneumatycznego
Fig. 4.24. Failure coefficients of “weak elements” of a pneumatic system

4.3. WPŁYW DEFINICJI USZKODZENIA

Na podstawie funkcji Φ , którą ma spełniać obiekt, można ustalić taki zbiór wymagań ω_Φ cech obiektu, istotnych w danym zastosowaniu, że ich spełnienie jest warunkiem koniecznym i wystarczającym poprawnego spełnienia przez obiekt funkcji Φ [74]. Zbiór ustalonych wymagań ω_Φ określa zbiór fizycznych stanów zdolności obiektu przy danej funkcji Φ , a więc pozwala na zdefiniowanie czy nastąpiła zmiana stanu niezawodnościowego (uszkodzenie lub naprawa) obiektu. Zbiory wymagań określających stan niezawodnościowy obiektu są różnie definiowane, m.in. w zależności od fazy istnienia obiektu (faza początkowa – projektowania i wytwarzania [23], faza eksploatacji – diagnostyka stanu [149]). Wpływ mogą też mieć inne, nietechniczne czynniki, np. polityczne, gospodarcze.



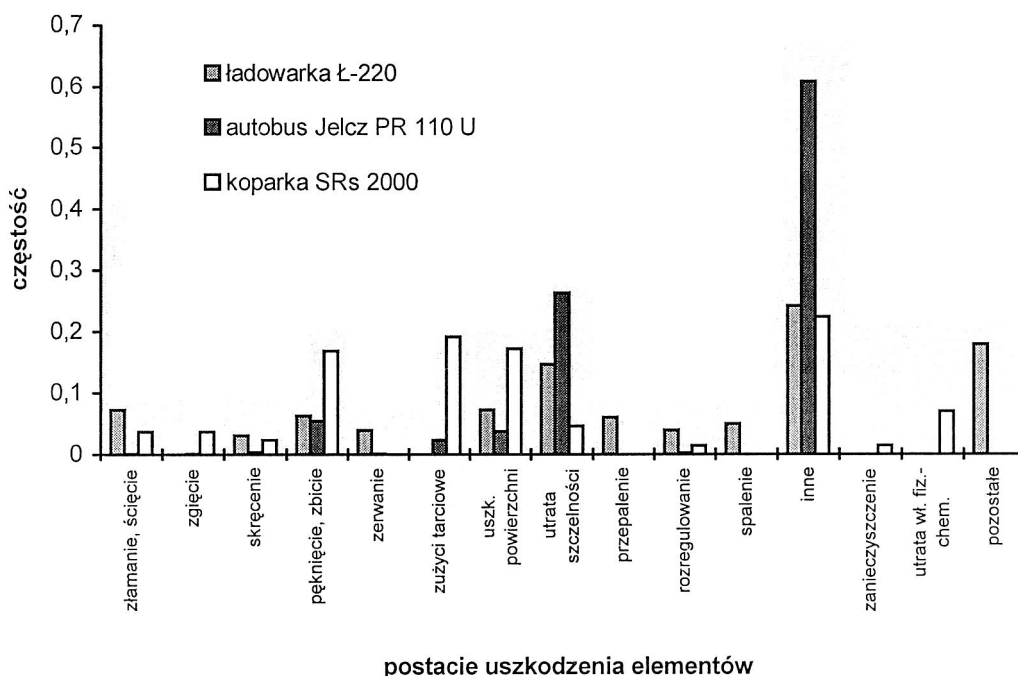
Rys. 4.25. Średni przebieg między uszkodzeniami „słabych ogniw” silnika
 Fig. 4.25. Mean mileage between failures “week elements” of an engine

Uzyskanie porównywalnych i powtarzalnych wyników oceny niezawodności elementu wymaga, aby w trakcie gromadzenia danych dotyczących chwili uszkodzenia lub naprawy w procesie eksploatacji wymagania definiujące stan zdatności obiektu były jednoznacznie określone. Zalecenia [134, 135] dotyczące realizacji badań niezawodnościowych obejmują specyfikację wymagań dotyczących parametrów obiektu, dotyczącą:

- funkcjonalnych parametrów obiektu, które będą kontrolowane podczas badań,
- sposobu i wymaganej dokładności pomiaru każdego kontrolowanego parametru,
- granicznej, dopuszczalnej wartości parametru, której przekroczenie należy traktować jako uszkodzenie.

Uzyskanie tak jednoznacznej interpretacji stanu niezawodnościowego obiektu w trakcie badań statystycznych lub eksperckich napotyka na różne trudności. Tylko

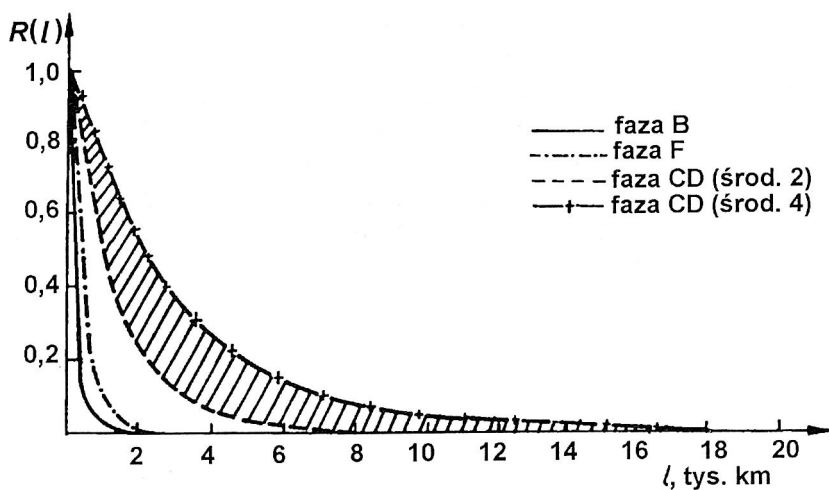
w niektórych obiektach mechanicznych są wbudowane systemy ciągłego monitorowania stanu niezawodnościowego maszyny (np. w samolotach). Najczęściej o przekroczeniu dopuszczalnego poziomu wartości parametru decyduje człowiek na podstawie obserwacji „organoleptycznej”. W razie wystąpienia uszkodzeń nagłych, katastroficznych jego ocena dobrze oddaje stan rzeczywisty obiektu. W przypadku natomiast uszkodzeń stopniowych, zużyciowych ocena człowieka jest subiektywna. Udział takich subiektywnych decyzji może wynosić nawet 84% (na rysunku 4.26 pokazano udział różnych rodzajów uszkodzenia elementów autobusu Jelcz PR 110 U [96], ładowarki Ł-220 [165] i koparki SRs 2000 [61]).



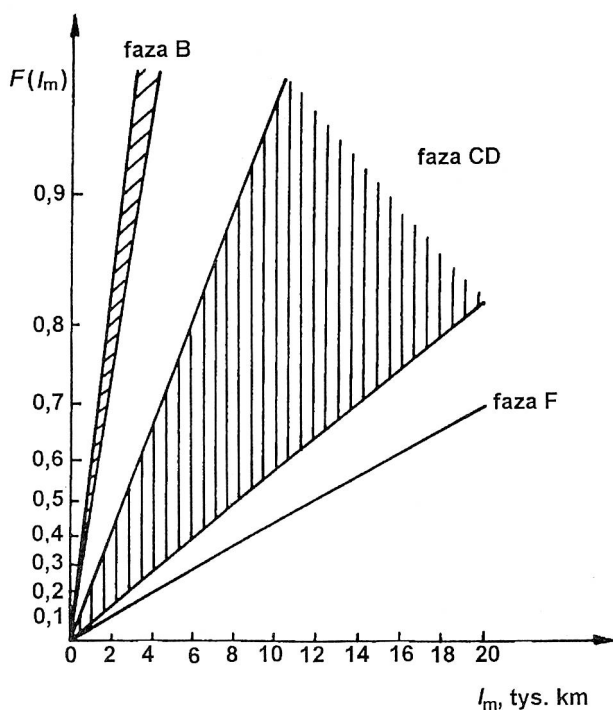
Rys. 4.26. Udziały poszczególnych postaci uszkodzenia elementów badanych obiektów mechanicznych
Fig. 4.26. Various kinds of failures of the elements of the mechanical objects tested

Ocena niezawodności nawet metodami statystycznymi jest więc w znacznym stopniu oceną subiektywną. O pewnej nieokreśloności diagnozy stanu obiektu świadczy także duży udział pozycji „inne”, tzn. brak odpowiedniej propozycji w zestawie kodów postaci uszkodzenia lub niewiedza (zła wola) osoby decydującej o zarejestrowaniu uszkodzenia.

Skutki różnic w interpretacji wymagań definiujących stan niezdatności obiektu pokazano na rysunkach 4.27 i 4.28. Porównano rozkłady przebiegu między uszkodzeniami kolejnych faz produkcyjnych autobusu i jego silnika.



Rys. 4.27. Funkcje niezawodności autobusu faz produkcyjnych B, CD, F
Fig. 4.27. Reliability functions of the bus B, CD, F production phases



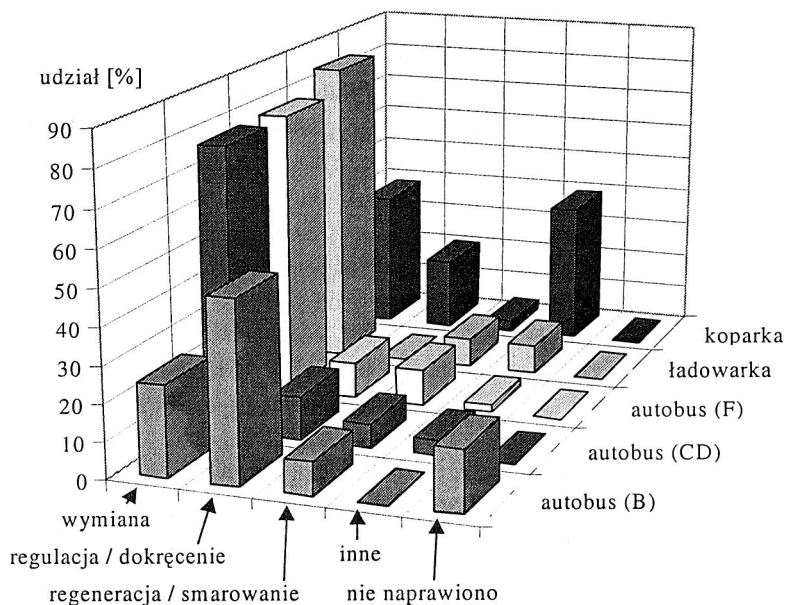
Rys. 4.28. Dystrybuanty przebiegu silnika między uszkodzeniami dla faz produkcyjnych B, CD, F

Fig. 4.28. Distribution functions of an engine mileage between failures for production phases

W trakcie badań zaobserwowano jednoznaczny wzrost niezawodności pojazdu m.in. ze względu na wprowadzone zmiany konstrukcyjne i technologiczne oraz stopniowe dopasowywanie warunków użytkowania i obsługi do wymagań stawianych przez nowoczesny autobus miejski. Autobusy fazy F były eksploatowane ze szczególną starannością i oszacowana niezawodność, gorsza niż w fazie CD, wynikała (po analizie bazy danych) z rejestrowania mało istotnych uszkodzeń, pomijanych w badaniach pozostałych zbiorów pojazdów.

Podobne problemy występują podczas uszczegółowienia informacji opisujących obsługę lub naprawę. Udziały podstawowych sposobów naprawy badanych maszyn pokazano na rysunku 4.29. W obiektach badanych przy udziale specjalnie przeszkolonych i dodatkowo opłacanych pracowników (autobusy fazy produkcyjnej CD i F, ładowarka), struktura informacji dotyczących napraw jest podobna – udział informacji „inne” jest mały (od 2 do 8%). Dla badań prototypowej serii autobusów (faza B) charakterystyczne jest występowanie odpowiedzi „nie naprawiono” – informacji, która nie pojawia się w innych badaniach, a najprawdopodobniej określa sytuacje, które zdarzają się w rzeczywistości. W badaniach koparek korzystano z informacji archiwalnych i eksperckich – prawie 40% danych nie pozwala na identyfikację sposobu naprawy.

Z omawianych przykładów wynika, że trudno jest traktować zbiór wymagań ω_ϕ jako parametry funkcji nieuszkodzalności. Odstępstwa od przyjętych zasad definiujących uszkodzenie obiektu lepiej charakteryzują niepewność uzyskanych ocen niezawodności.



Rys. 4.29. Udziały sposobów naprawy maszyn
Fig. 4.29. Various procedures of machine repair

5. ANALIZA NIEPEWNOŚCI DANYCH NIEZAWODNOŚCIOWYCH

Najbardziej miarodajną ocenę przydatności urządzenia do wykonywania przypisanych mu zadań można uzyskać w wyniku badań prowadzonych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Istnieje kilka rodzajów badań, które charakteryzuje się przymiotnikiem „eksploatacyjne” [1, 41]. Zazwyczaj przez badania eksploatacyjne rozumie się badania, których przedmiotem jest przebieg eksploatacji maszyny. Celem takich badań jest ocena charakterystyk procesu użytkowania i obsługiwanie maszyn.

Badania kompletnych obiektów technicznych (systemów) w ich naturalnych warunkach eksploatacji są prowadzone metodami statystycznymi (z obserwacji wybranych (wylosowanych) obiektów wyciąga się wnioski dotyczące wszystkich obiektów danego rodzaju; populacji generalnej) lub metodami eksperckimi (dane uzyskiwane są od osób uważanych za ekspertów).

Podstawowe trudności w realizacji badań eksploatacyjnych wynikają m.in. [1]:

- ze złożoności warunków występujących w środowisku, w którym działają badane obiekty,
- ze złożoności badanych obiektów, co uniemożliwia zastosowanie zasad redukcjonizmu,
- z braku ogólnie uznanych zasad realizacji podobnych eksperymentów.

Celem badań eksploatacyjnych jest uzyskanie danych niezbędnych do wyznaczenia wartości charakterystyk eksploatacyjnych i niezawodnościowych lub sprawdzenia zgodności wartości wskaźników z wymaganiami podanymi w dokumentacji technicznej lub umowach handlowych. Program badań eksploatacyjnych obejmuje zbieranie i opracowanie danych oraz ocenę wyników badań i ich wykorzystanie. Zbieranie i opracowanie danych wymaga przygotowania odpowiedniego systemu informacyjnego. Na system zbierania i opracowania danych eksploatacyjnych składają się [134, 135]:

- metody zbierania, rejestracji i przekazywania danych,
- metody przetwarzania danych,
- metody analizy danych i wykorzystania wyników analizy.

Struktura systemu informacyjnego zależy od ilości i jakości dostępnych źródeł informacji opisujących proces eksploatacji maszyn.

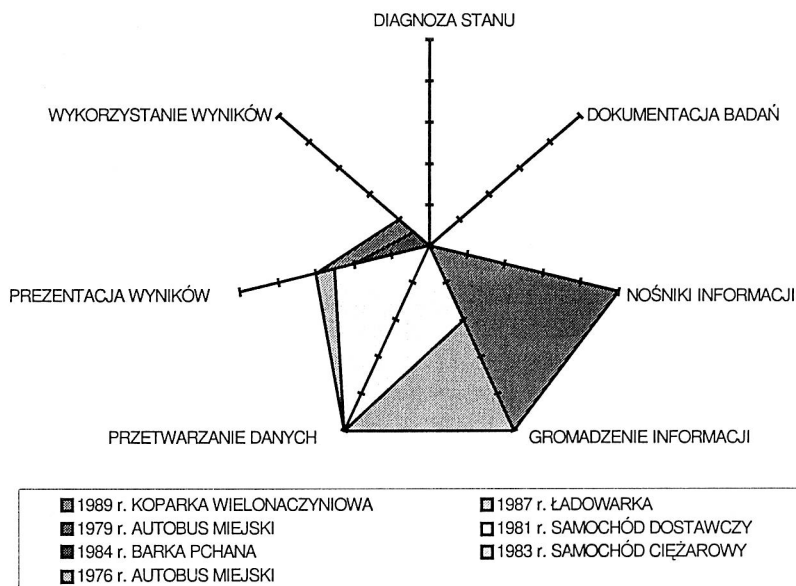
Analizę niepewności danych niezawodnościowych oparto na badaniach zrealizowanych w latach 1975–1997. Charakterystykę badań zestawiono w tabeli 5.1. Badaniami objęto w trzech przypadkach całą populację obiektów (samochód ciężarowy Fiat, barka pchana BP-500 i koparka wielonaczyniowa SRs-2000); w pozostałych przypadkach wylosowano próbki obiektów. Możliwości wyboru próbki są w rzeczywistych systemach eksploatacji ograniczone przede wszystkim kosztem badań.

Tabela 5.1. Charakterystyka badań niezawodności obiektów mechanicznych wykorzystanych w pracy

Obiekt badań	Charakterystyka badań			Źródła informacji		
	liczność próbek	liczba środowisk eksploatacji	czas badań lata	SNX *	DE *	eksperti
Autobus miejski Jelcz PR 110U	110	5	5	+	+	+
Autobus międzymiastowy Sanos	26	1	2	–	+	+
Samochód ciężarowy Kamaz	9	1	3	–	+	+
Samochód ciężarowy Skoda	10	1	4	–	+	+
Samochód ciężarowy Fiat	245	1	5	–	+	+
Śródlądowa barka pchana BP-500	480	1	16	–	+	–
Ładowarka budowlana Ł-220	15	5	2	+	–	+
Koparka wielonaczyniowa SRs-2000	5	1	4	+	–	+
Koparka wielonaczyniowa SchRs-1200	7	1	2	–	+	–
Koparka wielonaczyniowa SchRs-800	3	1	3 (4)	–	+	–

Oznaczenia: „+” – występuje, „–” – nie występuje, *) – p. 5.1.

Na rysunku 5.1 pokazano w sposób poglądowy stopień wspomagania komputerowego poszczególnych etapów badań eksploatacyjnych niezawodności. Wartość 1 oznacza, że dany etap badań jest w pełni skomputeryzowany i brak jest ingerencji człowieka w jego realizację.



Rys. 5.1. Stopień komputerowego wspomagania badań niezawodności maszyn
Fig. 5.1. Degree of computer aided of machine dependability tests

W analizowanych badaniach, na etapie diagnozy stanu i dokumentowania badań nie wprowadzono takiego wspomagania. Uznano więc, że wobec wysokiej niezawodności działania komputera, podstawowym czynnikiem obniżającym pewność oceny niezawodności jest możliwość wprowadzania błędów i pomyłek przez człowieka na początkowych etapach prowadzenia badań.

5.1. BADANIA STATYSTYCZNE

W rezultacie badań statystycznych powstają banki danych niezawodnościowych [4, 85, 147]. Informacje gromadzone w bazach danych mogą pochodzić z różnych źródeł:

- specjalnie zaprojektowanych i wdrożonych w systemach eksploatacji maszyn systemów informacyjnych i informatycznych (SNX),
- dokumentacji eksploatacyjnej istniejącej w systemach eksploatacji obiektów (DE).

5.1.1. SYSTEM BADAŃ NIEZAWODNOŚCI OBIEKTÓW SNX

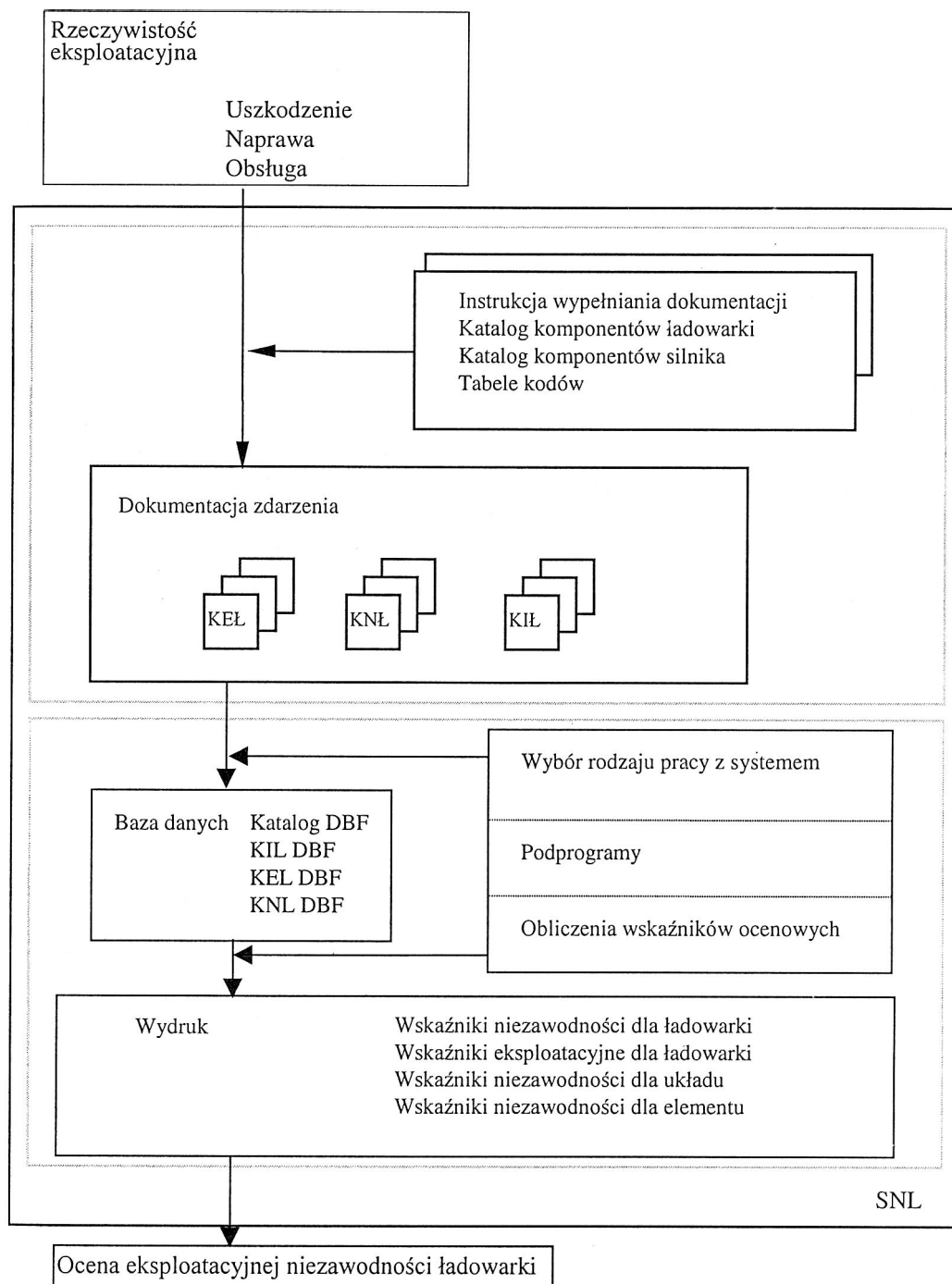
Specjalne systemy informacyjne i informatyczne zaprojektowano i uruchomiono w badaniach eksploatacyjnych autobusów Jelcz PR 110U (SBEN) [96], ładowarek budowlanych Ł-220 (SNŁ) [56, 165] i koparek wielonaczyniowych SRs-2000 (SNK) [58, 61] (tab. 5.1).

Systemy SNX są przystosowane do badań niezawodności maszyn użytkowanych i obsługiwanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Podstawowym celem działania systemu SNX jest dostarczenie udokumentowanych wskaźników i charakterystyk eksploatacyjnych i niezawodnościowych maszyny.

Systemy SNX składają się z podsystemu informacyjnego (SGI), służącego do gromadzenia informacji eksploatacyjnych, i podsystemu (SPD), przeznaczonego do przetwarzania baz danych. Jako przykład systemu SNX pokazano na rysunku 5.2 schemat systemu SNŁ.

Podsystem informacyjny SGI zawiera dokumentację badań, na którą składają się:

1. Trzy nośniki informacji:
 - karta identyfikująca obiekt i jego elementy oraz daty dotyczące przebiegu badań (KIŁ – karta identyfikacji ładowarki),
 - karta służąca do bieżącej rejestracji procesu eksploatacji maszyny oraz zużycia materiałów eksploatacyjnych (KEŁ – karta eksploatacji ładowarki),
 - karta zawierająca dane o chwili uszkodzenia i naprawy, miejscu uszkodzenia lub obsługi oraz kosztach naprawy (KNŁ – karta naprawy ładowarki).
2. Katalogi firmowe maszyny i silnika napędowego przystosowane do badań.
3. Instrukcja zawierająca dokładny opis wypełniania nośników informacji oraz tabele numerów kodowych cech charakteryzujących jakość uszkodzenia i naprawy.



Rys. 5.2. Schemat systemu informacyjnego SNŁ
Fig. 5.2. Diagram of the SNŁ information system

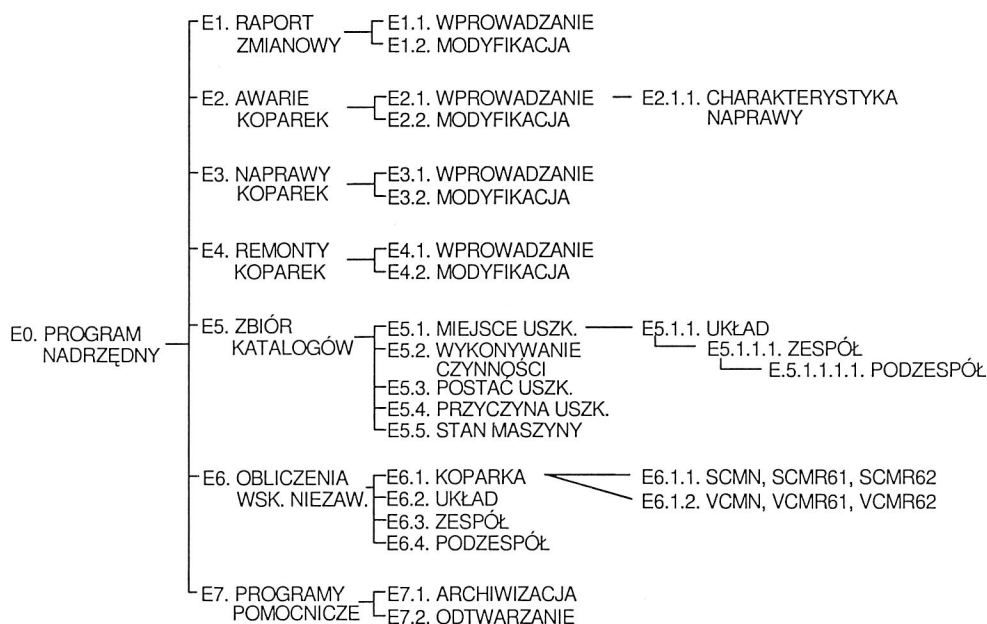
Maszyna jest dekomponowana zgodnie z jej budową konstrukcyjną na układy, zespoły, podzespoły i elementy. Wszystkie komponenty są identyfikowane przez numery kodowe (p. 3.1). Zbieranie informacji i wypełnianie nośników powierzono przeszkolonym w tym celu pracownikom przedsiębiorstw eksploatujących maszyny. Do wypełniania nośników służyły im aktualne dokumenty eksploatacyjne przedsiębiorstw.

Podsystem przetwarzania danych SPD obejmuje algorytmy obliczeń dwóch zasadniczych zbiorów wskaźników:

- trwałości i niezawodności, w tym: nieuszkodzalności, naprawialności i gotowości,
- eksploatacji, w tym m.in.: intensywności użytkowania i eksploatacji, zużycia materiałów eksploatacyjnych oraz przebiegu procesu eksploatacji.

Rozwój mikrokomputerów umożliwił gromadzenie danych bezpośrednio miejscu pracy maszyny. Można było pominąć etap tworzenia pośrednich nośników informacji i selekcjonować dane eksploatacyjne już po wprowadzeniu do komputera. Przykładem tak zaprojektowanego systemu jest SNK [56].

Układ programu SNK stwarza możliwość łatwego poruszania się po poszczególnych bazach i funkcjach obliczeniowych zapewniając dopisywanie i modyfikowanie istniejących już informacji. Możliwości interaktywnej pracy z systemem SNK pokazano na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. „Drzewo” wyboru opcji w systemie SNK
Fig. 5.3. The tree of an option selection in the SNK system

System obejmuje w swej strukturze m.in. cztery podstawowe bazy danych, związane z dokumentacją eksploatacyjną kopalni i strukturą konstrukcyjną koparki. Bazy danych RAPORT, REMONT, AWARIA są tworzone odpowiednio na podstawie raportów zmianowych, protokołów remontowych i protokołów awaryjnych oraz aktualizowane każdorazowo po powstaniu takiego dokumentu. Baza danych KATALOG zawiera zakodowaną postać struktury konstrukcyjnej, stanowiącą POMOC przy kodowym zapisie miejsca uszkodzenia. Zawartość informacyjna poszczególnych baz danych zależy od źródłowych dokumentów, których te bazy dotyczą (rys. 5.4).

BAZA RAPORT						
1. DATA	8	9	0	5	1 0	
2. NUMER ZMIANY	2					
3. SYMBOL BRYGADY	B					
4. WYDAJNOŚĆ – NADKŁAD	0	3	2	1	0 0	
5. WYDAJNOŚĆ – WĘGIEL	0	4	0	2	5 0	
* NAPRAWY						
6. NUMER KOPARKI	K	–	4	0		
7. LICZBA OSÓB			8			
8. POSTÓJ AWARYJNY – GODZINA	1	4	3	0		
* CZYNNOŚCI						
9. MIEJSCE	ZESPÓŁ BĘBNA NAP. + V					
10. RODZAJ	CZYSZCZENIE					
11. ZAKOŃCZONO (T/N)	T					

Rys. 5.4. Przykład zawartości bazy danych RAPORT w systemie SNK
Fig. 5.4. An example of the RAPORT data base in the SNK system

5.1.2. DOKUMENTACJA EKSPLOATACYJNA DE

W systemach eksploatacji maszyn istnieje wiele dokumentów zawierających informacje o niezawodności obiektów (służby serwisowe producenta, warsztaty naprawcze, stacje obsługowe itd.). Z dokumentacji eksploatacyjnej korzystano do oceny niezawodności pojazdów, barek pchanych i koparek wielonaczyniowych (tab. 5.1).

Przykład schematu przepływu informacji w badaniach typu DE zrealizowany dla barek pchanych BP-500 [108] pokazano na rysunku 5.5. Jako źródła informacji wykorzystano:

- aktualną i archiwalną dokumentację przeprowadzonych remontów, przechowywaną w poszczególnych stocznich (zlecenia produkcyjne, protokoły weryfikacyjne, karty technologiczne remontu, plany wierceń kadłuba),

- dokumentację prowadzoną przez Polski Rejestr Statków we Wrocławiu (świadczenia nadania, potwierdzenia lub odnowienia klasy, protokoły przyczyn i skutków awarii),

- dokumentację fotograficzną typowych uszkodzeń i elementów przeznaczonych do wymiany zgodnie z protokołem weryfikacyjnym,

- wyniki pomiarów grubości blach poszycia kadłuba.

Po analizie źródeł informacji (a zwłaszcza dokumentacji remontów barek) przygotowano dokumentację badań, na którą składają się:

- karty opisowe remontów (KOR), w których zestawiono wszystkie istotne (ze względu na cel badań) i możliwe do uzyskania informacje dotyczące każdego dokumentowanego remontu barki,

- karty badawcze elementów (KBE), które stanowią zestawienie wszystkich zebranych informacji o uszkodzeniach i naprawach jednego elementu,

- karta zbiorcza remontów (KZR), stanowiąca zestawienie informacji o remontach wszystkich wyprodukowanych barek BP-500.

Poszczególne karty służyły do weryfikacji danych i oszacowania wskaźników niezawodności.

W badaniach autobusu Sanos A14 i samochodów ciężarowych Kamaz 5320, Škoda, Liaz i Fiat 190 podstawowymi źródłami informacji były typowe dokumenty objętych badaniami przedsiębiorstw PKS i PEKAES [56]. W celu uzyskania jednorodnego zbioru informacji wyselekcjonowano dokumenty zawierające dane źródłowe (tab. 5.2).

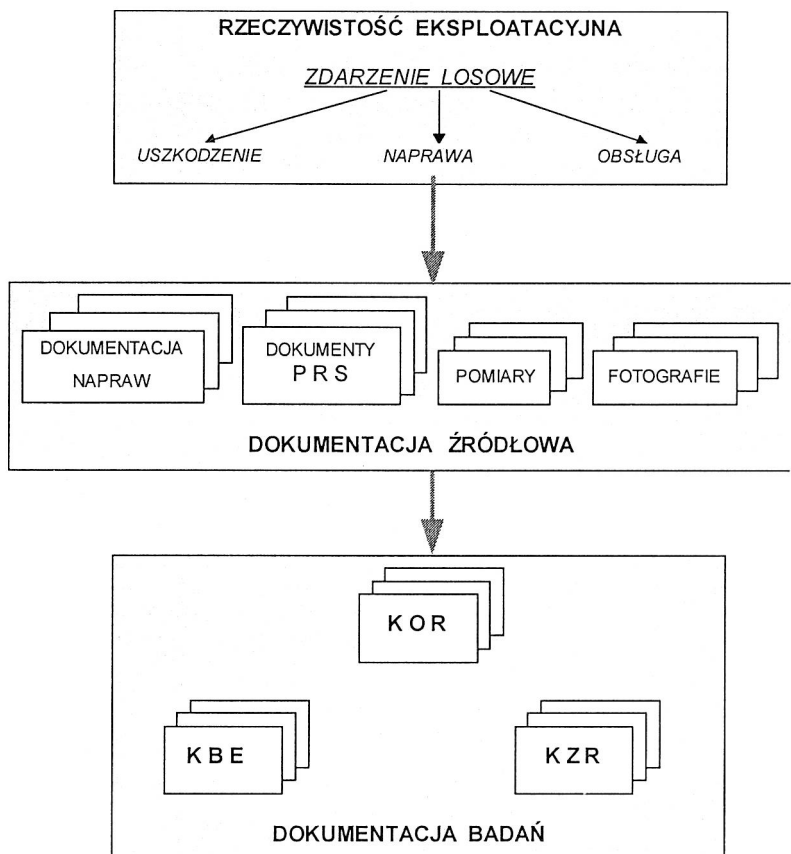
Tabela 5.2. Zestawienie dokumentów eksploatacyjnych stosowanych w badaniach samochodów ciężarowych i autobusu

Symbol dokumentu	Przedsiębiorstwo PKS	Przedsiębiorstwo PEKAES
A	ewidencja zużytych części przez poszczególne pojazdy (informacja o naprawach polegających na wymianie elementu)	karty magazynowe (informacje dotyczące ilości zużytych części zamiennych i ich cen)
B	książka obsług i napraw pojazdu	
C	karty magazynowe	
D	karta eksploatacyjno-paliwowa (podstawowe źródło do oceny zużycia materiałów eksploatacyjnych i czasu pracy pojazdu)	dokumentacja sprawozdawcza (zużycie materiałów pędnych, wykonane naprawy i obsługi techniczne)
E	raport dzienny sytuacji taborowej (dane służące do obliczania współczynnika gotowości technicznej)	
F	karta ewidencji przebiegu i obsług technicznych	
G	wywiady z pracownikami zaplecza technicznego	wywiady z pracownikami zaplecza technicznego

Na podstawie poszczególnych dokumentów obliczono podstawowe wskaźniki niezawodności pojazdów. Analiza obliczeń wykazała, że:

- brakuje udokumentowanych informacji dotyczących czasu lub pracochłonności napraw i obsług technicznych (udział informacji pochodzących z wywiadu wynosi ~30%),

- w najszerszym zakresie stosuje się karty magazynowe i książki obsług i napraw pojazdu (około 47% wskaźników),
- za najbardziej wiarygodne dokumenty uważa się karty magazynowe.



Rys. 5.5. Schemat przepływu informacji eksploatacyjnych w badaniach barek pchanych

Fig. 5.5. Diagram of the operation and usaintenance information exchange in the tests on dumb barges

5.1.3. PORÓWNANIE OCEN NIEZAWODNOŚCI NA PODSTAWIE SNX I DE

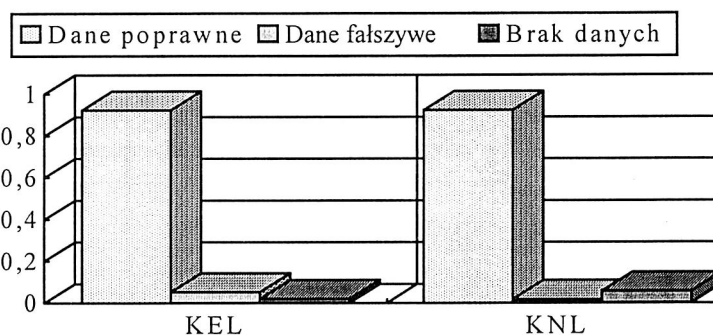
Na etapie gromadzenia informacji w bazie danych, podczas wypełniania dokumentacji badawczej, będącej podstawą oceny niezawodności, błędy powstają na skutek:

- zamierzonego wprowadzenia fałszywych informacji,
- przypadkowych błędów wypełniania nośników informacji (różnej interpretacji uszkodzenia),
- braku danych.

Weryfikacja dokumentacji badawczej polega na kontroli formalnej poprawności wypełniania nośników informacji i porównaniu informacji dublowanych. Pozwoliło to na

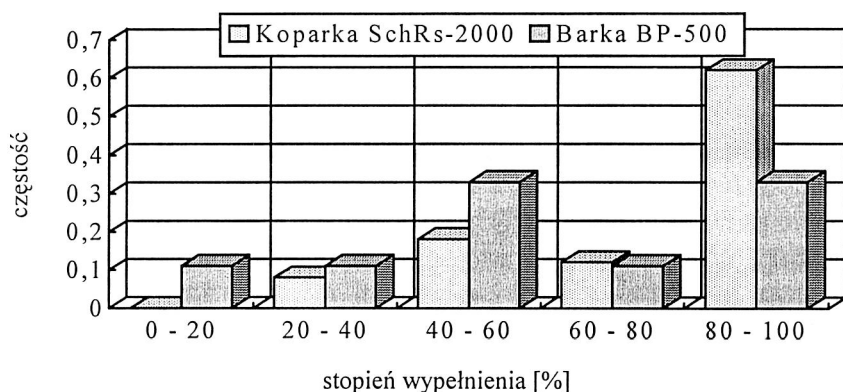
określenie ilości danych prawidłowych, błędnych i braku danych. Stopień wypełnienia poszczególnych pól dokumentów źródłowych jest charakterystyczny dla metody przygotowania dokumentacji badawczej. Przykład wyników analizy systemu SNL, w którym korzystano ze specjalnie opracowanych nośników informacji pokazano na rysunku 5.6.

Udział informacji charakteryzujących eksploatację (KEL) i niezawodność (KNL) uznanych za prawidłowe wynosi ponad 90%. Dane fałszywe zaobserwowano raczej w odniesieniu do informacji eksploatacyjnych (np. ilość zużytego paliwa) ~5%. Brak danych dotyczy przede wszystkim danych niezawodnościowych (np. chwila uszkodzenia) ~5%.



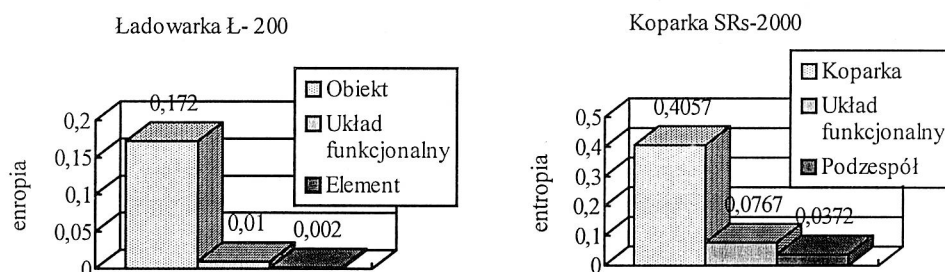
Rys. 5.6. Wiarygodność informacji wprowadzonych do dokumentacji systemu SNL
Fig. 5.6. Likelihood of the information implemented in documentation of the SNL system

W systemie SNK (rys. 5.7) informacje wprowadzano do bazy danych bezpośrednio z dokumentacji eksploatacyjnej. Zasadnicza różnica w wiarygodności gromadzonych informacji w stosunku do badań barki pchanej (korzystano z dokumentacji archiwalnej) dotyczy braku danych (stopień wypełnienia 0–20%).



Rys. 5.7. Stopień wypełnienia dokumentacji badawczej systemu SNK i DE dla barki
Fig. 5.7. The degree of completing a test documentation of the SNK and DE systems for a barge

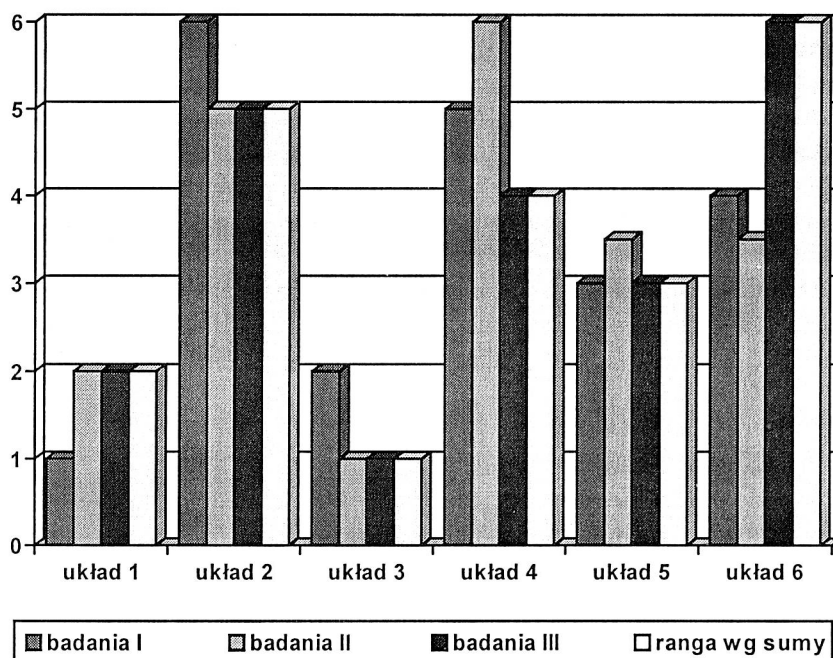
Ilość informacji niezawodnościowych generowanych przez podsystemy obiektu można oszacować za pomocą entropii informacyjnej H (3.61). Przykład oszacowania entropii dla średniej gotowości poszczególnych poziomów dekompozycji maszyn pokazano na rysunku 5.8 [107]. Z porównania entropii wynika, że możliwości selekcji słabych ogniw są tym większe, im niższy poziom dekompozycji maszyny jest analizowany.



Rys. 5.8. Oszacowane wartości entropii informacyjnej dla poszczególnych poziomów dekompozycji maszyn

Fig. 5.8. Evaluation of the information entropy for the particular levels of machine decomposition

Wyniki oceny niezawodności danego obiektu na podstawie różnych danych źródłowych porównano [89] dla układów funkcjonalnych autobusu Jelcz PR 110 U (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Rozkład rang średniego parametru strumienia uszkodzeń układów autobusu Jelcz PR 110 U

Fig. 5.9. Distribution of the ranks of mean failure rate of the Jelcz PR 110 U bus systems

Zastosowano wyniki oceny niezawodności pochodzące z następujących źródeł:

I. Badań własnych prowadzonych według systemu informacyjnego SBEN w latach 1976–1979.

II. Badań prowadzonych przez OBR JZS w latach 1979–1981 za pomocą systemu SBEN.

III. Badań własnych na podstawie DE, zrealizowanych w roku 1982.

Wyniki badań I–III zanalizowano za pomocą współczynnika korelacji rangowej Spearmana r . Uwzględniono:

- porównanie zmienności wskaźnika niezawodności między układami,
- porównanie zmienności wskaźnika dla danego układu między badaniami.

Stwierdzono dobrą zgodność wyników (w sensie rangi wskaźnika poszczególnych układów) uzyskanych z dokumentacji eksploatacyjnej w porównaniu do badań, w których stosowano specjalne systemy informacyjne. Oszacowane wartości wskaźnika mogą natomiast różnić się w znacznym stopniu (np. rozrzut wartości wskaźnika dla układu 3 jest trzykrotnie większy niż dla układu 1). Zaobserwowano zależność między wartością wskaźnika niezawodności a rozrzutem jego wartości między poszczególnymi źródłami informacji.

5.2. OPINIE EKSPERTÓW

Z ocen ekspertów korzystano do oszacowania charakterystyk niezawodności zderzaków kolejowych [53], ładowarek [59, 60] i koparek [61, 62].

Do oszacowania niezawodności elementów zderzaka kolejowego (na etapie projektowania) zastosowano metodę delficką [53]. Rozpatrywano dwa rodzaje elementów: akumulujące energię i rozpraszające energię. Eksperci porównali ze sobą wszystkie przedstawione im rozwiązania konstrukcyjne, odpowiadając na pytanie: czy dany element zrealizuje swoje zadanie z większą niezawodnością niż drugi element, zakładając takie same warunki eksploatacji i czas eksploatacji? Odpowiadając „tak”, ekspert dawał danej realizacji wartość 1, odpowiadając „nie” – wartość 0. Maksymalna wartość, którą mogła otrzymać dana realizacja akumulacji lub rozpraszania energii wynosiła więc

$$I = N - 1, \quad (5.1)$$

gdzie N – liczba analizowanych rozwiązań.

Założono, że dla elementu o niezawodności $R = 1$, mediana liczby otrzymanych punktów powinna być równa maksymalnej liczbie punktów I

$$K_{0,5}(R = 1) = I, \quad (5.2)$$

niezawodność porównawczą elementu oszacowano więc jako

$$R = K_{0,5}/I. \quad (5.3)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 5.3.

Najbardziej zgodne oszacowania ekspertów uzyskano dla akumulacji energii przez sprężynę pierścieniową, a dla rozpraszania energii przez opór hydrauliczny zmienny wraz z przesunięciem. Najbardziej zróżnicowane opinie dotyczyły akumulacji energii w gazie i rozpraszania energii w elastomerze przez tarcie wewnętrzne – rozwiązań nie stosowanych powszechnie w rozwiązaniach inżynierskich.

Tabela 5.3. Wyniki obliczeń niezawodności porównawczej elementów zderzaków

Rozwiązanie	Kwantyle			Rozrzut $K_{0,75} - K_{0,25}$	Niezawodność R
	$K_{0,25}$	$K_{0,50}$	$K_{0,75}$		
akumulacja energii					
Sprężyna walcowo-śróbowa	2	4	7,5	5,5	0,50
Sprężyna paraboloidalno-taśmowa	1	2,5	4	3	0,31
Sprężyna talerzykowa	2	2,5	6,5	4,5	0,31
Pierścienie rozcięte	1	3	5	4	0,38
Sprężyna pierścieniowa	3,5	4	5	1,5	0,50
Płytki gumowe	0,5	1	6,5	6	0,12
Elastomer	5	6	7	2	0,75
Gaz	0	4	7,5	7,5	0,30
Ciecz hydrauliczna	3	6,5	7,5	4,5	0,81
rozpraszanie energii					
Tarcie suche stałe	0,5	1,5	3,5	3	0,19
Tarcie suche zmienne	2,5	3	4,5	2	0,38
Tarcie konstrukcyjne – para obrotowa	0	1	3	3	0,12
Tarcie konstrukcyjne – para postępową	0,5	1,5	3,5	3	0,19
Opór hydrauliczny – stały	3	4	5	2	0,50
Opór hydrauliczny – zmienny	4,5	5,5	6	1,5	0,69
Tarcie wewnętrzne	1,5	3,5	5,5	4	0,44

Oszacowanie przez ekspertów wskaźników niezawodności koparek wielonaczyniowych umożliwiło uzyskanie informacji wstępnych dla maszyn o długim okresie eksploatacji, występujących jako pojedyncze lub nieliczne egzemplarze [61, 62].

Kolejne etapy oceny ekspertowej obejmowały:

- rozpoznanie kompetencji eksperta, zakresu jego kompetencji oraz możliwości wykonania badań,
- przygotowanie zestawu pytań tworzących logiczny ciąg informacji o niezawodności komponentów koparki,
- uzgodnienie z ekspertem zestawu pytań i ich ewentualna korekta,
- przygotowanie materiałów pomocniczych oraz ankiety do badań.

Ekspert miał za zadanie odpowiedzieć na następujący zestaw pytań dotyczących każdego podzespołu koparki:

- podać definicję uszkodzenia awaryjnego lub starzeniowego, ewentualnie opisać typowe postaci uszkodzeń awaryjnych (starzeniowych),
- określić czy uszkodzenie podzespołu powoduje zatrzymanie koparki,

- oszacować częstotliwość pojawiania się uszkodzeń awaryjnych w całym zbiorze koparek,
- oszacować czas pracy podzespołu do wymiany po wyczerpaniu jego potencjału eksploatacyjnego (miesiące, lata eksploatacji),
- oszacować czas naprawy podzespołu (godziny, zmiany).

Przykład wyników oszacowania wskaźników niezawodności układu urabiania pokazano w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Wartości wskaźników niezawodności oszacowanych przez eksperta

Układ urabiania									
zespół			podzespół						
lp.	nr kod	nazwa	lp.	nr kod	nazwa	liczba	parametr strumienia uszkodzeń awaryjnych	czas pracy do wymiany	czas naprawy
1	3.1.	napęd koła czerpakowego	1	3.1.1.	przekładnia	1	2/rok	3 lata	42
			2	3.1.2.	sprzęgło przeciążeniowe dolne	1	–	3 lata	5
			3	3.1.3.	sprzęgło przeciążeniowe górne	1	–	3 lata	5
			4	3.1.4.	zawieszenie tylne przekładni	1	1/10 lat	2 lata	4
			5	3.1.5.	silnik górny	1	1/rok	–	1,5
			6	3.1.6.	silnik dolny	1	1/rok	–	1,5
2	3.2.	koło czerpakowe z osią	1	3.2.1.	koło czerpakowe	1	–	3 lata	42
			2	3.2.2.	oś koła	1	1/3 lata	3 lata	42
			3	3.2.3.	łożysko ustalone	1	1/3 lata	3 lata	6
			4	3.2.4.	łożysko nieustalone	1	1/3 lata	3 lata	6
3	3.3.	zamek koła czerpakowego	1	3.3.1.	zamek przedni	1	1/2 lata	3 lata	21
			2	3.3.2.	stężenia mocowania	1	–	1,5 roku	

*) Czas naprawy podano w liczbie zmian pracy (1 zmiana = 8 godzin).

**) Zdarzenie rzadkie oznacza zdarzenie, które zaszło 2 razy w historii kopalni.

Oszacowana przez eksperta częstość uszkodzeń wyniosła od 10/rok do mniej niż 1/rok. W odniesieniu do poszczególnych układów ekspert nie potrafił określić częstości uszkodzeń dla 3–83% podzespołów. Zaobserwowano duże rozrzuty trwałości poszczególnych podzespołów danego układu funkcjonalnego: od 1,5 roku do 3 lat – układ urabiania (najmniejszy rozrzut), od 0,5 do ponad 10 lat (układ o największym rozrzucie).

Czas naprawy oszacowano dla 68% podzespołów. Najwięcej napraw (68%) mieści się w przedziale od 1 do 3 zmian (8 do 24 godzin pracy). Najdłuższe naprawy (układ urabiania) trwają 16 dni (48 zmian) – około 2% wszystkich napraw.

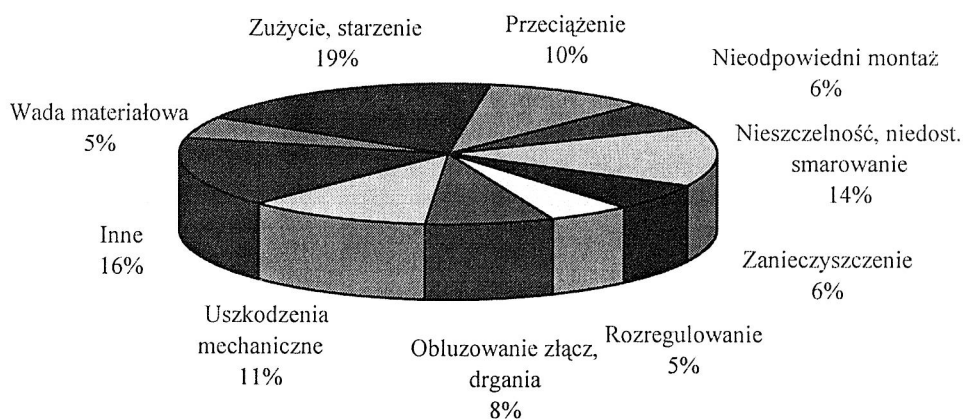
W 78% przypadków ekspert uważał, że uszkodzenie podzespołu powoduje zatrzymanie pracy całej koparki.

W badaniach niezawodności ładowarek Ł-220 uzupełniono badania statystyczne badaniami ankietowymi [165] ukierunkowanymi na ocenę przyczyn, postaci i skutków (zagrożeń) uszkodzenia. Informacje – wypełnione ankiety – zebrano wśród użytkowników ładowarek. Wyniki zgromadzono w postaci kart „Dane o uszkodzeniach”. Karta zawiera m.in.:

- identyfikację elementu,
- dane dotyczące liczby uszkodzeń oraz okoliczności w jakich zostały one stwierdzone,
- opis przyczyn uszkodzenia,
- opis skutków uszkodzenia, czasu (kosztu przestoju),
- sposób usunięcia uszkodzenia i opis naprawy.

Bezpośrednie przyczyny uszkodzeń, jakie można wskazać w większości udokumentowanych przypadków, podzielono na 3 grupy: konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne.

Udziały przyczyn uszkodzenia w rozpatrywanym zbiorze uzyskanych informacji przedstawiono na rysunku 5.10.



Rys. 5.10. Udziały przyczyn uszkodzenia elementów ładowarki

Fig. 5.10. Various causes of failures of the loader elements

Analizując dane zauważono, że zdecydowana ich większość jest rezultatem znanych powszechnie procesów towarzyszących eksploatacji maszyn i ma charakter uszkodzeń typowych.

Wśród stwierdzonych uszkodzeń istnieją jednak i takie, których powtarzalność wskazuje na niewłaściwe rozwiązania konstrukcyjne danego węzła jako zasadniczą

przyczynę uszkodzenia. Analiza pozwoliła na wyróżnienie uszkodzeń pierwotnych i wtórnych.

5.3. PORÓWNANIE OCEN UZYSKANYCH RÓŻNYMI METODAMI

Analizę porównawczą przeprowadzono dla wskaźników niezawodności oszacowanych przez eksperta i obliczonych na podstawie nośników informacji systemu SNK [114]. W tym celu wprowadzono wskaźniki K_a i K_t :

$$K_a = \omega^e / \omega^d, \quad (5.4)$$

$$K_t = T^e / T^d, \quad (5.5)$$

gdzie:

ω^e – parametr strumienia uszkodzeń obiektu oszacowany przez eksperta,

ω^d – parametr strumienia uszkodzeń obiektu obliczony na podstawie bazy danych systemu SNK,

T^e – czas pracy do wymiany obiektu oszacowany przez eksperta,

T^d – czas pracy do wymiany obiektu obliczony na podstawie bazy danych systemu SNK.

Obliczenia wykonano dla poszczególnych układów funkcjonalnych maszyny i koparki jako całości. Sformułowano hipotezy, że wyniki oszacowań i obliczeń mają taką samą wartość

$$H_1 : K_a = 1; \quad H_2 : K_t = 1 \quad \text{dla } \alpha = 0,05. \quad (5.6)$$

Wyniki testów zestawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Porównanie oszacowań statystycznych i ocen ekspertów

Nazwa układu	K_a	H_1	K_t	H_2
Podwozie	1,30	T	1,80	N
Mechanizm obrotu	1,10	T	4,80	T
Układ urabiania	0,71	T	0,29	N
Transport urobku	0,39	N	1,50	T
Układ zwodzenia	1,20	T	5,40	T
Inne	0,05	N	2,03	T
Koparka	0,64	T/N	2,03	T

Oznaczenia: T – nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy,

N – odrzucono hipotezę.

Z przedstawionych danych wynika, że sumaryczna ocena maszyn jest prawidłowa (z przyjętym poziomem ufności). Ekspert miał tendencję do optymistycznej oceny niezawodności obiektu, tzn. oszacował mniejszą intensywność uszkodzeń i większą trwałość niż wykazały obliczenia na podstawie badań statystycznych. Wydaje się, że

jego opinia jest lepsza w odniesieniu do uszkodzeń awaryjnych niż do trwałości poszczególnych układów maszyny.

Możliwości oceny cech uszkodzenia określono na podstawie danych statystycznych pochodzących z badań eksploatacyjnych niezawodności autobusów miejskich [96]. Zgromadzone informacje dotyczą m.in. cech uszkodzenia: postaci, przyczyny i sposobu usunięcia uszkodzenia. Wyniki oceny porównano z subiektywnymi ocenami postaci uszkodzenia.

Dla poszczególnych elementów silnika spalinowego eksperci określili różne postacie jego uszkodzenia. Możliwe jest wystąpienie dwóch rodzajów błędów:

- określenie postaci uszkodzenia, która nie może wystąpić dla danego elementu,
- pominięcie postaci uszkodzenia, która występuje w danym elemencie.

Porównano oszacowania ekspertów (E) z wynikami badań eksploatacyjnych (B). Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 5.6 w postaci wskaźników $N_{E, B}$ ($E = 0, 1$; $B = 0, 1$) określających:

- $N_{0, 0}$ – postać uszkodzenia jest według eksperta niemożliwa i nie pojawiła się w badaniach,
- $N_{1, 1}$ – postać uszkodzenia jest według eksperta możliwa i pojawiła się w badaniach,
- $N_{1, 0}$ – postać uszkodzenia jest według eksperta możliwa, ale nie pojawiła się w badaniach,
- $N_{0, 1}$ – postać uszkodzenia jest według eksperta niemożliwa, ale pojawiła się w badaniach.

Przypadki $N_{0, 0}$, $N_{1, 1}$ oznaczają, że ocena eksperta jest prawidłowa; przypadek $N_{1, 0}$ może być błędem eksperta, może także być spowodowany zbyt krótkim okresem badań eksploatacyjnych; przypadek $N_{0, 1}$ jest błędem.

Tabela 5.6. Analiza subiektywnej oceny postaci uszkodzenia

$N_{E, B}$ %	Układ					Silnik
	zasilania	zespoły główne	smarowania	chłodzenia	wydechu	
$N_{0, 0}$	82,3	80,0	84,8	80,0	78,6	81,0
$N_{1, 1}$	2,0	2,0	1,5	2,0	1,5	2,0
$N_{1, 0}$	14,7	16,3	13,3	17,0	18,4	15,5
$N_{0, 1}$	1,0	1,7	0,4	1,0	1,5	1,5

Udział prawidłowych opinii ekspertów przekracza 80%. Ilość popełnionych błędów zawiera się w przedziale 1–2%.

Analiza danych badawczych pozwoliła jedynie na powiązanie niepewności gromadzonych informacji z metodą ich zbierania. Trudno jest wyrokować o przydatności omówionych w p. 3.4 modeli matematycznych.

6. SYSTEM DORADCZY DO PROGNOZOWANIA NIEZAWODNOŚCI OBIEKTÓW MECHANICZNYCH (PNOM)

6.1. KONCEPCJA SYSTEMU DORADCZEGO

System doradczy to program komputerowy, który wykonuje złożone zadania w sposób zbliżony do rozumowania człowieka, będącego ekspertem w danej dziedzinie. Określenie **system doradczy** może być również zastosowane do dowolnego programu komputerowego, który na podstawie szczegółowej, specyficznej wiedzy z danej dziedziny, przechowywanej w systemie komputerowym, może wspomagać podejmowanie decyzji i wyciąganie wniosków, działając w sposób zbliżony do procesu rozumowania człowieka [27, 45, 93].

Budowa systemów doradczych jest oparta przeważnie na schemacie podziału jego struktury na dwa bloki: bazę wiedzy (*knowledge base*), odseparowaną od reszty systemu, oraz mechanizmy wnioskujące, określane jako układ wnioskujący (*inference engine*) – podstawowy element większości systemów. Za integralną część systemu uznaje się również interfejs użytkownika. Do budowy bazy wiedzy o modelach prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych zastosowano szkieletowy system doradczy, tzn. system z pustą bazą wiedzy. Baza wiedzy jest pozyskiwana i odpowiednio kodowana na potrzeby systemu, który zawiera już mechanizmy wnioskowania.

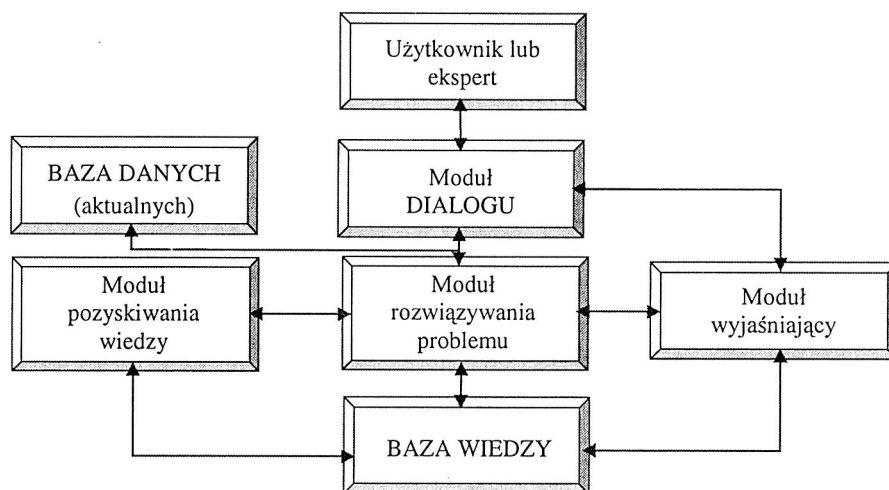
Możliwości zastosowania systemów ekspertowych w eksploatacji maszyn są obecnie często analizowane [np. 5, 7, 25, 33, 64, 67, 79, 128, 152].

Bardziej szczegółowa struktura systemów doradczych zawiera następujące, podstawowe elementy [27, 93]:

- baza wiedzy (np. zbiór reguł),
- baza danych (np. dane o obiekcie, wyniki pomiarów, hipotezy),
- procedury wnioskowania – maszyna wnioskująca,
- procedury objaśniania – objaśniają strategię wnioskowania,
- procedury sterowania dialogiem – procedury wejścia–wyjścia umożliwiające formułowanie zadań przez użytkownika i przekazywanie rozwiązania przez program,
- procedury umożliwiające rozszerzanie oraz modyfikacje wiedzy – pozyskiwanie wiedzy.

Powiązanie wzajemne elementów systemu doradczego przedstawiono w sposób schematyczny na rysunku 6.1. Oprócz elementów procedur wnioskowania i bazy wiedzy, nie wszystkie elementy tego układu muszą występować w każdym systemie doradczym.

Wydzieloną wiedzę z danej dziedziny można wprowadzić, po uprzednim jej sformalizowaniu i nadaniu jej odpowiedniej struktury, do bazy wiedzy systemu doradczego. W procesie zapisu formalnego wiedzy korzysta się – w zależności od postaci problemu i techniki implementacji – z zapisu diagramowego, języka logiki lub drzewa hierarchii – najbardziej obecnie rozpowszechnionego sposobu pozyskiwania wiedzy [91]. Sam sposób pozyskiwania wiedzy może opierać się na dialogu z ekspertem lub pozyskiwaniu jej z zewnętrznych źródeł informacji.



Rys. 6.1. Główne elementy systemu doradczego
Fig. 6.1. Main elements of an expert system

Cechy charakterystyczne systemów doradczych obejmują [29, 93]:

1. Poprawność funkcjonowania systemu – system uważa się za dobry, jeśli w dostatecznym stopniu imituje on zarówno wiedzę, jak i intuicję eksperta w danej dziedzinie.

2. Uniwersalność działania – zdolność do rozwiązywania szerokiej gamy przypadków z danej dziedziny. Jest to możliwe w przypadku posiadania przez system wielu reguł ogólnych, obejmujących dostatecznie szeroki zakres heurystyk z danej dziedziny wiedzy znanej systemowi.

3. Złożoność strukturalna systemu, którą można określić na podstawie stopnia trudności rozwiązywanego przez ten system problemu.

4. Uzasadnienie wyboru rozwiązania – uzasadnienie przyjętej ścieżki „rozumowania” na każdym etapie sesji. Polega to na przeglądaniu ścieżki wnioskowania systemu na podstawie danych i zapytań. Waga podsystemu objaśniania rośnie wraz ze wzrostem kosztów błędnych decyzji.

5. Możliwość powiększania (udoskonalania) bazy wiedzy. Do mechanizmów udoskonalających jej działanie można zaliczyć:

- mechanizm kontrolujący brak sprzeczności, między regułami nowo wprowadzanymi a istniejącymi w systemie,

- mechanizm kontrolujący zgodność reguł z nowo wprowadzanymi faktami,
- mechanizm oceny częstości stosowania poszczególnych reguł,
- mechanizm rozbudowy istniejącej bazy reguł poza zakres danej bazy wiedzy.

6.2. ZAŁOŻENIA SYSTEMU DORADCZEGO PNOM

System doradczy do wspomagania prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych PNOM został opracowany w celu zweryfikowania możliwości zastosowania metodyki postępowania zaproponowanej w rozdziale 3. Przyjęte założenia powinny pozwolić na implementację wiedzy teoretycznej i empirycznej, omówionej w rozdziałach 3., 4. i 5., do komputerowej bazy wiedzy systemu doradczego.

6.2.1. STRUKTURA NIEZAWODNOŚCI MASZyny

Wnioskowanie o niezawodności obiektu jest realizowane na poszczególnych poziomach jego dekompozycji, przeprowadzonej zgodnie z założeniami omówionymi w p. 3.1. Wobec tego poszczególne podsystemy są traktowane w procesie prognozowania jako elementy niepodzielne. Elementy są traktowane jako elementy binarne w sensie niezawodnościowym, tzn. wyróżniono dwa stany niezawodnościowe: stan zdatności i stan niezdatności. W bazie wiedzy nie uwzględniono relacji pomiędzy poszczególnymi poziomami dekompozycji obiektu.

6.2.2. REPREZENTACJA WIEDZY

Reprezentacja wiedzy oznacza [31] ogólny formalizm przekazywania, zapisywania i gromadzenia dowolnego zasobu wiedzy. W uproszczeniu można stwierdzić, że zapis wiedzy powinien umożliwiać identyfikację określonych obiektów danej dziedziny oraz identyfikację relacji między tymi obiektami. Obiekty mogą być zarówno obiektami rzeczywistymi, jak i pojęciami abstrakcyjnymi.

Reprezentacja wiedzy RW jest zdefiniowana [22] jako

$$RW = \langle \alpha, S^{RW}, CF \rangle, \quad (6.1)$$

gdzie:

$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ – ciąg formuł elementarnych,

S^{RW} – struktura logiczna reprezentacji wiedzy; sposób tworzenia faktów z formuł elementarnych,

CF – zbiór współczynników pewności.

Faktami F_i nazywa się (w przyjętej notacji [22]) formuły utworzone ze zbioru formuł elementarnych za pomocą symboli logicznych. Zbiór faktów określa formuła

$$F = F_i = S_i^{RW}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = S_i^{RW}(\alpha), i = 1, \dots, k. \quad (6.2)$$

Najczęściej stosowane metody reprezentacji wiedzy obejmują [93]:

- metody oparte bezpośrednio na rachunku zdań lub rachunku predykatów,
- metody stosujące zapis stwierdzeń,
- metody z zastosowaniem systemów regułowych (wektory wiedzy),
- metody stosujące sieci semantyczne,
- metody oparte na ramach,
- metody używające modeli obliczeniowych.

Zakres zastosowań metody reprezentacji wiedzy [46] zestawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Zakresy zastosowań metod reprezentacji wiedzy

Metoda reprezentacji wiedzy	Zastosowanie	Przykład zastosowania
Regułowa	stwierdzenia	związki: przyczyna–skutek skutki logiczne działania systemowe wiedzy i ograniczenia
Ramowa	pojęcia	reprezentacja pojęć statyczne relacje między pojęciami wybór między pojęciami problemy projektowe
Sieciowa	stany	zdarzenia zmienne w czasie struktury pojęciowe

W wielu przypadkach wymienione techniki zapisu wiedzy nie występują w odosobnieniu od pozostałych. Stosowane są różne wywodzące się z nich techniki mieszane. Wybór techniki reprezentacji wiedzy zależy od wielu czynników, z których do najważniejszych należy zaliczyć [27]:

- rodzaje wiedzy wymaganej do poprawnego działania systemu doradczego,
- rodzaj dyscypliny, której wiedza ma być objęta zapisem,
- wymagana wielkość bazy wiedzy, ze szczególnym zwróceniem uwagi na unikanie zbędnego zwiększania tej bazy,
- rodzaj sprzętu.

Ze względu na rodzaj analizowanych danych w programie PNOM zastosowano mieszaną reprezentację wiedzy [97, 99, 109]. Założono, że:

- wnioskowanie o prognozowanej niezawodności obiektu jest prowadzone na podstawie regułowej reprezentacji wiedzy,
- wyniki ocen lub prognoz niezawodności obiektu uzyskane poszczególnymi metodami są gromadzone w ramowej reprezentacji wiedzy.

6.2.2.1. REGUŁOWA REPREZENTACJA WIEDZY

Wnioskowanie o niezawodności obiektu jest prowadzone zgodnie z regułową reprezentacją wiedzy. Wówczas, zgodnie z zależnością (3.1), formuły elementarne są stwierdzeniami typu

$$\langle o, a, v, cf \rangle. \quad (6.3)$$

Regułowa baza wiedzy zawiera zbiór reguł syntaktycznych typu

$$\text{IF przesłanka THEN konkluzja K1} - cf_1 \text{ ELSE konkluzja K2} - cf_2 \quad (6.4)$$

Przesłanka (a_o, u) oznacza stwierdzenie: atrybut a obiektu o przyjmuje wartość u . Przesłanka może zawierać pewną liczbę stwierdzeń połączonych funktorami logicznymi koniunkcji lub alternatywy. Stosując formalny zapis można regułę określić jako [93]

$$(a_o, u, cf_a) \wedge (b_o, w, cf_b) \Rightarrow (g_o, y, cf_g), \quad (6.5)$$

co oznacza:

JEŚLI dla obiektu o atrybut a ma wartość u ze wskaźnikiem pewności cf_a
i atrybut b ma wartość w ze wskaźnikiem pewności cf_b
TO atrybut g przyjmuje wartość y ze wskaźnikiem pewności cf_g .

Wartości logiczne poszczególnych reguł można zapisać w postaci wektorów wiedzy. Wartości wektora wiedzy

$$WW = [w_{ij}], \quad (6.6)$$

$i = 1, \dots, r$ – numer reguły, $j = 1, \dots, p, p + 1, \dots, k$ – numer stwierdzenia, przy czym stwierdzenia:

$j = 1, \dots, p$ – należą do zbioru przesłanek, $j = p + 1, \dots, k$ – należą do zbioru konkluzji;

$$w_{ij} = \begin{cases} cf_{ij}, & \text{dla stwierdzenia } j \text{ występującego w regule } i, \\ *, & \text{dla stwierdzenia } j \text{ niewystępującego w regule } i. \end{cases} \quad (6.7)$$

W zastosowanym systemie szkieletowym [47] elementy stwierdzeń mogą być traktowane jako zmienne, co umożliwia zwiększenie stopnia ogólności tworzonej bazy wiedzy. Zależności między stwierdzeniami są zapisane w postaci faktów – reguł syntaktycznych typu

$$\text{Reguła \#} \quad (6.8)$$

If		
	<i>przesłanka 1</i>	
and (or)	<i>przesłanka 2</i>	
and (or)	<i>przesłanka N</i>	N – ograniczona liczba przesłanek;
then		
	<i>konkluzja 1 – cf_1</i>	
and	<i>konkluzja 2 – cf_2</i>	
and	<i>konkluzja M – cf_M</i>	M – ograniczona liczba konkluzji;
else		
	<i>konkluzja M+1 – cf_{M+1}</i>	

W języku naturalnym taką konstrukcję można wyrazić następująco: jeżeli *przesłanka 1 i (lub) przesłanka 2 i (lub) ... i (lub) przesłanka N* są prawdziwe, to prawdziwe są: *konkluzja 1* ze współczynnikiem pewności cf_1 i ... i *konkluzja M* ze współczynnikiem pewności cf_M , jeżeli natomiast którakolwiek z *przesłanek* $\{1 \dots N\}$ jest nieprawdą, to prawdziwe są: *konkluzje M + 1* ze współczynnikiem pewności cf_{M+1} .

6.2.2.2. RAMOWA REPREZENTACJA WIEDZY

Oceny niezawodności są gromadzone w ramowej bazie wiedzy. Rama jest strukturą danych, reprezentującą wiedzę o danym obiekcie. Właściwości ramy są następujące [29, 93, 109]:

- rama jest zbiorem klatek; całość informacji o obiekcie, zawarta w ramie, jest dzielona na części będące wartościami klatek ramy,
- każda klatka odpowiada pewnej właściwości danego obiektu i ma zdefiniowaną dziedzinę wartości, które mogą być w niej umieszczone,
- klatka jest jednoznacznie zdefiniowana przez podanie jej rodzaju (dziedziny wartości),
- wartości klatek mogą być różne, np. odwołania do innej ramy, procedury lub funkcje,
- klatki są dzielone na subklatki (fasety), zawierające wybrane wartości klatki,
- subklatki mogą być dzielone na sub-subklatki itd.,
- ramy, klatki, subklatki, sub-subklatki są identyfikowane za pomocą nazw.

Baza wiedzy zawierająca stwierdzenia charakteryzujące niezawodność elementów maszyn jest zbudowana z ram r_i odpowiadających poszczególnym elementom maszyny.

Wobec hierarchicznej struktury niezawodności maszyny, ramy nadrzędne opisują niezawodność wyższych poziomów dekompozycji obiektu, takich jak: podzespół, zespół, układ funkcjonalny i maszyna. Ramy podrzędne określają niezawodność niższych poziomów dekompozycji elementu określonych przez postać i przyczynę uszkodzenia.

Ramowa baza wiedzy BW jest zapisana jako [163]

$$BW = \langle R, CF \rangle, \quad (6.9)$$

gdzie:

$R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ – zbiór ram,

$CF = \{cf_1, cf_2, \dots, cf_n\}$ – zbiór współczynników pewności.

Każda rama r_i zbudowana jest z klatek k_{ij}

$$r_i = \{k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{iJ_i}\}, \quad (6.10)$$

gdzie J_i – liczba klatek ramy r_i .

Poszczególne klatki k_{ij} ramy r_i należą do jednego z następujących zbiorów:

- klatek Ar typu „argument”

$$\text{War}(k_{ij} \in \text{Ar}_i) = a_g; \quad a_g \in \langle \text{Zl} \rangle \wedge \langle \text{Zs} \rangle, \quad (6.11)$$

gdzie:

Zl – zbiór liczb,

Zs – zbiór symboli,

- klatek Rg typu „reguła”:

$$\text{War}(k_{ij} \in \text{Rg}_i) = o_l; \quad o_l \in \langle \text{Wr}_1, \text{Op}, \text{Wr}_2 \rangle, \quad (6.12)$$

gdzie:

Wr – wyrażenie algebraiczne,

Op – operator relacyjny,

- klatek Km typu „komentarz”:

$$\text{War}(k_{ij} \in \text{Km}_i) = \text{tk}, \quad (6.13)$$

gdzie tk – tekst komentarza.

- klatek Cf typu „współczynnik pewności”

$$\text{War}(k_{ij} \in \text{Cf}_i) = cf, \quad (6.14)$$

gdzie cf – wartość współczynnika pewności,

Klatka k_{ij} może zawierać subklatki k_{ijl}

$$k_{ij} = \{k_{i11}, k_{i12}, \dots, k_{iL_{ij}}\}, \quad (6.15)$$

gdzie L_{ij} – liczba subklatek klatki k_{ij} .

Subklatki k_{ijl} typu „argument” należą do zbioru

$$k_{ijl} \in \text{Wn}_{ij} \cup \text{Pn}_{ij} \cup \text{Sn}_{ij}, \quad (6.16)$$

gdzie:

Wn_{ij} – zbiór współczynników niezawodności,

Pn_{ij} – zbiór parametrów funkcji charakteryzującej niezawodność,

Sn_{ij} – zbiór symboli identyfikujących funkcje charakteryzującą niezawodność.

Wartości poszczególnych subklatek k_{ijl} ramy r_i należą do zbioru

$$\text{War}(k_{ijl}) \in \text{Ob}_{ij} \cup \text{St}_{ij} \cup \text{Ek}_{ij}, \quad (6.17)$$

gdzie:

Ob_{ij} – zbiór ocen uzyskanych metodami niezawodności konstrukcyjnej,

St_{ij} – zbiór ocen uzyskanych metodami analogii statystycznej,

Ek_{ij} – zbiór ocen ekspertów.

6.2.3. RELACJA DZIEDZICZENIA

W przypadku braku danych niezawodnościowych w bazie wiedzy dla danego poziomu dekompozycji obiektu możliwe jest wprowadzenie do procesu wnioskowania danych charakteryzujących najbliższy, wyższy poziom dekompozycji. Służy temu relacja dziedziczenia [167]

$$\frac{F_A, B \subset A}{F_B}. \quad (6.18)$$

Jeżeli F_A oznacza fakt, że dla obiektów klasy A zachodzi F , a $B \subset A$ – że klasa B jest podklasą A , to relacja oznacza, że z F_A i $A \subset B$ wynika F_B .

Częściowe uzgodnienie formuł predykatowych może wystąpić również wówczas, gdy nie są one identyczne, lecz podobne (z odpowiednio dużym stopniem podobieństwa Γ)

$$\frac{F_A, B \approx A}{\gamma F_B}. \quad (6.19)$$

Stopień oceny γ jest funkcją stopnia podobieństwa Γ .

Gdy fakty i wiedza o dziedzinie są określone współczynnikami oceny, reguły wnioskowania muszą to uwzględniać. Współczynniki oceny konkluzji oblicza się zgodnie z przyjętą techniką oceny

$$\frac{\alpha F_A, \beta (B \subset A)}{\gamma F_B}, \quad (6.20)$$

przy czym $\gamma = f(\alpha, \beta)$.

W ramowej reprezentacji wiedzy relacja dziedziczenia jest realizowana przez klatki typu A Kind Of [29, 93] ze standardowym zestawem subklatek, opisujących w pełni dziedziczenie danej ramy, a więc odwołania zarówno do uogólnień, jak i wyszczególnień. Funkcję taką spełniają m.in. subklatki typu IF-NEEDED, które wyznaczają wartość klatki, poszukując w ramach nadrzędnych w stosunku do ramy wyjściowej. Subklatka ta jest poszukiwana w klatce k_i jeśli subklatki zawierające wymagane wartości są nie wypełnione lub nie istnieją, tzn.

$$\exists_{j \in 1, \dots, L_{ij}} (k_{ij} \in \text{Ar}_i \wedge \text{War}(k_{ij}) \in \{\emptyset\}). \quad (6.21)$$

6.2.4. WSPÓŁCZYNNIKI PEWNOŚCI INFORMACJI

W zastosowanym szkieletowym systemie ekspertowym możliwe jest określenie współczynników pewności sześcioma metodami [46] (tabela 6.2).

Wybór metody określania współczynników pewności cf stanowi istotny problem w tworzeniu bazy wiedzy z danych badawczych. Zasadnicze wątpliwości wynikają z [87]:

- braku jednoznacznej interpretacji obliczanych współczynników pewności,
- braku możliwości eksperymentalnej weryfikacji ich poprawności,
- wnioskowania jednokierunkowego: z symptomów wnioskuje się o przyczynach, bez możliwości wnioskowania w kierunku przeciwnym,
- korzystania z tej samej reguły w różnych gałęziach tego samego drzewa dedukcji tak, jakby były to dane niezależne.

Ze względu na analizę źródeł niepewności danych niezawodnościowych (rozdz. 5) zastosowano metodę 5 – formuły własne. Wybrana metoda pozwala na modelowanie różnych innych modeli i prowadzenia badań nad wpływem metody modelowania współczynników pewności na wyniki procesu wnioskowania. Założono, że wartości współczynnika pewności cf wynoszą

$$cf \in [0,1] \quad cf = \begin{cases} 0, & \text{gdy informacja jest absolutnie fałszywa,} \\ 1, & \text{gdy informacja jest absolutnie prawdziwa.} \end{cases} \quad (6.22)$$

Tabela 6.2. Sposoby reprezentacji stopnia niepewności reguł w systemie EXSYS Professional

System	Charakterystyka
1	2
0 lub 1	System ekspertowy nie wymaga stosowania współczynników ufności. Wartość 1 oznacza potwierdzenie wyboru, a wartość 0 – odrzucenie. Nie ma możliwości wartościowania poszczególnych wyborów.
0 do 10	System najbardziej efektywny w ogólnych zastosowaniach. Wygodny do użycia, szczególnie jeżeli wartości współczynników ufności są formułowane przez eksperta człowieka. 11 możliwości wyboru poziomu ufności pozwala na zróżnicowanie wielu reguł. Wartość 0 ustala współczynnik wyboru na 0, a wartość 10 ustala współczynnik na 10. Wartości pomiędzy 0 a 10 są uśredniane.
–100 do 100	System pozwalający na precyzyjne rozróżnianie współczynników pewności. Powinien być używany tylko wtedy, gdy dane pochodzą z badań statystycznych. Pozwala na łączenie współczynników jako zależnych lub niezależnych prawdopodobieństw. Wartości 0 lub 100 nie ustalają wartości współczynnika ufności i są łączone tak jak inne wartości.
Przyrost (ubytek)	System łatwy do intuicyjnego użycia. Używany do rozróżnienia między wybranymi decyzjami, które w innych systemach uzyskują podobne wartości współczynników. Punkty są dodawane lub odejmowane do (z) całkowitej wartości odpowiadającej danemu wyborowi. Użytkownik systemu ekspertowego otrzymuje informację bardziej rozróżniającą poszczególne decyzje.
Formuły własne	System powinno się stosować tylko wówczas, gdy nie można użyć pozostałych systemów. Najbardziej uniwersalny i o największym zakresie wykorzystania. Współczynnik ufności jest przypisany nie tylko wybranej decyzji, ale stwierdzeniom i zmiennym użytym w regułach. Można korzystać z dowolnych formuł logicznych.

1	2
Logika rozmyta	System stosuje rozmytą miarę przynależności do określenia współczynnika pewności danych. Możliwa jest „defuzzifikacja” wyników wnioskowania na podstawie średnich ważonych wartości współczynników.

W procesie wnioskowania współczynniki pewności są skojarzone z każdą regułą i reprezentują stopień wzmocnienia lub osłabienia konkluzji reguły przez jej przesłankę.

Propagacja niepewności jest ściśle powiązana z aktywowaniem reguły i polega na obliczeniu nowej miary pewności konkluzji w aktywowanej regule. Założono, że propagacja niepewności przebiega zgodnie z formułą [82]:

$$\text{nowe } cf(h) = \begin{cases} cf(h) + (1 - cf(h)) * cf'(e \rightarrow h), & \text{gdy } cf(h), cf'(e \rightarrow h) \geq 0, \\ cf(h) + (1 + cf(h)) * cf'(e \rightarrow h), & \text{gdy } cf(h), cf'(e \rightarrow h) \leq 0, \\ \frac{cf(h) + cf'(e \rightarrow h)}{1 - \min\{|cf(h)|, |cf'(e \rightarrow h)|\}}, & \text{gdy } cf(h) * cf'(e \rightarrow h) < 0, \end{cases} \quad (6.23)$$

$$cf'(e \rightarrow h) = cf(e \rightarrow h) * \max\{0, cf(e)\}, \quad (6.24)$$

gdzie:

- $e \rightarrow h$ – postać reguły,
- $cf(e \rightarrow h)$ – współczynnik pewności reguły,
- $cf(e)$ – współczynnik pewności przesłanki,
- $cf(h)$ – współczynnik pewności konkluzji.

6.3. KOMPUTEROWA REALIZACJA SYSTEMU DORADCZEGO PNOM

System doradczy został opracowany z zastosowaniem edytora szkieletowego systemu ekspertowego EXSYS Professional. Prezentowana wersja studyjna programu PNOM-2.4 (prognozowanie niezawodności obiektu mechanicznego) opiera się na wersji Ver.5.1.4 – WIN16.

Celem działania systemu jest zakwalifikowanie oszacowanych wartości wskaźników nieuszkodzalności, naprawialności lub gotowości do 10 możliwych klas niezawodności. Stopień przynależności do poszczególnych klas jest określony przez wynikowe wartości współczynników pewności cf , uzyskane w procesie wnioskowania.

Schemat klasyfikacji niezawodności elementu przedstawiono w tabeli 6.3. Podstawą klasyfikacji są (w zależności od dostępnych danych):

- prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia (uszkodzenia lub naprawy),
- częstość uszkodzeń – udział liczby uszkodzeń danego elementu w stosunku do liczby uszkodzeń na danym poziomie dekompozycji obiektu,
- względny czas naprawy – udział średniego czasu naprawy danego elementu w stosunku do średniego czasu naprawy wyższego poziomu dekompozycji obiektu,
- współczynnik gotowości elementu.

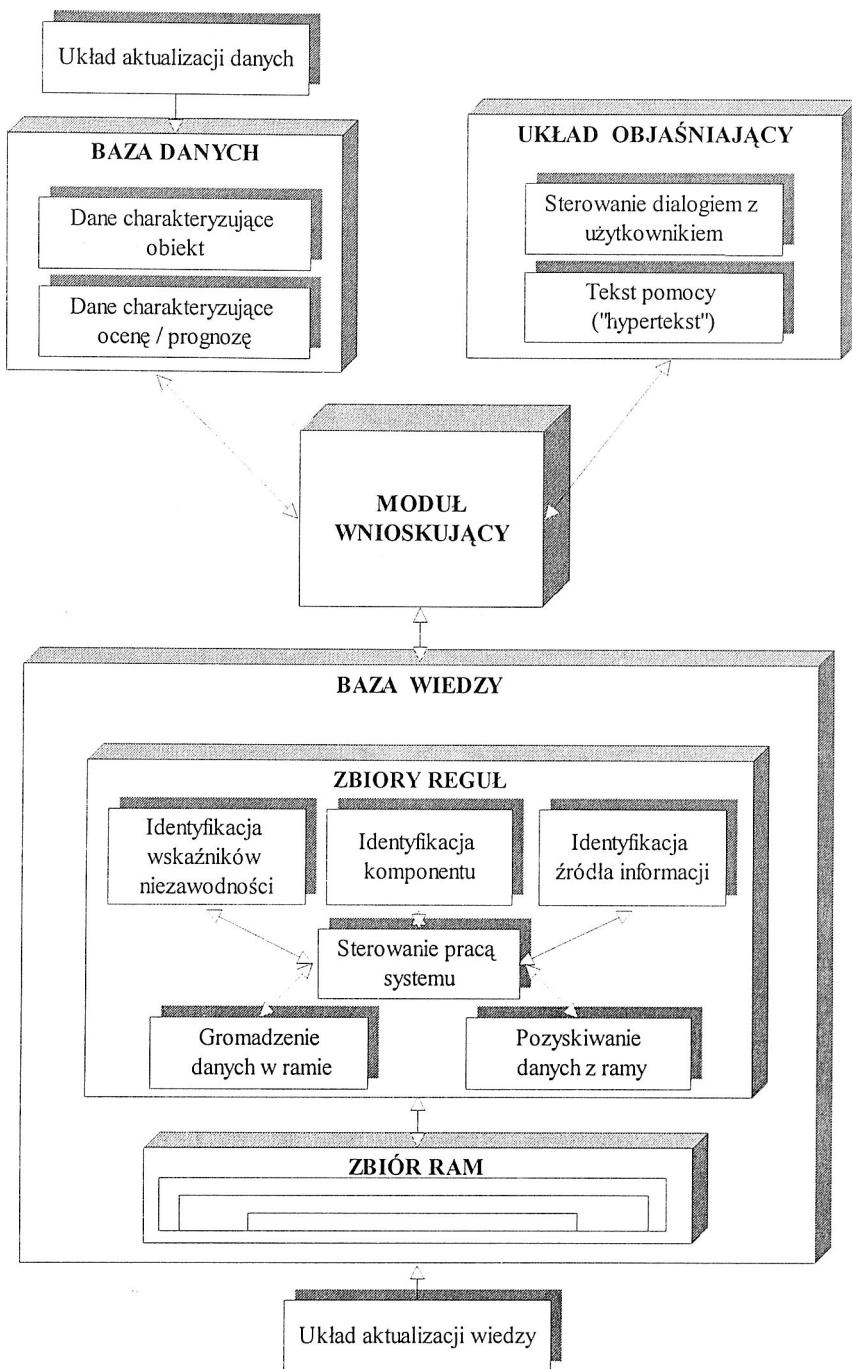
Tabela 6.3. Schemat klasyfikacji niezawodności elementu

Klasa	Nieuszkodzalność lub naprawialność lub gotowość	Prawdopodobieństwo uszkodzenia lub 1 – prawdopodobieństwo naprawy lub 1 – współczynnik gotowości	Częstość uszkodzeń lub względny czas naprawy
1	bardzo dobra	$< 0,0001$	$< 0,01$
2	ponadpodobra	$0,0001 - 0,0005$	$0,01 - 0,02$
3	dobra	$0,0005 - 0,001$	$0,02 - 0,04$
4	ponadprzeciętna	$0,001 - 0,005$	$0,04 - 0,06$
5	przeciętna	$0,005 - 0,01$	$0,06 - 0,08$
6	ponadstateczna	$0,01 - 0,05$	$0,08 - 0,10$
7	dostateczna	$0,05 - 0,10$	$0,10 - 0,13$
8	mierna	$0,10 - 0,15$	$0,13 - 0,16$
9	zła	$0,15 - 0,20$	$0,16 - 0,20$
10	bardzo zła	$> 0,20$	$> 0,20$

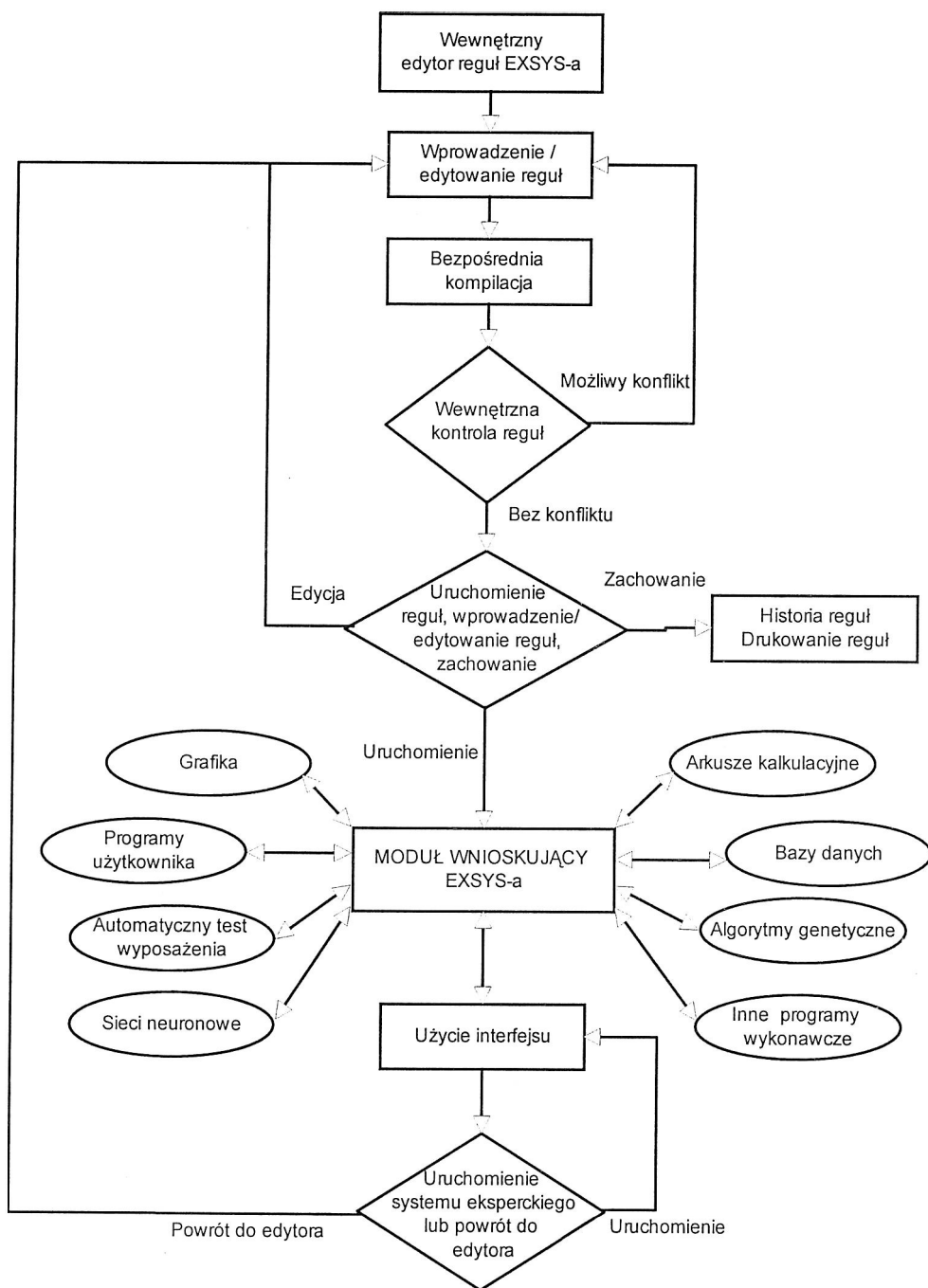
Schemat działania systemu PNOM przedstawiono na rysunku 6.2. W skład programu wchodzi m.in.:

- zbiór reguł sterujących pracą programu,
- zbiór ram zawierających wyniki oceny lub prognozy niezawodności komponentów maszyny,
- zbiór reguł identyfikujących źródło informacji niezawodnościowych,
- zbiór reguł identyfikujących analizowany komponent maszyny,
- zbiór reguł identyfikujących stosowany wskaźnik (charakterystykę) niezawodności,
- zbiór reguł służących do gromadzenia danych w ramach,
- zbiór reguł służących do oszacowania niezawodności obiektu,
- zbiór reguł służących do modyfikacji wyniku oceny ze względu na wpływ środowiska eksploatacji obiektu lub z powodu wzrostu niezawodności.

Schemat budowy regułowej bazy wiedzy (edycji reguł) przedstawiono na rysunku 6.3. Zwrócono uwagę na kolejne etapy sprawdzania możliwych konfliktów i błędów pojawiających się podczas tworzenia bazy wiedzy. Budując bazę wiedzy wykorzystano z wyników badań układu urabiania koparek wielonaczyniowych.



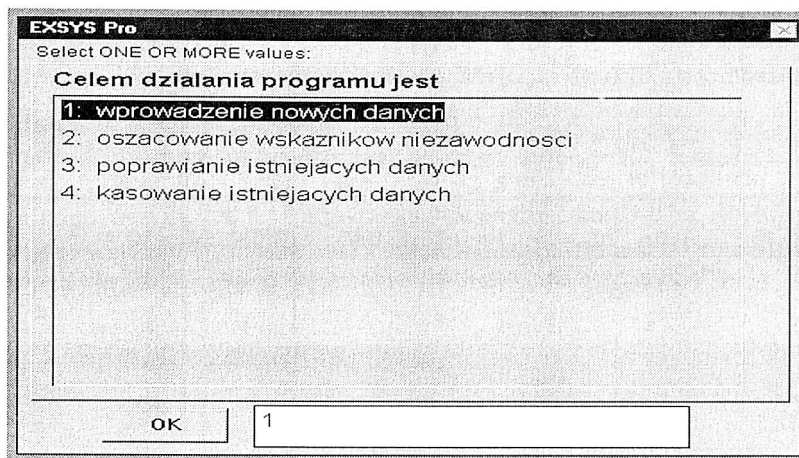
Rys. 6.2. Schemat systemu doradczego PNOM
 Fig. 6.2. Diagram of the PNOM expert system



Rys. 6.3. Schemat edycji reguł w systemie EXSYS
Fig. 6.3. Diagram of a rule edition in the EXSYS system

6.3.1. ZAKRES DZIAŁANIA SYSTEMU

Zakres działania programu obejmuje m.in. wprowadzanie nowych danych niezawodnościowych (wraz z oceną ich stopnia pewności) do ramy odpowiedniej dla analizowanego obiektu oraz oszacowanie wskaźników gotowości, nieszkodzalności lub naprawialności obiektu (rys. 6.4).



Rys. 6.4. Ekran wyboru celu działania programu

Fig. 6.4. Screen of selecting a program goal

6.3.2. ZBIÓR OCEN NIEZAWODNOŚCIOWYCH

Wyniki oszacowania niezawodności poszczególnych elementów obiektu są gromadzone w ramach. Każdemu elementowi odpowiadają 2 ramy:

- rama zawierająca informacje dotyczące uszkodzenia elementu,
- rama zawierająca informacje dotyczące naprawy elementu.

Każda rama jest osobnym zbiorem, nazwanym zgodnie z przyjętym 7-znakowym oznaczeniem kodowym elementu obiektu. Przykład fragmentu ramy „n0000000” pokazano na rysunku 6.5. Informacje są wprowadzane zgodnie z notacją podaną we wzorze (3.2) jako *wartość* (*symbol*) i współczynnik pewności *cf* tej informacji. Kolejne klatki i subklatki (kolumny od 2) określają charakterystyki niezawodności elementu dla określonego źródła informacji (klatka 1).

6.3.3. DEKOMPOZYCJA MASZYN

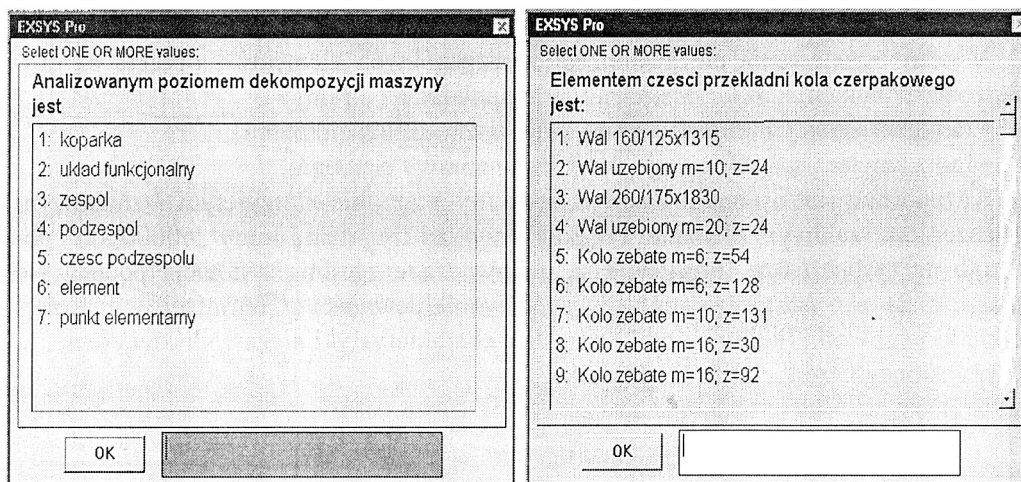
Struktura niezawodności koparki uwzględnia 7 poziomów dekompozycji (rys. 6.6). W programie przygotowano ramy (222 zbiory) dla koparki i jej układów funkcjonalnych oraz elementów przekładni koła czerpakowego i punktów elementarnych koła zębatego.

Edit: C:\exsys16\pro\n0000000 Line 1 Col 1 59 620 Free 43

zr_inf czas												
	+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+											
	wskaznik						funkcja					
	+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+											
	srednia		odc_st		rodzaj		parametr1		parametr2		parametr3	
	+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+											
	wartosc cf		wartosc cf		symb cf		wartosc cf		wartosc cf		wartosc cf	
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+												
stat1	100	1.0	70		weib 0.5 1000	0.9 1.5	0.4					
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+												

Rys. 6.5. Fragment ramy gromadzącej rezultaty oceny naprawialności (n) koparki („0000000”)

Fig. 6.5. Fragment of a frame collecting the results of the evaluating the maintainability (n) of excavator („0000000”)



Rys. 6.6. Ekrany wspomagające wybór analizowanego komponentu maszyny

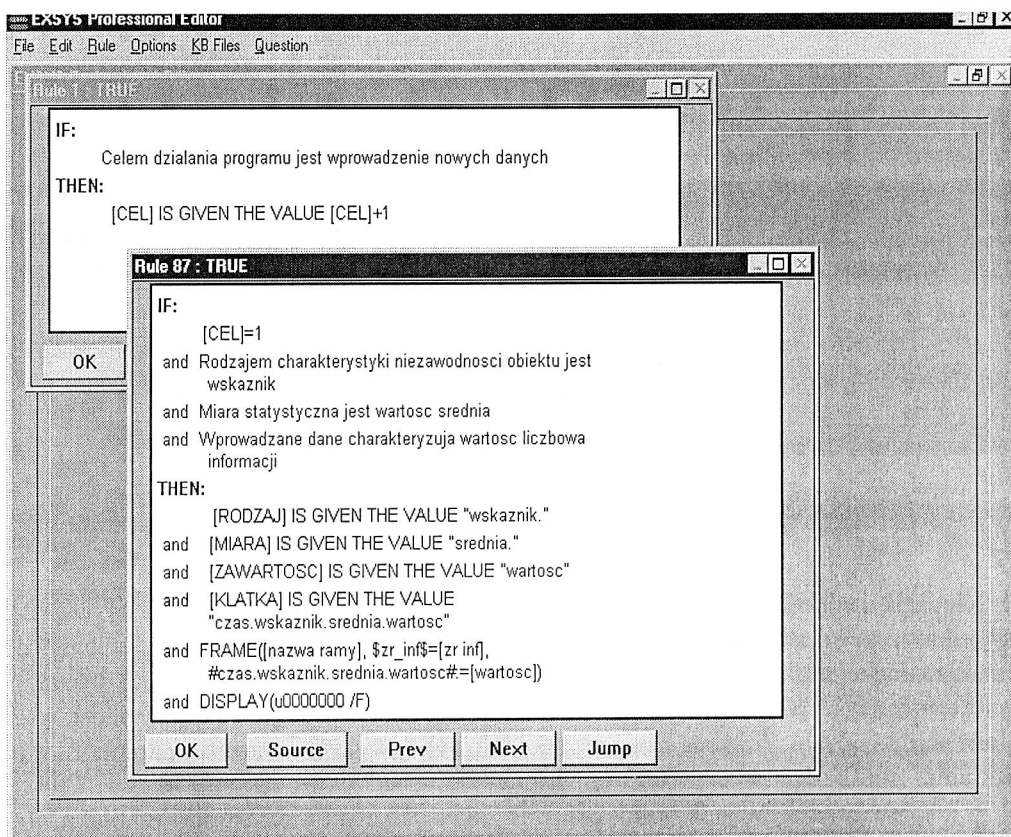
Fig. 6.6. Screens enhancing the choice of the machine component being analysed

6.3.4. WPROWADZANIE NOWYCH DANYCH DO BAZY WIEDZY

Gromadzenie wyników badań wymaga usystematyzowania otrzymanych danych niezawodnościowych. Zastosowano 3-stopniową klasyfikację wyników badań eksploatacyjnych omówioną w rozdziale 3.

Po uwzględnieniu wyników badań niezawodnościowych koparek wyróżniono 2 rodzaje zdarzeń (uszkodzenie, naprawa), 3 rodzaje zmiennej losowej (w funkcji czasu, ilości wykonanej pracy i liczby zdarzeń) oraz 3 rodzaje miar statystycznych (wskaźniki: średnia i odchylenie standardowe, funkcja: dystrybuanta rozkładu zmiennej losowej). Na podstawie tej analizy nazwano klatki i subklatki ramy (rys. 6.5).

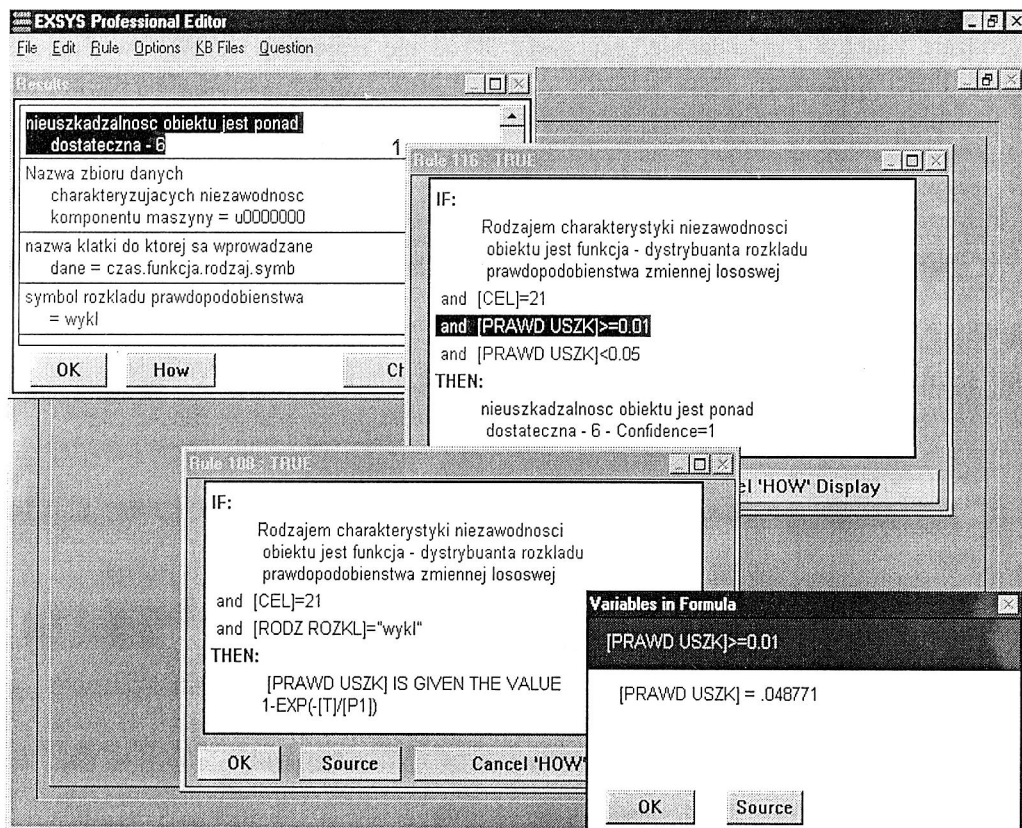
Przykład reguły 87, służącej do wprowadzenia danych do ramy w bazie danych, pokazano na rysunku 6.7. Jeżeli przesłanki są spełnione, to zmienna [KLATKA] otrzymuje odpowiednią nazwę „czas.wskaznik.srednia.wartosc” i do tej klatki jest wprowadzana wartość liczbową wskaźnika nieuszkodzalności odpowiedniego dla danego źródła informacji [ZR INF].



Rys. 6.7. Przykład reguł uruchamianych przy wprowadzaniu informacji do bazy danych
Fig. 6.7. An example of the rules fired during recording data base

6.3.5. PROGNOZA NIEZAWODNOŚCI

W wyniku wnioskowania obiekt zostaje zaklasyfikowany do jednej lub kilku z 10 klas z odpowiednim współczynnikiem pewności. Przykład rezultatu wnioskowania pokazano na rysunku 6.8.



Rys. 6.8. Wyniki oszacowania nieuszkodzalności koparki

Fig. 6.8. Results of evaluating a reliability of an excavator

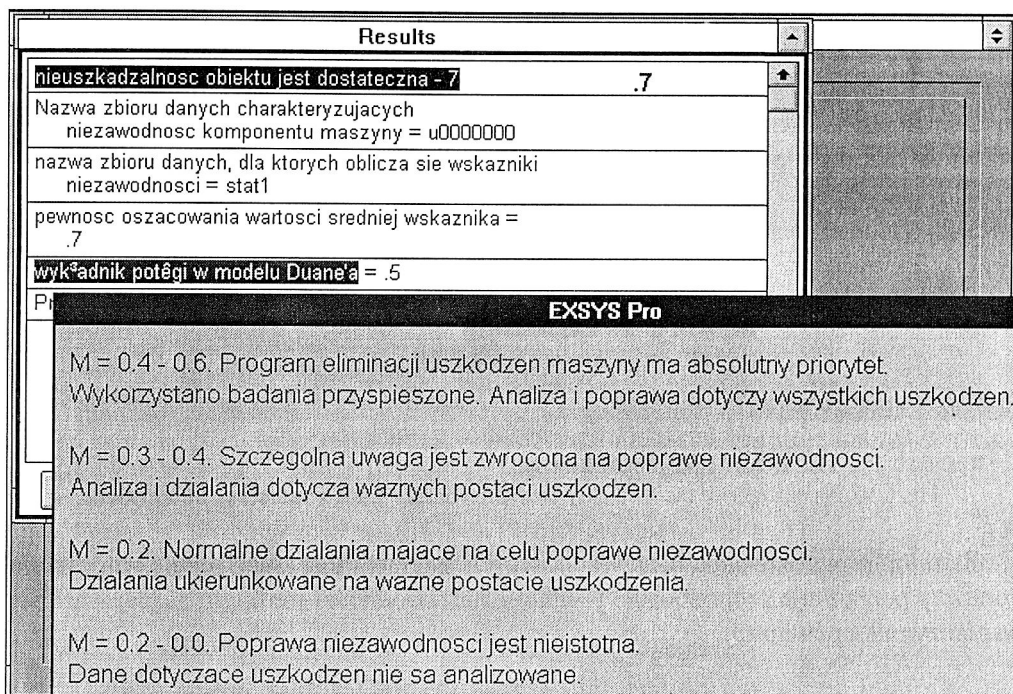
Nieuszkodzalność koparki została oszacowana jako ponaddostateczna ze współczynnikiem pewności 1. Taki wniosek wynika z faktu, że prawdopodobieństwo uszkodzenia (reguła 116) zawiera się w przedziale: $0.01 \leq [PRAWD USZK] < 0.05$.

Wartość $[PRAWD USZK] = 0.049$ została obliczona w regule 108 na podstawie informacji o rodzaju rozkładu prawdopodobieństwa („wykl”) i wartości parametru $P1$ rozkładu.

Przedstawiony wynik wnioskowania zaklasyfikował niezawodność obiektu na podstawie jednego źródła informacji bez uwzględnienia wpływu środowiska eksploatacji lub modelu wzrostu niezawodności.

Na rysunku 6.9 pokazano ekrany dialogu systemu z użytkownikiem podczas modyfikacji oszacowanych wskaźników niezawodności przez wykorzystanie modelu Duane'a. Wybór współczynnika modelu jest wspomagany odpowiednim ekranem hipertekstu.

Model wzrostu niezawodności pozwala na określenie przyszłej klasy niezawodności obiektu. W omawianym przykładzie koparka charakteryzuje się nieuszkodzalnością dostateczną ze współczynnikiem pewności $cf = 0,7$.



Rys. 6.9. Modyfikacja prognozy niezawodności z wykorzystaniem modelu Duane'a

Fig. 6.9. Modification of the reliability prediction using the Duane model

Skutki korzystania z kilku źródeł informacji zilustrowano na rysunku 6.10. Jeżeli kolejne wyniki procesu wnioskowania prowadzą do zaklasyfikowania niezawodności obiektu do tej samej klasy, to wartości współczynników pewności ulegają zwiększeniu. Mimo że częściowe wartości współczynników pewności są małe, końcowa wartość współczynnika wskazuje na zdecydowaną przynależność do danej klasy niezawodności. Nieuszkodzalność koparki została zakwalifikowana do trzech klas:

- klasy 4 (nieuszkodzalność ponadprzeciętna) ze współczynnikiem pewności $cf = 0,6$,
- klasy 3 (nieuszkodzalność dobra) ze współczynnikiem pewności $cf = 0,4$,
- klasy 10 (nieuszkodzalność zła) ze współczynnikiem pewności $cf = 0,3$.

7. WNIOSKI

1. Klasyfikacja metod prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych pozwoliła na wyróżnienie trzech podstawowych klas: metod niezawodności konstrukcyjnej, metod eksperckich i metod analogii statystycznej. Zakres zastosowania poszczególnych metod jest zróżnicowany, m.in. ze względu na sposób uwzględniania obsługiwalności obiektu w strategii utrzymania jego zdatności. Metody prognozowania obsługiwalności (naprawialności) obiektów są najslabiej dopracowane, co w znacznym stopniu ogranicza możliwości prognozowania niezawodności obiektów rozumianej jako ich gotowość. Uzyskanie prognozy niezawodności obiektu mechanicznego wymaga więc syntezy cząstkowych ocen i prognoz niezawodności otrzymanych poszczególnymi metodami.

2. Możliwa jest synteza ocen i prognoz cząstkowych na podstawie miary określającej niepewność analizowanych informacji. Należy rezultaty stosowanych metod prognozowania niezawodności (omówione w rozdziale 2.), które są sformułowane w postaci uporządkowanej trójki

$$\langle o, a, v \rangle = \langle \text{OBIEKT, NAZWA ATRYBUTU, WARTOŚĆ ATRYBUTU} \rangle,$$

a więc bez uwzględniania niepewności danego stwierdzenia, zastąpić uporządkowaną czwórką

$$\begin{aligned} \langle o, a, v, cf \rangle = \\ = \langle \text{OBIEKT, NAZWA ATRYBUTU, WARTOŚĆ ATRYBUTU,} \\ \text{WSPÓŁCZYNNIK PEWNOŚCI} \rangle \end{aligned}$$

Wynik prognozowania jest wobec tego zapisany w postaci:

- OBIEKT – nazwa elementu lub podsystemu zdefiniowanego na odpowiednim poziomie dekompozycji obiektu,
- NAZWA ATRYBUTU – nazwa wskaźnika lub charakterystyki nieuszkodzalności, naprawialności lub gotowości,
- WARTOŚĆ ATRYBUTU – wartość odpowiedniego wskaźnika lub parametru charakterystyki niezawodności,
- WSPÓŁCZYNNIK PEWNOŚCI – stopień zgodności danej informacji z rzeczywistością.

Współczynnik pewności stanowi podstawę do syntezy informacji i wynikiem prognozowania są wskaźniki lub charakterystyki niezawodności o najlepszej charakterystyce pewności informacji.

3. Analiza wyników własnych badań niezawodności obiektów mechanicznych (głównie pojazdów i maszyn roboczych) wskazuje, że trudności z uzyskaniem wiarygodnego oszacowania niezawodności obiektu związane są przede wszystkim z:

- Poziomem dekompozycji obiektu na podsystemy i elementy. Ze względu na ilość zgromadzonych danych doświadczalnych możliwości oceny niezawodności maleją wraz ze stopniem dekompozycji obiektu. Możliwości modelowania wpływu otoczenia systemu użytkowania i obsługiowania jeszcze bardziej zależą od analizowanego poziomu dekompozycji obiektu.

- Problemem uzyskania jednoznacznej interpretacji stanu niezawodnościowego obiektu w trakcie badań statystycznych lub eksperckich. Skutkiem różnic w interpretacji wymagań definiujących stan niezawodnościowy jest pewien stopień subiektywizmu, nawet gdy niezawodność jest oceniana na podstawie metod statystycznych. Wpływ definicji uszkodzenia należy traktować jako czynnik charakteryzujący niepewność zgromadzonych danych, a nie – jak czas eksploatacji lub czynniki otoczenia – jako parametry modelu niezawodności obiektu.

- Rodzajem źródła informacji niezawodnościowych. Porównano zawartość statystycznych baz danych pochodzących ze specjalnie zaprojektowanych systemów informacyjnych i korzystających z dokumentacji eksploatacyjnej gromadzonej w systemach usługowych oraz baz danych powstających na podstawie analizy opinii ekspertów. Na etapie gromadzenia informacji w bazie danych błędy powstają na skutek zamierzonego wprowadzania fałszywych informacji, przypadkowych błędów wypełniania nośników informacji lub braku danych. Stwierdzono, że brak danych praktycznie nie występuje w przypadku korzystania z systemów informacyjnych. W razie korzystania z dokumentacji eksploatacyjnej można natomiast spodziewać się braku nawet 50% wypełnionych rekordów bazy danych. Uznano, że udział danych fałszywych jest mało znaczący. Zgodność wyników oszacowanych na podstawie dokumentacji eksploatacyjnej z wynikami systemów informacyjnych jest dobra w sensie relacji między poszczególnymi komponentami, różnice natomiast w wartościach bezwzględnych są znaczące. Analiza porównawcza ocen ekspertów wskazuje, że oceny dokonane przez ekspertów są prawidłowe. Eksperci mają tendencję do zbyt optymistycznej oceny niezawodności obiektu, tzn. do oszacowania niższej intensywności uszkodzeń i większej trwałości niż wyniki badań statystycznych.

4. Opracowana metodyka może być stosowana do opracowania bazy wiedzy komputerowego systemu doradczego. Analiza umożliwiła sformułowanie reguł służących m.in.:

- dekompozycji obiektu na elementy składowe,
- systematyzacji wyników ocen i prognoz cząstkowych,
- gromadzeniu charakterystyk nieuszkodzalności i naprawialności obiektu,
- oszacowaniu prognoz niezawodności obiektu uwzględniających modele wzrostu jego nieuszkodzalności.

Przetestowano poprawność działania systemu doradczego i stwierdzono prawidłowość realizowanych procesów wnioskowania. Wynikiem wnioskowania systemu jest zaklasyfikowanie niezawodności obiektu do jednej lub kilku spośród 10 klas niezawodności. Zaletą uzyskanej prognozy jest jej wielowartościowość; wyniki prognozowania są uporządkowane według malejącej wartości współczynników pewności prognozy.

LITERATURA

- [1] ADAMKIEWICZ W., HEMPEL., PODSIADŁO A., ŚLIWIŃSKI R., *Badania i ocena niezawodności maszyn w systemie transportowym*. Warszawa, WKŁ, 1983.
- [2] ANDERSEN L.B., NILSEN T., AVEN T., GUERNERI A., MAGLIONE R., *A practical case of assessing subjective probabilities – a discussion of concepts and evaluation of methods*. W: Advances in safety and reliability. Proceedings of the ESREL'97 International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science 1997.
- [3] Applied Design. Report of Committee V.2. 9th International Ship Structures Congress. Genewa 1985.
- [4] ARSENIS S.P., *The ESREDA guidebook on the effective use of safety and reliability data with particular reference to „intelligent” selection from raw reliability data*. W: Advances in safety and reliability. Proceedings of the ESREL'97 International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science 1997.
- [5] ARTYMIAK P., BUKOWSKI L.A., *Koncepcja systemu ekspertowego do prognozowania trwałości wielkogabarytowych elementów maszyn*. W: Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [6] AVEN T., *On the bayesian approach to risk analysis*. W: Advances in safety and reliability. Proceedings of the ESREL'97 International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science 1997.
- [7] BARTNIK G., KUSZ A., MARCINIAK A.W., *Model hybrydowego systemu reprezentacji wiedzy w systemie ekspertowym w zakresie eksploatacji maszyn*. W: Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [8] BAZEWICZ M. i in., *Systemy i technologie informatyczne w badaniach i praktyce*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1996.
- [9] BENDELL A., WALLEY M., WIGHTMAN D.W., WOOD L.M., *Proportional Hazard Modelling in Reliability Analysis – an Application to Brake Discs on High Speed Trains*. Quality and Reliability Engineering International, 1986, Vol. 2.
- [10] BENJAMIN J.R., CORNELL C.A., *Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów*. Warszawa, WNT, 1977.
- [11] BERTODO R.G., *Reliability in automotive design*. Int. J. of Vehicle Design, 1988, Vol. 9, No. 2, s. 140–158.
- [12] BERTRAND G., HAAK R., *Probabilistic safety design by a generalized two parameter approach*. W: Advances in safety and reliability. Proceedings of the ESREL'97 International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science 1997.
- [13] *Bezpieczeństwo procesów przemysłowych (IV)*. Materiały sympozium. Red. A.S. Markowski. Łódź, Wyd. COPRO, 1995.
- [14] BOBROWSKI D., *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności*. Warszawa, WNT, 1985.
- [15] BOCHEŃSKI J.M., *Współczesne metody myślenia*. Poznań, Wyd. Polskiej Prowincji Dominikanów „W drodze”, 1992.
- [16] BOLC L., BORODZIEWICZ W., WÓJCIK M., *Podstawy przetwarzania informacji niepewnej i niepełnej*. Warszawa, PWN, 1991.
- [17] BOŁOTIN W.W., *Metody statystyczne w mechanice budowli*. Warszawa, Arkady, 1968.
- [18] BRANDOWSKI A., *Modele estymacji ocen ekspertów w badaniach niezawodności i bezpieczeństwa*. W: Kształtowanie i obliczanie niezawodności obiektów technicznych w procesie ich projektowania. Materiały XXI Zimowej Szkoły Niezawodności, Radom, MCEMT, 1993.

- [19] BRANDOWSKI A., *Niezawodność subiektywna*. W: Niezawodność obiektów technicznych, Materiały XX Zimowej Szkoły Niezawodności, Radom, MCEMT, 1992.
- [20] BRANDOWSKI A., *Problemy subiektywistycznej oceny niezawodności*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1992, z. 2 (92).
- [21] BRYSZ W., NOWAKOWSKI T., *Analiza obszaru badań maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego zrealizowanych w latach 1989–1996*. W: Metody doświadczalne w budowie maszyn. III konferencja naukowa. Wrocław–Szkłarska Poręba 1997.
- [22] BUBNICKI Z., *Wstęp do systemów ekspertowych*. Warszawa, PWN, 1990.
- [23] BUCIOR J., *Macierzowe modelowanie niezawodności początkowej elementów maszyn*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1995, z. 4 (104).
- [24] BUKOWSKI L., WARSZYŃSKI M., *Niezawodność maszyn i urządzeń hutniczych*. Kraków, Oficyna Wydawnicza FORWARD, 1994.
- [25] CHOLEWA W., *Elementy systemów doradczych, wspomagających badania diagnostyczne maszyn*. W: Sztuczna inteligencja w diagnostyce i nadzorowaniu, IV Naukowa Szkoła Nadzorowania i Diagnostyki Systemów Obróbkowych. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995.
- [26] CHOLEWA W., *Dynamiczne systemy doradcze w diagnostyce technicznej*. W: Kongres Diagnostyki Technicznej KDT'96 Gliwice, Politechnika Śląska, 1996.
- [27] CHOLEWA W., PEDRYCZ W., *Systemy doradcze*. Skrypty uczelniane nr 1447, Gliwice, Politechnika Śląska, 1987.
- [28] CHOLEWA W., *Struktury baz danych i bazy wiedzy w systemie szkieletowym MAS*. Materiały II krajowej konferencji naukowej „Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe”. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1993.
- [29] CHROMIEC J., STRZEMIECZNA E., *Sztuczna inteligencja. Metody konstrukcji i analizy systemów eksperckich*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, 1994.
- [30] CHURCHMAN C.W., *Prognozowanie przyszłości na podstawie przeszłości; ocena trendów przez teorię systemów*. W: Ogólna teoria systemów. Tendencje rozwojowe. Red. G.J. Klir. Warszawa, WNT, 1976.
- [31] CHWIAŁKOWSKA E., *Sztuczna inteligencja w systemach eksperckich*. Warszawa, MICOM, 1991.
- [32] CLAUDE L., TALAVERA C., *Construire la fiabilité avec l'A.M.D.A.O. (Analyse des Modes de defaillance assistée par ordinateur)*. Ingenieurs de l'Automobile 1990, 4.
- [33] COJAZZI G., GUIDA G., PINOLA L., SARDELL R., BARONI P., *KEEJAM: a knowledge engineering methodology for expert judgment acquisition and modeling in probabilistic safety assessment*. W: Advances in safety and reliability. Proceedings of the ESREL'97 International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science 1997.
- [34] CZOGAŁA E., PEDRYCZ W., *Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych*. Warszawa, PWN, 1985.
- [35] DER KINREDHIAN A., JYN-BIN Ke, *Finite-element Based Reliability Analysis of Frame Structures*. W: 4th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR'85.
- [36] *Design Philosophy*. Report of Committee V.1. 9th International Ship Structures Congress. Genewa 1985.
- [37] DIETRICH J., *System i konstrukcja*. Warszawa, WNT, 1985.
- [38] DIN MD 19.12(81). *General principles on the specification of safety requirements for structures*.
- [39] DOD-HDBK-344 (USAF). *Environmental Stress Screening ESS of Electronic Equipment*. Nonelectronic Part Reliability Data, 1983.
- [40] DOWNAROWICZ O., *System eksploatacji. Zarządzanie zasobami techniki*. Biblioteka Problemów Techniki. Radom, Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, 1997.
- [41] DOWNAROWICZ O., *Teoretyczne podstawy eksploatacji obiektów technicznych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 503, Mechanika LXX. Gdańsk, Wyd. Politechniki Gdańskiej, 1993.

- [42] DUDEK D., *Elementy dynamiki maszyn górnictwa odkrywkowego. Akwizycja sygnałów, analiza układów*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1994.
- [43] DUDEK D., NOWAKOWSKI T., *Problems of Degradation and Maintenance of Surface Mine Engineering Machines*. International Symposium on Materials Ageing and Component Life Extension. Milan – Italy, 10–13 October 1995. EMAS Engineering Materials Advisory Services Ltd., 1995.
- [44] DUDEK D., PEKALSKA L., PEKALSKI G., *Materiałowe aspekty degradacji maszyn podstawowych*. Drugie konwersatorium: „Bezpieczeństwo oraz degradacja maszyn”. Wrocław–Szklarska Poręba, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, 1996.
- [45] DYM C.L., *Expert Systems: New Approaches to Computer-aided Engineering*. Engineering with Computers, 1985, Vol.1, No.1.
- [46] *Expert Systems in Practice*. Computer Applications and Service Company. Budapest 1987.
- [47] EXSYS *Professional. Advanced Expert System Development Software. Version 5.1.4.-WIN16*. Manual, Multilogic Inc. 1997.
- [48] FANKHAUSER H. R., REJDEMARK K., *Propagation of uncertainty in coherent structures*. W: Advances in safety and reliability. Proceedings of the ESREL'97 International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science 1997.
- [49] *Fatigue Reliability: A State – of – Art Review*. Journal of the Structural Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. January 1982, Vol. 108, No. ST 1.
- [50] FINDEISEN W., GUTENBAUM J., *Modele w analizie systemowej*. W: Analiza systemowa – podstawy, metodologia. Red. W. Findeisen. Warszawa, WNT, 1985.
- [51] FRUCHTER R., GLUCK J., *Adaptive Multilevel Connections in a Training Learning System for Structural Analysis*. Artificial Intelligence in Design, Berlin–Heidelberg, Springer, 1989.
- [52] GALANC T., MIKUŚ J., *Teoria i praktyka badań prognostycznych obiektów trudno mierzalnych*. Prace Naukowe Instytutu Organizacji i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej nr 57, Seria: Monografie nr 21, Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1991.
- [53] GAŁAŻ R., NOWAKOWSKI T., *Reliability Analysis of Rail-buffers Structure on the Design Level*. Proceedings of International Conference on Engineering Design ICED'85, Hamburg, 26–28 August 1985.
- [54] GERCBACH I.B., KORDOŃSKI Ch.B., *Modele niezawodnościowe obiektów technicznych*. Warszawa, WNT, 1968.
- [55] GOŁĄBEK A., KUSZ G., MŁYŃCZAK M., NOWAKOWSKI T., *System informatyczny oceny niezawodności eksploatacyjnej ładowarki L-220*. Prace Naukowe CPBP 02.05., Warszawa, WAT, 1988.
- [56] GOŁĄBEK A., KUŚMIDROWICZ J., MŁYŃCZAK M., NOWAKOWSKI T., SKIBICKA B., *Badania eksploatacyjne samochodów Sanos A14, Kamaz 5320, Skoda Liaz, Fiat 190*. Raport serii Sprawozdania nr 044/83, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 1983.
- [57] GOŁĄBEK A., MŁYŃCZAK M., NIEDBAŁA W., NOWAKOWSKI T., WERPACHOWSKI W., *Opracowanie projektów norm badań i oceny niezawodności eksploatacyjnej obiektów technicznych*. Część II. Ocena niezawodności. Raport serii Sprawozdania nr 104/84, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1984.
- [58] GOŁĄBEK A., MŁYŃCZAK M., NOWAKOWSKI T., *Informatyczny system oceny eksploatacyjnej niezawodności maszyn podstawowych w górnictwie odkrywkowym*. Górnictwo Odkrywkowe, 1992, R. 33 nr 3/4.
- [59] GOŁĄBEK A., MŁYŃCZAK M., NOWAKOWSKI T., *Ocena eksploatacyjnej niezawodności ładowarki L-220*. Przegląd Mechaniczny, 1990, R. 49 nr 18.
- [60] GOŁĄBEK A., MŁYŃCZAK M., NOWAKOWSKI T., *Ocena parametrów eksploatacyjno-niezawodnościowych silnika SW-400/L220*. Silniki Spalinowe, 1990, R. 30, nr 1/2.

- [61] GOŁĄBEK A., MŁYŃCZAK M., NOWAKOWSKI T., *Analiza niezawodności i trwałości maszyn urabiających o ruchu ciągłym użytkowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji*. Prace Naukowe Centralnego Programu Badań Podstawowych 02.05. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1990.
- [62] GOŁĄBEK A., *Procedury badań i oceny niezawodności maszyn*. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej nr 70, Seria: Monografie nr 21. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1992.
- [63] GREŃ J., *Statystyka matematyczna, modele i zadania*. Warszawa, PWN, 1978.
- [64] GRUDZIŃSKI J., *Ekspertowy system doboru metody szybkiej naprawy maszyn w sytuacjach awaryjnych*. W: Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [65] *Handbook of Reliability Engineering*. Ed. by I.A. USHAKOV and R.A. HARRISON. Wiley, 1994.
- [66] HAUGEN E. B., *Probabilistic Mechanical Design*. Wiley, 1980.
- [67] HEINO P., SUOKAS J., KARVONEN I., *Knowledge Based Support for the Design of Safe and Reliable Process Systems*. Artificial intelligence in design, Berlin–Heidelberg, Springer, 1989.
- [68] HELMER O., *Korzystanie z metod ekspertów*. W: Analiza systemowa – podstawy, metodologia. Red. W. Findeisen. Warszawa, WNT, 1985.
- [69] HUBKA V., EDER W.E., *Theory of technical systems: A total concept theory for engineering design*. Berlin–Heidelberg, Springer, 1988.
- [70] ISO 2394-1986 (E). *General principles on reliability for structures*.
- [71] JAKUBCZAK H., *Ocena dopuszczalnych uszkodzeń zmęczeniowych konstrukcji nośnych maszyn w ujęciu mechaniki pękania*. W: Problemy niezawodności obiektów technicznych i tolerowanie uszkodzeń w procesie realizacji zadań. XXV Jubileuszowa Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 1995.
- [72] JAŻWIŃSKI J., SMAŁKO Z., *Wykorzystanie trójkątnego rozkładu prawdopodobieństwa w ocenie gotowości i niezawodności obiektów technicznych. Problemy niezawodności obiektów technicznych i tolerowanie uszkodzeń w procesie realizacji zadań*. XXV Jubileuszowa Zimowa Szkoła Niezawodności. Szczyrk 1997. Sekcja Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN, 1997.
- [73] JÓŹWIAK I.J., *Zastosowanie modelu hazardów proporcjonalnych Weibulla w badaniach niezawodności systemów technicznych*. Prace Naukowe Centrum Obliczeniowego Politechniki Wrocławskiej 11, Seria: Monografie 3, Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1991.
- [74] KARPIŃSKI J., FIRKOWICZ S., *Zasady profilaktyki obiektów technicznych*. Warszawa, PWN, 1981.
- [75] KARPIŃSKI J., KORCZAK E., *Metody oceny niezawodności dwustanowych systemów technicznych*. Warszawa, Omnitech Press, 1990.
- [76] KARPIŃSKI J., LEWIN W., RUDNICKI J., *Prognozowanie niezawodności elementów i układów elektrycznych w procesie projektowania*. W: XXI Szkoła Zimowa „Kształtowanie i Obliczanie Niezawodności Obiektów Technicznych w Procesie Ich Projektowania”. Radom, MCNEMT, 1993.
- [77] KOPOCIŃSKI B., *Zarys teorii odnowy i niezawodności*. Warszawa, PWN, 1973.
- [78] KOSMOWSKA A., *Statystyczne metody prognozowania niezawodności*. VII Szkoła Niezawodności RELEMA, Niezawodność w etapie projektowania obiektów technicznych. Bydgoszcz, TNOiK, 1983.
- [79] KUPRASZEWICZ W., *Szkieletowy system doradczy w diagnozowaniu silnika spalinowego*. W: Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [80] LEŚIŃSKI S., *Niezawodność łączników energoelektrycznych*. Warszawa, WNT, 1983.
- [81] ŁUCZAK A., MAZUR T., *Fizyczne starzenie elementów maszyn*. Warszawa, WNT, 1981.
- [82] ŁUKASZEWSKI T., *Adaptacja modelu współczynnika pewności do rozproszonych i adaptacyjnych systemów wnioskowania*. W: Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.

- [83] MARCINIAK A.W., *Problem niezawodności systemów funkcjonujących w dynamicznie zmiennym środowisku*. XXII Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 1994.
- [84] MATTHIASSEN B., *Robust design of mechanical systems*. W: Proceedings of ICED '95, 10th International Conference on Engineering Design, Praha 1995. Ed. V. Hubka and Programme Committee. WDK 23. Edition HEURISTIA 1995.
- [85] MCCOLLIN C., WIGHTMAN D.W., *The Collection Problems and an Analysis Methodology for Large Failure Data Sets*. Research Report No. 5/94. Department of Mathematics, Statistics and Operational Research, Nottingham, The Nottingham Trent University, 1995.
- [86] McMAHON C., BROWNE J., *CAD CAM. From principles to practice*. Addison – Wesley 1993.
- [87] MICHAŁEWICZ M., WIERZCHOŃ T., KŁOPOTEK M., *Architektura systemu ekspertowego opartego o model propagacji niepewności Shenoya–Shafera*. W: Materiały II konferencji naukowej „Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe”, Wrocław, 15–17 czerwca 1993. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1993.
- [88] MITCHELL S.R., JONES R., HINDE C., *An Initial Data Model, Using the Object-Oriented Paradigm, for Sculptured-Feature-Based Design*. Research in Engineering Design, London, Springer, 1995, Vol. 7, No. 1.
- [89] MŁYŃCZAK M., NOWAKOWSKI T., *Ocena niezawodności pojazdu na podstawie dokumentacji eksploatacyjnej*. W: II konferencja naukowo-techniczna „Pojazdy samochodowe problemy postępu i rozwoju”. Autoprogres '86. Jadwisin, PIMot, WITPS, 1986.
- [90] MŁYŃCZAK M., *Kryteria oceny ryzyka w eksploatacji maszyn*. W: Bezpieczeństwo oraz Degradacja Maszyn. I konwersatorium. Wrocław– Szklarska Poręba 1995. Wrocław, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, 1995.
- [91] MŁYŃCZAK M., *Przyczyny i skutki uszkodzeń w analizie bezpieczeństwa maszyn*. W: „Bezpieczeństwo oraz degradacja maszyn”. I konwersatorium. Wrocław–Szklarska Poręba 1995. Wrocław, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, 1995.
- [92] MOCZULSKI W., WYLEŻOŁ M., *Pozyskiwanie relacji empirycznych dla potrzeb diagnostyki maszyn*. W: Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [93] MULAŁKA J.J., *Systemy ekspertowe*. Warszawa, WNT, 1996.
- [94] MURATA T., *An application of fuzzy set theory to reliability analysis: Reliability prediction for equipment usin fuzzy inference*. W: Reliability and safety analysis under fuzziness. T. Onisawa, J. Kacprzyk, Heidelberg, Physica-Verlag, 1995.
- [95] MURZEWSKI J., *Niezawodność konstrukcji inżynierskich*. Warszawa, Arkady, 1989.
- [96] *Niezawodność autobusów*. Red. A. Gołabek. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1993.
- [97] NOWAKOWSKI T., *Knowledge base for machine reliability design prediction*. W: „Proceedings of ICED'95”, 10th International Conference on Engineering Design, Praha 1995. Ed. V. Hubka and Programme Committee. WDK 23. Edition HEURISTIA 1995, Vol. 3.
- [98] NOWAKOWSKI T., *Analysis of uncertainty of mechanical components dependability data*. W: „Advances in safety and reliability”. Proceedings of the ESREL'97 International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science 1997.
- [99] NOWAKOWSKI T., *Baza wiedzy do wspomagania statystycznej oceny bezpieczeństwa maszyn*. W: „Problemy rozwoju maszyn roboczych”. VIII konferencja. Zakopane 1995.
- [100] NOWAKOWSKI T., *Baza wiedzy jako rezultat badań eksploatacyjnych maszyn*. VI konferencja „Rozwój podstaw budowy, eksploatacji i badań maszyn roboczych ciężkich, w tym budowlanych. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1993.
- [101] NOWAKOWSKI T., *FMECA maszyn – problem oszacowania częstości zdarzeń*. Pierwsze konwersatorium: „Bezpieczeństwo oraz degradacja maszyn”. Wrocław–Szklarska Poręba, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, 1995.

- [102] NOWAKOWSKI T., *Information limitations of reliability and safety assessment*. Information Systems Architecture and Technology ISAT'94, Proceedings of 16th Scientific School. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1994.
- [103] NOWAKOWSKI T., *Kryterium niezawodności w projektowaniu maszyn*. W: Kształtowanie i obliczanie niezawodności obiektów technicznych w procesie ich projektowania, XXI Zimowa Szkoła Niezawodności. Radom, Inst. Techn. Ekspl., 1993.
- [104] NOWAKOWSKI T., *Metodyka badań eksploatacyjnych obiektów technicznych*. II konferencja naukowa „Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn”. Wrocław–Szklarska Poręba, 1995.
- [105] NOWAKOWSKI T., *Polityka remontowa w aspekcie postulatów trwałości i niezawodności*. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej nr 52, seria Konferencje nr 15. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1987.
- [106] NOWAKOWSKI T., *Problemy reprezentacji niepewności danych niezawodnościowych*. W: Problemy niezawodności obiektów technicznych. XXV Jubileuszowa Zimowa Szkoła Niezawodności. Radom, Inst. Techn. Ekspl., 1997.
- [107] NOWAKOWSKI T., *Problemy wykorzystania nadmiaru informacyjnego do podwyższenia niezawodności maszyn*. W: Kształtowanie i obliczanie niezawodności obiektów technicznych w procesie ich projektowania, XXI Zimowa Szkoła Niezawodności. Radom, Inst. Techn. Ekspl., 1993.
- [108] NOWAKOWSKI T., SAMOŁYK J., *Rezultaty badań niezawodności jako wytyczne do projektowania konstrukcji statku śródlądowego*. W: Zapewnienie niezawodności w procesach projektowania i wytwarzania obiektów technicznych. Materiały Szkoły zimowej '90. Katowice, OPT, 1990.
- [109] NOWAKOWSKI T., *System doradczy do prognozowania niezawodności elementów maszyn*. W: Problemy niezawodności obiektów technicznych. XXVI Zimowa Szkoła Niezawodności. Radom, Inst. Techn. Ekspl., 1998.
- [110] NOWAKOWSKI T., *The Analysis of Reliability Test Methods for Means of Transport*. Zuverlässigkeit technischer Systeme, WDK 15. Zurich, HEURISTA, 1988.
- [111] NOWAKOWSKI T., *The Influence of the Operating Environment on Bus Reliability*. Reliability Technology – Theory & Applications. Ed. by J. Moltoft and F. Jensen. Elsevier, 1986.
- [112] NOWAKOWSKI T., *Wpływ warunków użytkowania na niezawodność pojazdu na przykładzie autobusu miejskiego PR110U*. Praca doktorska. Raport Serii Preprinty nr 047 (647)/80, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
- [113] NOWAKOWSKI T., *Wykorzystanie systemów ekspertowych do oceny bezpieczeństwa maszyn*. Problemy Maszyn Roboczych 1994, z. 3, Vol. 3.
- [114] NOWAKOWSKI T., *Wyniki badań eksploatacyjnych w projektowaniu niezawodności maszyn*. V konferencja: „Rozwój podstaw budowy, eksploatacji i badań maszyn roboczych ciężkich, w tym budowlanych”. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1992.
- [115] NOWAKOWSKI T., *Założenia bazy wiedzy do prognozowania niezawodności maszyn*. W: Przyczyny i skutki uszkodzeń obiektów technicznych. XXIV Zimowa Szkoła Niezawodności. Radom, Inst. Techn. Ekspl., 1996.
- [116] O'CONNOR P.D.T., *Effectiveness of Formal Reliability Programmes*. Quality and Reliability Engineering International, 1985, Vol. 1, No. 1.
- [117] O'CONNOR P.D.T., *Practical reliability engineering*. Wiley, 1991.
- [118] ONISAWA T., *System reliability from the viewpoint of evaluation and fuzzy sets theory approach*. W: Reliability and safety analysis under fuzziness. T. Onisawa, J. Kacprzyk, Heidelberg, Physica-Verlag, 1995.
- [119] OPRZĄDKIEWICZ J., *Metody sztucznej inteligencji w monitorowaniu niezawodności*. W: „Problemy niezawodności obiektów technicznych i tolerowanie uszkodzeń w procesie realizacji zadań”. XXV Jubileuszowa Zimowa Szkoła Niezawodności. Radom, Inst. Techn. Ekspl., 1997.

- [120] OPRZĄDKIEWICZ J., *Symulacja w syntezie niezawodności systemów technicznych*. W: Problemy niezawodności obiektów technicznych. XXVI Zimowa Szkoła Niezawodności. Radom, Inst. Techn. Ekspł., 1998.
- [121] OPRZĄDKIEWICZ J., *Wspomaganie komputerowe w niezawodności maszyn*. Warszawa, WNT, 1993.
- [122] OSIŃSKI Z., WRÓBEL J., *Teoria konstrukcji maszyn*. Warszawa, PWN, 1982.
- [123] OZIEMSKI S., *Elementy oceny stanu technicznego maszyny*. W: Drugie konwersatorium „Bezpieczeństwo oraz degradacja maszyn”. Wrocław, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, 1996.
- [124] OZIEMSKI S., *Niezawodność i bezpieczeństwo maszyn*. Część I–IV. Przegląd Mechaniczny, 1985, z. 8–11.
- [125] OZIEMSKI S., *Poziom jakości wykonywanego przez maszynę zadania jako podstawa doboru zakresu odnów*. W: Pierwsze konwersatorium „Bezpieczeństwo oraz degradacja maszyn”. Wrocław, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, 1995.
- [126] OZIEMSKI S., *Związek modelu utrzymania maszyny w ruchu z trwałością jej zespołów na przykładzie koparki uniwersalnej*. W: Modelowanie niezawodnościowe obiektów technicznych. Materiały Szkoły Zimowej '87, Katowice, OPT, 1987.
- [127] PABIS S., *Metodologia i metody nauk empirycznych*. Warszawa, PWN, 1985.
- [128] PAWLAK M., *Systemy ekspertowe w eksploatacji maszyn*. Lublin, Politechnika Lubelska, 1996.
- [129] PAWLAK Z., *Systemy informacyjne. Podstawy teoretyczne*. Warszawa, WNT, 1983.
- [130] PETROSKI H., *To engineer is human. The role of failure in successful design*. New York, St. Martin's Press, 1985.
- [131] PETTERSSON L., *Data bank quality*. W: Advances in safety and reliability. Proceedings of the ESREL'97 International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science 1997.
- [132] PIASECKI S., *Elementy teorii niezawodności i eksploatacji obiektów o elementach wielostanowych*. Warszawa, IBS PAN, 1995.
- [133] PN-80/N-0400. *Niezawodność w technice. Terminologia*.
- [134] PN-83/N-04041.05. *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Ogólne zasady badań*.
- [135] PN-83/N-04041.10. *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Zbieranie i opracowanie danych o niezawodności obiektów technicznych*.
- [136] PN-85/N-04041/04. *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Struktury niezawodnościowe systemów technicznych*.
- [137] PN-90/N-04041/09. *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Modele wzrostu niezawodności*.
- [138] PN-92/N-04050/01. *Niezawodność w technice. Obliczanie wskaźników niezawodności ślizgowych skojarzeń trących pracujących w warunkach tarcia mieszanego. Podstawy obliczeniowe*.
- [139] PN-93/N-50191, *Słownik terminologiczny elektryki. Niezawodność; jakość usług*.
- [140] PN-IEC 812. *Techniki analizy nieuszkodzalności systemów. Procedura analizy rodzajów i skutków uszkodzeń (FMEA)*.
- [141] *Poradnik Niezawodności. Inżynieria niezawodności*. Red. Janusz Migdałski. Warszawa, Wyd. Przemysłu Maszynowego „WEMA”, 1992.
- [142] *Poradnik Niezawodności. Podstawy matematyczne*. Red. Janusz Migdałski. Warszawa, Wyd. Przemysłu Maszynowego „WEMA”, 1982.
- [143] PRAŻEWSKA M., *Niezawodność urządzeń elektronicznych*. Warszawa, WKŁ, 1987.
- [144] PRAŻEWSKA M., *Prognozowanie niezawodności urządzeń elektronicznych w projektowaniu*. W: Zapewnienie niezawodności w procesach projektowania i wytwarzania obiektów technicznych, Materiały Szkoły Zimowej '90. Katowice, OPT, 1990.
- [145] PRAŻEWSKA M., *Prognozowanie niezawodnościowe*. W: Problemy niezawodności transportu. ITWL 313/93.

- [146] PRAŻEWSKA M., *Prognozowanie obsługiwalności w projektowaniu*. W: Problemy niezawodności obiektów technicznych. XXVI Zimowa Szkoła Niezawodności. Inst. Techn. Ekspł. Radom 1998.
- [147] PROCACCIA H., AUFORT P., ARSENIS S., *The european industry reliability data bank EIReDa*. W: Advances in safety and reliability. Proceedings of the ESREL'97 International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science 1997.
- [148] PRZYSTUPA W.F., *Metody minimalizacji niepewności informacji eksploatacyjnej*. W: Trzecie konwersatorium „Bezpieczeństwo oraz degradacja maszyn”. Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
- [149] PRZYSTUPA W.F., *Problemy doboru diagnosty dla systemu bezpieczeństwa*. W: Pierwsze konwersatorium „Bezpieczeństwo oraz degradacja maszyn”. Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
- [150] ROSIAUX C., BLONDEL M., *La F.M.E.C.A. en mécanique*. Ingenieurs de l'Automobile 1978, 4.
- [151] RYCHTERA M., *Prognozowanie trwałości obiektów technicznych*. W: Prognozowanie trwałości obiektów technicznych. Skrypty Szkoły Niezawodności RELEMA, t. XIX, TNOiK, Bydgoszcz 1985.
- [152] SCHNEIDER M., KANDEL A., *FAES – fault analysis expert system*. W: Reliability and safety analysis under fuzziness. T. Onisawa, J. Kacprzyk, ed. Physica-Verlag, Heidelberg 1995.
- [153] SEIDLER J.A., *Fundamental concepts of intelligent info system theory*. Information Systems Architecture and Technology ISAT'94, Proceedings of 16th Scientific School. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994.
- [154] SMÁLKO Z., *Modelowanie eksploatacyjnych systemów transportowych*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Inst. Techn. Ekspł. Radom 1996.
- [155] SMÁLKO Z., *Oszacowanie subiektywnej niezawodności obiektów technicznych*. W: Materiały Szkoły Zimowej '88 „Problemy niezawodności w utrzymaniu ruchu systemów eksploatacyjnych”, OPT, Katowice 1988.
- [156] SMÁLKO Z., *Podstawy eksploatacji technicznej pojazdów*. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1987.
- [157] SMÁLKO Z., *Podstawy projektowania niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych*. PWN, Warszawa 1972.
- [158] SOBCZYKIEWICZ W., *Wymiarowanie spawanych konstrukcji nośnych maszyn w zakresie trwałości zmęczeniowej*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika z. 157 Warszawa., Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1994.
- [159] SOŁOWJEW A.D., *Analityczne metody w teorii niezawodności*. Warszawa, WNT, 1983.
- [160] SOTSKOW B.S., *Niezawodność elementów i urządzeń automatyki*. Warszawa, WNT, 1973.
- [161] STAJSZCZAK M., SZOPA T., *Racjonalne oddziaływanie na niezawodność obiektu mechanicznego w fazie jego konstruowania*. W: Modelowanie niezawodności obiektów technicznych. Materiały Szkoły Zimowej '87, Katowice, OPT, 1987.
- [162] STELMASZCZYK Z., *Prognozowanie niezawodności funkcjonowania lotniczych silników turbinowych*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 1974, z. 4 (20).
- [163] SZALA M., *Pewna realizacja ramowej bazy wiedzy dla systemów ekspertowych*. W: Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe, Materiały II Krajowej Konferencji Naukowej. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1993.
- [164] SZOR J. B., KUŹMIN F. I., *Ocena niezawodności urządzeń. Tablice*. Warszawa, WNT, 1970.
- [165] SZYMANKIEWICZ F. i in., *Podniesienie poziomu niezawodności i gotowości eksploatacyjnej ładowarek*. Prace Naukowe CPBP 02.05., Politechnika Warszawska, Warszawa 1990.
- [166] *The reliability of mechanical systems*. Ed. by DAVIDSON J. The Institution of Mechanical Engineers 1994.

- [167] TRACZYK W., *Kryteria wyboru wariantów w syntezie systemów ekspertowych*. W: Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe, Materiały II krajowej konferencji naukowej. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1993.
- [168] URBANIAK H., *Analiza przyczyn i skutków uszkodzeń FMEA*. Przegląd Mechaniczny 14/94.
- [169] URBANIAK H., *Analiza przyczyn i skutków uszkodzeń konstrukcji FMEA – wyroby o najniższym poziomie złożoności*. Przegląd Mechaniczny 15/94.
- [170] VILLEMEUR A., *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment*. Wiley 1992.
- [171] WALKER E., *Proportional Hazards Modelling for the Analysis of Reliability Field Data*. Praca dyplomowa Department of Mathematics, Statistics and Operational Research, The Nottingham Trent University 1995 (niepublikowana).
- [172] WARSZYŃSKI M., *Niezawodność w obliczeniach konstrukcyjnych*. PWN, Warszawa 1988.
- [173] WARSZYŃSKI M., *Obliczenia projektowo-konstrukcyjne układów mechanicznych w aspekcie ich niezawodności*. W: Modelowanie niezawodnościowe obiektów technicznych. Materiały Szkoły Zimowej '87, Katowice, OPT, 1987.
- [174] WIGHTMAN D. W., BENDELL A., *The Practical Application of Proportional Hazards Modelling*. Reliability Engineering 15/1986.
- [175] WRÓBLEWSKI Z., *Wielowariantowa metoda prognozowania niezawodności styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego z bieżącej produkcji*. Prace Naukowe Instytutu Energetyki Politechniki Wrocławskiej nr 80, Seria: Monografie nr 21, Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1988.
- [176] ZAMOJSKI W., *Niezawodność i eksploatacja systemów*. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1981.

THE METHODS OF THE PREDICTION OF MECHANICAL OBJECT DEPENDABILITY

The problems dealing with the prediction of mechanical object dependability are considered. Based on the criteria accepted, the methods of the dependability prediction are divided into the following classes: 1 – the methods of structural reliability, 2 – the expert methods and 3 – the methods of statistical analogy. We propose such a dependability prediction that requires the evaluation of the measure which describes the uncertainty of the information collected and is connected with estimations and predictions of reliability and maintainability. The factor of information certainty is considered as the basis of information synthesis. The dependability factors with the best certainty characteristics are the prediction results. The results of my investigations dealing with the dependability of mechanical objects (mainly vehicles and engineering machines) allow me to formulate the rules that can be applied to: 1 – an object decomposition which gives its components, 2 – systematization of evaluations and partial predictions, 3 – collection of the characteristics of reliability and maintainability of an object, and 4 – evaluation of the factor of information certainty. The method of synthesis of the certainty factors of partial predictions is applied to developing computer expert system. Based on this system operation we are able to classify an object dependability among one or several of ten dependability classes.

Translated by Ewa Sobesto

SPIS RZECZY

Ważniejsze oznaczenia	3
1. Wprowadzanie	7
Wstęp	7
1.1. Podstawowe pojęcia i definicje	8
1.1.1. Niezawodność	8
1.1.2. Prognozowanie	10
1.1.3. Obiekt mechaniczny	10
1.1.4. Niepewność informacji	12
1.2. Cel i zakres pracy	13
2. Klasyfikacja metod prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych	18
2.1. Niezawodność konstrukcyjna $\{1, 0, 0, 1, 1\}$	20
2.1.1. Metody poziomu 3.	22
2.1.2. Metody poziomu 2.	23
2.1.3. Metody poziomu 1.	24
2.2. Metody eksperckie $\{0, 1, 0, 0, 1\}$	25
2.3. Metody analogii statystycznej $\{1, 1, 1, 1, 0\}$	28
2.3.1. Model intensywności uszkodzenia elementu	29
2.3.2. Matematyczne modele wzrostu niezawodności	31
3. Założenia metodyki prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych	33
3.1. Obiekt	33
3.2. Nazwa atrybutu	35
3.3. Wartości atrybutów	41
3.3.1. Wpływ czasu eksploatacji na wartości charakterystyk niezawodności..	41
3.3.1.1. Metody statystyczne	42
3.3.1.2. Metody fizyczne	44
3.3.2. Wpływ otoczenia na niezawodność obiektu	45
3.3.2.1. Metoda podobieństwa	47
3.3.2.2. Model regresyjny	48
3.3.2.3. Model proporcjonalnego ryzyka	48
3.4. Współczynnik pewności	49
3.4.1. Modele statystyczne	51
3.4.1.1. Podejście obiektywne	51
3.4.1.2. Podejście subiektywne	54
3.4.2. Modele niestatystyczne	56
3.4.2.1. Teoria Dempstera-Shafera	56
3.4.2.2. Model MYCIN	57
3.4.2.3. Teoria zbiorów rozmytych	58
3.4.3. Porównanie modeli	59

4. Analiza charakterystyk niezawodności obiektów mechanicznych.....	61
4.1. Wpływ czasu eksploatacji	61
4.2. Wpływ otoczenia	74
4.3. Wpływ definicji uszkodzenia	81
5. Analiza niepewności danych niezawodnościowych	86
5.1. Badania statystyczne	88
5.1.1. System SNX	88
5.1.2. Dokumentacja eksploatacyjna DE.....	91
5.1.3. Porównanie ocen niezawodności na podstawie SNX i DE	93
5.2. Opinie ekspertów	96
5.3. Porównanie ocen uzyskanych różnymi metodami	100
6. System doradczy do prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych (PNOM).....	102
6.1. Koncepcja systemu doradczego	102
6.2. Założenia systemu doradczego PNOM	104
6.2.1. Struktura niezawodności maszyny	104
6.2.2. Reprezentacja wiedzy	104
6.2.2.1. Regułowa reprezentacja wiedzy.....	105
6.2.2.2. Ramowa reprezentacja wiedzy.....	107
6.2.3. Relacja dziedziczenia	109
6.2.4. Współczynniki pewności informacji.....	109
6.3. Komputerowa realizacja systemu doradczego PNOM.....	111
6.3.1. Zakres działania systemu.....	115
6.3.2. Zbiór ocen niezawodnościowych	115
6.3.3. Dekompozycja maszyny.....	115
6.3.4. Wprowadzanie nowych danych do bazy wiedzy.....	117
6.3.5. Prognoza niezawodności	118
7. Wnioski.....	121
Literatura	123
The methods of prediction of the mechanical object dependability (summary).....	132

CONTENTS

Denotations.....	3
1. Preface	7
Introduction	7
1.1. Basic notions and definitions.....	8
1.1.1. Dependability	8
1.1.2. Prediction	10
1.1.3. Mechanical object	10

1.1.4. Uncertainty of information.....	12
1.2. Aim and scope of the paper.....	13
2. Classification of the methods of prediction the mechanical objects dependability	18
2.1. Structural reliability.....	20
2.1.1.Methods of the third level	22
2.1.2. Methods of the second level.....	23
2.1.3. Methods of the first level	24
2.2. Expert methods.....	25
2.3. Methods of statistical analogy	28
2.3.1. Model of the element failure rate	29
2.3.2. Mathematical models of the reliability growth	31
3. Assumptions about the dependability prediction of mechanical objects.....	33
3.1.Object	33
3.2. Attribute name.....	35
3.3. Attribute value.....	41
3.3.1. Effect of operation time on dependability characteristics	41
3.3.1.1. Statistical methods	42
3.3.1.2. Physical methods	44
3.3.2. Effect of environment on object dependability	45
3.3.2.1. Similarity method.....	47
3.3.2.2. Regression method.....	48
3.3.2.3. Model of proportional hazard	48
3.4. Certainty factor.....	49
3.4.1. Statistical models.....	51
3.4.1.1. Objective approach	51
3.4.1.2. Subjective approach	54
3.4.2. Non-statistical models	56
3.4.2.1. The Demster–Schafer theory	56
3.4.2.2. The MYCIN model.....	57
3.4.2.3. Theory of fuzzy sets.....	58
3.4.3. Comparison of models	59
4. Analysis of the characteristics of mechanical object dependability	61
4.1. Effect of operation time.....	61
4.2. Effect of environment.....	74
4.3. Effect of failure definition.....	81
5. Analysis of the uncertainty characteristics of dependability data.....	86
5.1. Statistical tests	88
5.1.1. The SNX information system.....	88
5.1.2. Operational documentation (DE)	91
5.1.3. Comparison of dependability estimations on the basis of SNX and DE	93

5.2. Expert opinions.....	96
5.3. Comparison of estimations obtained by means of various methods.....	100
6. Expert system for the prediction of mechanical object dependability (PNOM)...	102
6.1. The idea of expert system.....	102
6.2. Assumptions about the PNOM expert system.....	104
6.2.1. Machine reliability structure	104
6.2.2. Knowledge representation.....	104
6.2.2.1. Rule-based knowledge representation	105
6.2.2.2. Frame-based knowledge representation.....	107
6.2.3. Relation of inheritance	109
6.2.4. Factor of information certainty.....	109
6.3. Computer realization of the PNOM expert system	111
6.3.1. Range of the system operation	115
6.3.2. File of dependability assessments	115
6.3.3. Machine decomposition	115
6.3.4. Implementation of new data in data base	117
6.3.5. Dependability prediction	118
7. Conclusions	121
References	123
The methods of the prediction of mechanical object dependability (summary).....	132

PRACE NAUKOWE INSTYTUTU KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN
(wydane w latach 1992–1999)

- Nr 67, Monografie nr 18, A. Gronowicz, *Identyfikacja mechanizmów dźwigowych z więzami biernymi*, Wrocław 1992
- Nr 68, Monografie nr 19, J. Marcinkowski, *Podstawy określania charakterystyk sprężyn powietrznych*, Wrocław 1992
- Nr 69, Monografie nr 20, R. Czarny, *Badania zjawisk związanych z przepływem smarów plastycznych w układach smarowniczych*, Wrocław 1992
- Nr 70, Monografie nr 21, A. Gołębek, *Procedury badań i oceny niezawodności maszyn*, Wrocław 1992
- Nr 71, Monografie nr 22, E. Adamczyk, *Synteza strukturalna i geometryczna wysięgników ładowarek łyżkowych*, Wrocław 1992
- Nr 72, Monografie nr 23, W. Twaróg, *Teoria mechanizmów maltańskich*, Wrocław 1993
- Nr 73, Monografie nr 24, C. Koziarski, *Sprężenie kół ciernych w przekładniach bezstopniowych*, Wrocław 1993
- Nr 74, Konferencje nr 20, *Boundary Element Techniques and Singularity Methods in Engineering. II International Conference*, Wrocław 1993
- Nr 75, Konferencje nr 21, *Biomechanika '94*, Wrocław 1994
- Nr 76, Konferencje nr 22, *Methodological Foundations of Computer Aided and Computer Automated Design*, Wrocław 1994
- Nr 77, Konferencje nr 23, *Problemy edukacyjne i badawcze współczesnej logistyki*, Wrocław 1995
- Nr 78, Konferencje nr 24, *Projektowanie i badanie maszyn – kierunki rozwoju*, Wrocław 1995
- Nr 79, Monografie nr 25, J. Grajert, *Podstawy teoretyczno-doświadczalne projektowania zawiesznień pneumatycznych*, Wrocław 1996
- Nr 80, Monografie nr 26, S. W. Szepietowski, *Metoda oceny zapotrzebowania energetycznego mechanizmu urabiania wielonaczyniowych koparek kołowych*, Wrocław 1996
- Nr 81, Monografie nr 27, S. Krawiec, *Wpływ synergizmu wybranych napelniaczy w smarze na zwiększenie trwałości ślizgowych węzłów maszyn*, Wrocław 1998

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w następujących księgarniach:
„Politechnika”

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
bud. A-1 PWr., tel. (0-71) 320-25-34,
„Tech”

plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
bud. D-1 PWr., tel. (0-71) 320-32-52

Prowadzimy sprzedaż wysyłkową

ISSN 0324-962X