



**Bronisław Słowiński**  
**PODSTAWY**  
**BADAŃ I OCENY**  
**NIEZAWODNOŚCI**  
**OBIEKTÓW**  
**TECHNICZNYCH**

Politechnika Koszalińska

Bronisław Słowiński

**PODSTAWY BADAŃ I OCENY  
NIEZAWODNOŚCI  
OBIEKTÓW TECHNICZNYCH**

Koszalin 2002



SKRYPT WYDZIAŁU MECHANICZNEGO DO PRZEDMIOTU  
PODSTAWY EKSPLOATACJI

ISBN 83-87424-86-2

Przewodniczący Uczelnianej Rady Wydawniczej  
*Szymon Pałkowski*

Opiniodawca  
*Joachim Potrykus*

Redaktor  
*Jerzy Ignaciuk*

Projekt okładki  
*Tadeusz Walczak*

Skład  
*Maciej Drzycimski*

© Copyright by Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej  
Koszalin 2002

WYDAWNICTWO UCZELNIANE POLITECHNIKI KOSZALIŃSKIEJ  
75–620 Koszalin, ul. Raławicka 15–17

---

Koszalin 2002, wyd. IV, ark. wyd. 8,2, format B–5, nakład 400 egz.  
Druk: Polimer, Koszalin

## Spis treści

Spis oznaczeń . . . . .	7
Przedmowa . . . . .	9
Przedmowa do wydania II . . . . .	10
Ogólne wskazówki metodyczne . . . . .	11
<b>1. PODSTAWY PROJEKTOWANIA NIEZAWODNYCH MASZYN I URZĄDZEŃ . . . . .</b>	<b>14</b>
1. 1. Problematyka niezawodności . . . . .	14
1. 2. Niezawodność a projektowanie . . . . .	17
1. 3. Proces decyzyjny . . . . .	20
1. 4. Zużycie zdeterminowane a zużycie losowe . . . . .	27
1. 5. Dezyderaty do maksymalizacji niezawodności . . . . .	30
1. 6. Synteza niezawodnościowa obiektu . . . . .	33
1. 7. Wpływ warunków otoczenia na niezawodność obiektu . . . . .	34
1. 8. Współzależność współczynnika bezpieczeństwa $x$ oraz niezawodności $R$ . . . . .	35
<b>2. JAKOŚĆ A EKSPLOATACJA . . . . .</b>	<b>42</b>
2. 1. Jakość w technice . . . . .	42
2. 2. Cechy określające jakość . . . . .	45
2. 3. Plany badań wyrywkowych . . . . .	46
2. 4. Zmiany parametrów stanu technicznego w czasie . . . . .	53
2. 5. Ocena jakości eksploatacyjnej obiektów - resursy . . . . .	59
<b>3. USZKODZENIA OBIEKTÓW TECHNICZNYCH . . . . .</b>	<b>64</b>
3. 1. Model procesu uszkodzenia obiektu technicznego . . . . .	64
3. 2. Klasyfikacja uszkodzeń . . . . .	67
3. 3. Przyczyny uszkodzeń . . . . .	69
3. 4. System gromadzenia danych o uszkodzeniach . . . . .	75
<b>4. ELEMENTY TEORII I TECHNIKI NIEZAWODNOŚCI . . . . .</b>	<b>80</b>
4. 1. Miara jakości cech użytkowych . . . . .	80
4. 2. Wykładnicze prawo niezawodności . . . . .	87
4. 3. Metodyka wyznaczania niezawodności . . . . .	89
4. 4. Niezawodność a struktura obiektu . . . . .	98
4. 5. Wpływ struktury obiektu na niezawodność . . . . .	103



---

5. METODOLOGIA BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH . . . . .	108
5. 1. Rozwiązywanie problemów w nauce i technice . . . . .	108
5. 2. Programowanie i realizowanie badań eksploatacyjnych . . . . .	109
5. 3. Badanie niezawodności w naturalnych warunkach eksploatacji . . . . .	113
5. 4. Zastosowanie teorii niezawodności do oceny obiektów mechanicznych . . . . .	114
5. 5. Plany badań niezawodnościowych . . . . .	117
5. 7. Liczność i losowość próbki do badań . . . . .	119
6. TECHNIKA OBRÓBK I WNIOSKOWANIA STATYSTYCZNEGO . . . . .	124
6. 1. Wstępne opracowanie wyników . . . . .	125
6. 2. Wyrównywanie wyników pomiarów . . . . .	132
6. 3. Prognozowanie na podstawie rozkładu normalnego . . . . .	135
6. 4. Prognozowanie na podstawie rozkładu wykładniczego . . . . .	138
6. 5. Prognozowanie na podstawie rozkładu gamma . . . . .	139
6. 6. Prognozowanie na podstawie rozkładu Weibulla . . . . .	145
7. TECHNIKI EKSPLOATACYJNE - WNIOSKOWANIE MERYTORYCZNE . . . . .	149
7. 1. Sterowanie niezawodnością obrabiarek . . . . .	151
7. 2. Metody utrzymania w ruchu obrabiarek . . . . .	156
7. 3. Zadania i metody diagnostyki technicznej . . . . .	158
7. 4. Przykład techniki poprawy niezawodności narzędzi ściemych . . . . .	163
8. ZADANIA DO PRAC KONTROLNYCH . . . . .	168
8. 1. I praca kontrolna . . . . .	168
8. 2. II praca kontrolna . . . . .	170

## Spis oznaczeń

- A - wskaźnik jakości cech użytkowych,
- AQL - wadliwość dopuszczalna,
- a - parametr skali rozkładu Weibulla,
- b - parametr kształtu rozkładu Weibulla,
- C - cechy (parametry) wejściowe obiektu,
- D - minimalna dopuszczalna wartość,
- $D_u$  - wskaźnik dogodności użytkowania,
- E - moduł sprężystości podłużnej,
- $e_A$  - elementy aktywne obiektu,
- $e_N$  - elementy podstawowe obiektu,
- $e_O$  - elementy obiektu technicznego,
- $e_P$  - elementy pasywne obiektu,
- $e_R$  - elementy rezerwowe obiektu,
- $f(t)$  - gęstość prawdopodobieństwa,
- $F(t)$  - dystrybuanta trwałości,
- G - maksymalna dopuszczalna wartość,
- $G(x)$  - wskaźnik gotowości,
- H - skumulowana intensywność uszkodzeń-ryzyko skumulowane,
- h - godziny pracy obiektu,
- i - dowolna wartość badanego parametru,
- K - numer odwrotny pomiaru w szeregu uporządkowanym,
- k - kryterium przyjęcia,
- $k_z$  - naprężenia dopuszczalne,
- L - liczba wartości zmiennej t,
- $L_r$  - wartość ресурсu eksploatacyjnego,
- m - liczba przestojów w dostatecznie długim czasie,
- n - liczebność próbki,
- $n_t$  - liczebność uszkodzeń w czasie t,
- $N_o$  - liczba wszystkich elementów zbioru,
- $N_t$  - liczba elementów nieuszkodzonych w czasie t,
- $O_d$  - kryterium odrzucenia,
- p - prawdopodobieństwo,
- $R(t)$  - funkcja niezawodności,
- s - wykładnik potęgowy,



- t - czas bieżący,
- $t_m$  - czas maszynowy operacji,
- $t_z$  - zapas ресурсu,
- $t_\alpha$  - statystyka Studenta,
- $T_k$  - konkretna wartość zmiennej losowej t,
- $T_o$  - trwałość optymalna,
- $\bar{T}$  - wartość średnia (miara położenia zmiennej losowej t),
- $Q_F(t)$  - funkcja obciążeń zmiennej w czasie,
- $Q_e(t)$  - funkcja odporności wewnętrznej (jakość eksploatacyjna),
- q - wartość ryzyka popełnienia błędu,
- U(t) - parametr użytkowy,
- u - średni czas między uszkodzeniami,
- $u_i$  - zmienna losowa unormowana rozkładu normalnego,
- W - stan techniczny obiektu,
- w - warunki środowiskowe,
- Z - parametry wyjściowe obiektu - zużycie zdeterminowane,
- Z(f) - diagnozowany parametr stanu,
- $Z_p$  - wartość początkowa parametru stanu,
- $Z_{gr}$  - wartość graniczna parametru stanu,
- $Z_{zm}$  - zmierzona wartość parametru stanu,
- $Z_{gr}^*$  - prognozowana wartość parametru stanu,
- V - intensywność zmian parametru wyjściowego,
- v - współczynnik zmienności,
- $\lambda$  - intensywność uszkodzeń-współczynnik ryzyka,
- $\varphi$  - liczba uszkodzeń-parametr rozkładu gamma,
- $\sigma$  - wartość naprężenia,
- $\sigma_u$  - odchylenie standardowe dla próbki,
- $\sigma_{u-1}$  - odchylenie standardowe dla populacji,
- $\alpha$  - poziom istotności,
- x - błąd prognozy trwałości - współczynnik bezpieczeństwa,
- $\chi^2$  - rozkład chi-kwadrat,
- $\chi_\alpha^2$  - statystyka rozkładu chi-kwadrat,
- $\tau'$  - okres eksploatacji,
- $\tau''$  - okres odnowy,
- $\varepsilon$  - błąd eksperymentalny.

## Przedmowa

Dlaczego jeden samochód jest lepszy od drugiego, dlaczego jedno narzędzie zużywa się znacznie szybciej od drugiego o takich samych cechach budowy, jak oceniać te różnice, czy można przewidzieć rzeczywisty czas pracy różnych wyrobów technicznych? - to podstawowe pytania, na które próbuję dać odpowiedź w tym skrypcie. Jest on pomyślany jako pomoc dydaktyczna dla studentów kierunku Mechanika, studiujących zwłaszcza w systemie zaocznym. Zebrano w nim podstawowe informacje z zakresu badań i oceny niezawodności obiektów technicznych; niezawodność bowiem jest jedną z cech eksploatacyjnych każdej maszyny, urządzenia czy też narzędzia. Jest to także jedna z niewielu cech użytkowych obiektu, która poddaje się obiektywnemu pomiarowi, zatem umiejętność mierzenia niezawodności, a także świadomego wpływania na jej wartość, ma poważne znaczenie praktyczne. Z drugiej strony, problematyka niezawodności mało jest jeszcze rozpowszechniona wśród inżynierów mechaników z powodu pozornie złożonego opisu pojęciowego oraz potrzeby stosowania statystyki matematycznej. Skrypt ten ma na celu przybliżenie tych zagadnień na tyle, aby były zrozumiałe dla osób nie zajmujących się na codzień problematyką niezawodności i badań eksploatacyjnych.

Zgodnie z celem dydaktycznym skryptu, został on poświęcony głównie podstawom technik niezawodnościowych i badań eksploatacyjnych. Nie zawiera więc treści takich działów eksploatacji, jak: ogólna teoria eksploatacji, tribologia, teoria użytkowania i obsługi obiektów technicznych, teoria zapasów materiałów eksploatacyjnych i części zamiennych, organizacja remontów i ich opłacalność. Tak przyjęty zakres tematyczny skryptu był podyktowany potrzebami procesu dydaktycznego w zakresie kształcenia inżynierów konstruktorów i technologów budowy maszyn.

Autor pragnie szczególnie gorąco podziękować Opiniodawcy skryptu, dr hab. inż. Joachimowi Potrykusowi - profesorowi Politechniki Wrocławskiej, za wnikliwą i bardzo pracowitą recenzję oraz życzliwe i inspirujące uwagi, które pozwoliły w sposób istotny ulepszyć tekst skryptu.

Autor



## Przedmowa do wydania II

Niniejsza książka jest nową wersją I wydania skryptu ujmującego podstawy nauki o niezawodności. Został on uzupełniony o rozdział, w którym próbuje, dać odpowiedź na pytanie: czy i w jaki sposób można uwzględniać niezawodność na etapie projektowania obiektu? Przesłanką do uzupełnienia skryptu o taki rozdział było założenie, że nie mając wpływu na to co się będzie „zdarzać” w życiu obiektu, możemy jednak te zdarzenia przewidywać i tak „kształcić” obiekt, aby był na nie odporny.

Trudność polega jednak na tym, że nie możemy wszystkiego przewidzieć do końca. Jednym z aspektów rzeczywistości jest bowiem czynnik losowy - przypadkowość zdarzeń. Mentalność człowieka natomiast dąży do deterministycznego ujęcia rzeczywistości. Przykładem takiego podejścia jest również i postawione przeze mnie wyżej pytanie: czy można uwzględniać niezawodność (a więc pewne prawdopodobieństwo) na etapie wyznaczania zdeterminowanych charakterystyk obiektu (wymiarów, kształtu, właściwości itp). Wszyscy więc jesteśmy „dziećmi” tego systemu (myślenia), chociaż coraz częściej on nas ogranicza i próbujemy z niego wyjść.

Złożoności zjawisk zachodzących w obiektach technicznych nie można opisać posługując się tradycyjnymi deterministycznymi metodami. Liczba możliwych informacji o zachowaniu się użytkowanych obiektów fizycznych jest tak duża, że nawet najbardziej pojemne komputery nie są w stanie jej przetworzyć.

Dokonanie oceny obiektu technicznego jako systemu z uwzględnieniem zachowania się w warunkach użytkowania możliwe jest tylko przy stosowaniu metod opartych na statystyce i rachunku prawdopodobieństwa. Sposoby wykorzystania tych metod do prognozowania trwałości obiektów technicznych ujmuje właśnie teoria niezawodności, czyli nauka o przewidywaniu uszkodzeń. Ostatnie pół wieku to intensywny rozwój tej nauki, z podstawami której chciałbym zapoznać czytelników tej książki.

Z życzeniami sukcesów na drodze zgłębiania  
teorii niezawodności

Autor

## Ogólne wskazówki metodyczne

Skrypt pt. „Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych” przeznaczony jest do przedmiotu **Podstawy eksploatacji**. Obejmuje zarys technik niezawodnościowych, tj. zbiór praktycznych metod badania i prognozowania trwałości eksploatacyjnej obiektów technicznych. Niezawodność obiektu w sensie opisowym „jest to jego zdolność do spełnienia wymagań”, a w sensie wartościowania „jako prawdopodobieństwo poprawnej pracy w określonym czasie i określonym środowisku”.

Przedstawiane w skrypcie zagadnienia wiążą się ściśle z teorią eksploatacji. Przedmiotem badań teorii niezawodności jest proces przewidywania uszkodzeń obiektów. Posługując się określonym modelem trwałości, dostarcza on konstruktorowi lub eksploatacysty wskaźników niezawodnościowych, pozwalających przewidywać żywotność całej populacji takich obiektów.

W trójczłonowym układzie nauk eksploatacyjnych, teoria niezawodności ma miejsce pośrednie pomiędzy tribologią a teorią eksploatacji (eksploatatyką). O ile tribologia dotyczy zagadnień zużywania się pojedynczych obiektów, to teoria niezawodności uogólnia te zagadnienia do dużej grupy takich obiektów, a eksploatayka podaje zasady i politykę ich użytkowania. W wyniku badań niezawodnościowych uwidaczniają się pozytywne i negatywne cechy różnych urządzeń technicznych, uzyskane w procesie projektowania i wytwarzania. Są to cenne informacje dla konstruktorów i technologów.

Zagadnienia ujęte w skrypcie mają przybliżyć studentom Wydziału Mechanicznego techniki przewidywania okresów poprawnej (niezawodnej) pracy dowolnych obiektów technicznych, które zostały wykonane przez człowieka dla realizacji określonego celu działania, a **celem budowy każdego obiektu technicznego jest jego eksploatacja**.

Podstawą postawienia prognozy dotyczącej trwałości samochodu, obrabiarki, narzędzia, telewizora itp. są wcześniejsze badania statystyczno - eksploatacyjne takich obiektów.

Eksploatacyjne badania niezawodności są realizowane na wybranej próbie, reprezentatywnej dla danej populacji generalnej obiektów, a zatem niezawodność obiektów oceniana jest przed ich wprowadzeniem do eksploatacji - przed doświadczeniem (*a priori*). Eksploatacyjne badania niezawodności obejmują trzy etapy:

- organizację badań,
- zbieranie informacji o uszkodzeniach,
- przetwarzanie uzyskanych informacji.



W skrypcie podano podstawowe wiadomości i techniki prowadzenia takich badań: podstawy metodologiczne analizy doświadczeń, opracowania wyników oraz zasady wnioskowania statystycznego na podstawie wyników badań.

O niezawodności decyduje bieżący stan techniczny obiektu zależny głównie od jego „wrodzonej” odporności na uszkodzenia (jakości). Dlatego też problematyka niezawodności wiąże się ściśle z zagadnieniami jakości. Można powiedzieć, że „niezawodność jest to jakość rozciągnięta w czasie”

Podstawowym narzędziem pozwalającym w porę wykryć lub zabezpieczyć obiekt techniczny przed niespodziewanym uszkodzeniem, jest diagnostyka techniczna. Problematyka diagnostyki technicznej obejmuje takie zagadnienia jak: diagnozowanie, dozorowanie, genezowanie i prognozowanie stanów technicznych. Zgodnie z celem dydaktycznym skryptu, szczególną uwagę zwrócono na metody postępowania, dotyczące prognozowania stanu obiektów, bez omawiania procesów technologicznych diagnozowania, ponieważ te z kolei są charakterystyczne dla danego rodzaju obiektu, np. diagnostyka obrabiarki, telewizora itp. W wyniku przerobionego materiału student powinien mieć świadomość przyczyn, jakie składają się na takie czy inne zachowanie się obiektów technicznych podczas ich użytkowania, umiejętność określania rzeczywistych stanów technicznych tych obiektów i umiejętność przewidywania zachowań eksploatacyjnych w przyszłości. Umiejętności tych nabywa przez studiowanie materiału poszczególnych rozdziałów skryptu, będącego pewnym kompendium wiedzy podstawowej z danego tematu, jak też samodzielne rozwiązywanie przykładowych zadań eksploatacyjnych w ramach I i II pracy kontrolnej.

Pogłębianie wiedzy o tych zagadnieniach wymaga korzystania z literatury źródłowej, której spis podano na zakończenie każdego rozdziału ( podano tylko źródła ogólnie dostępne ).

Treść skryptu została ujęta w 8 rozdziałów tworzących zamknięte zagadnienia, niemniej jednak integralnie ze sobą powiązane. Tytuły rozdziałów są tematami spotkań na kolejnych zjazdach i winny być wcześniej przeanalizowane przez studentów (z wyjątkiem rozdziału 1, którego treść winna być usystematyzowana po pierwszym zjeździe). Przystudiowanie pierwszych czterech rozdziałów pozwala na samodzielne opracowanie zadań podanych w I pracy kontrolnej, którą należy złożyć na 4 zjeździe.

Treść rozdziałów 5 i 6 jest podstawą do opracowania zadań eksploatacyjnych ujętych ramami II pracy kontrolnej.

Nabywanie praktycznej umiejętności rozwiązywania zagadnień eksploatacyjnych wymaga samodzielnego opracowania I i II pracy kontrolnej.

---

W tym celu dane wejściowe w zadaniach ujętych tymi pracami, zostały zróżnicowane dla każdego studenta.

Wzory i tablice ujęte w skrypcie są wystarczające do rozwiązywania zadań z prac kontrolnych, bez potrzeby korzystania z innych materiałów źródłowych. Bardzo przydatnym, a wręcz nieodzownym, wyposażeniem studenta w zakresie rozwiązywania zagadnień niezawodnościowych jest kalkulator z funkcjami statystycznymi. Przy posiadaniu takiego wyposażenia, przewidywane obciążenie czasowe na wykonanie pracy kontrolnej wynosi po 2 godz. na każdy z rozpracowywanych rozdziałów skryptu.

# 1. PODSTAWY PROJEKTOWANIA NIEZAWODNYCH MASZYN I URZĄDZEŃ

## 1. 1. Problematyka niezawodności

Wyprodukowano już „coś”: maszynę, urządzenie czy narzędzie (ogólnie mówiąc - obiekt techniczny) **i co dalej ?**

Często nie zastanawiamy się nad tym pytaniem - bo przecież wiadomo. Nie zawsze jednak wiadomo - jaka jest tego przydatność użytkowa, jaki jest pożytek z tego co zostało wyprodukowane?

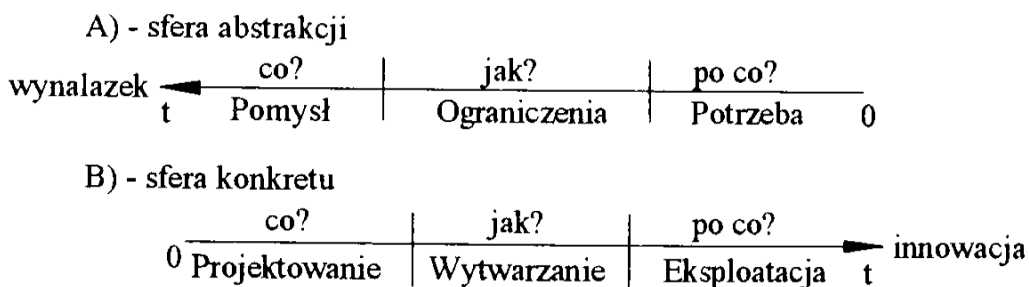
„Moją rolą było odkryć” - powiedział wynalazca dynamitu Alfred Nobel. Po refleksji jednak nad skutkami tego: „i co dalej”?, przekazuje w testamencie cały swój majątek na przeciwdziałanie efektom tego wynalazku. Nie wszystko zatem co zostało obmyślane i wyprodukowane ma społeczny sens istnienia.

„Każde udoskonalenie techniczne musi mieć przede wszystkim na celu samego człowieka i jego los. Nie zapominajcie o tym nigdy, pogrążając się w waszych wykresach i równaniach” - mówił Albert Einstein do pracowników naukowych Kalifornijskiego Instytutu Technologicznego [1].

Wytworzone każde „coś” jest odpowiedzią na zaistniałą potrzebę, ale potrzeba taka nie powinna być sprzeczna z ogólnymi celami życia i losem człowieka.

Przemysłowe wytwarzanie każdego „czegoś” jest procesem działań losowych, nad którym panowanie należy do twórców (projektantów) i wytwórców (technologów). Pierwszym przypisuje się działania myślowe - sferę abstrakcji (to co powstaje dzięki ich umysłowi), a drugim działania czynne - sferę konkretów (całą wytworzoną rzeczywistość materialną). Przemysłowym procesem realizacji nazywamy ciąg zdarzeń, którego istotą jest zmiana stanów układu konkretnego lub abstrakcyjnego [7].

Porządek działań w przemysłowym procesie realizacji obejmuje zatem sferę abstrakcji i sferę konkretnego - rys. 1.



Rys. 1. Porządek działań w przemysłowym procesie realizacji:  
A - w sferze abstrakcji, B - w sferze konkretnego

Porządek działań nad „konkretem” przedstawia się następująco:

1. Sporządzenie dokumentacji (wynałazku) jako zapisu konstrukcji (jak dotychczas najczęściej mającej postać rysunków).
2. Wykonanie wyrobu zgodnie z zapisem konstrukcji.
3. Eksploatowanie wyrobu jako środka technicznego.

Wyrób wprowadzany do eksploatacji staje się środkiem technicznym (obiektem naszych zainteresowań) dzięki swemu działaniu zgodnemu z naszymi potrzebami (jeżeli jest to obiekt nowego typu - to jest też innowacją).

Wszystko co nas otacza, jako wytwory cywilizacji, kiedyś, gdzieś, przez kogoś musiało być wynalezione. **Zanim coś się wydarzy w świecie zewnętrznym, najpierw musi się zdarzyć w świecie wewnętrznym.** Jeżeli człowiek może znaleźć wystarczająco dużo powodów, by coś zrobić, może zmusić się do działania. Powód dla którego działa, jest dla niego o wiele silniejszym bodźcem niż sam cel działania. Tym powodem jest potrzeba. Ona jest argumentem stanowiącym o różnicy między prostym zainteresowaniem sprawą, a pełnym zaangażowaniem się w jej realizację. Porządek działań nad „abstraktem” (wynałazkiem) ma natomiast kolejność odwrotną.

1. Analizowanie potrzeby środka technicznego.
2. Przewidywanie warunków eksploatacji i przyjęcie miar niezawodności, tj. właściwości wytworu jako środka technicznego.
3. Konstruowanie, tj. obmyślanie własności tego wytworu.

Czynności tej sfery działań dotyczą więc fazy wartościowania, tzn. kreowania wyrobu, opracowania jego koncepcji funkcjonalnej i założeń projektowych.

Uzyskiwane dzięki działaniom projektowym i wytwórczym: maszyny, urządzenia pojazdy i inne obiekty techniczne są przekazywane do eksploatacji. Jest to ostatni element operacyjny w procesie zaspokajania potrzeb. Każdy zatem obiekt jest produkowany po to aby go eksploatować. i jak pisze Janusz Dietrych [2]: **„eksploatacja środków technicznych jest nieuchronnym doświadczeniem”**.

Odbiorcą wyrobów jest ,jak wiadomo, rynek tworzony przez konsumentów. W systemie gospodarki rynkowej jemu podporządkowany jest całokształt filozofii produkcji. Trwałe przekształcenie kultury uprzedmiotowionej dokonuje się dopiero po wchłonięciu i przyswojeniu innowacji w wymiarze masowym. Proces ten nazywa się słowem **cywilizacja**. Mamy więc trzy aspekty tworzące jedną całość (nazywane triadą Schumpetera):

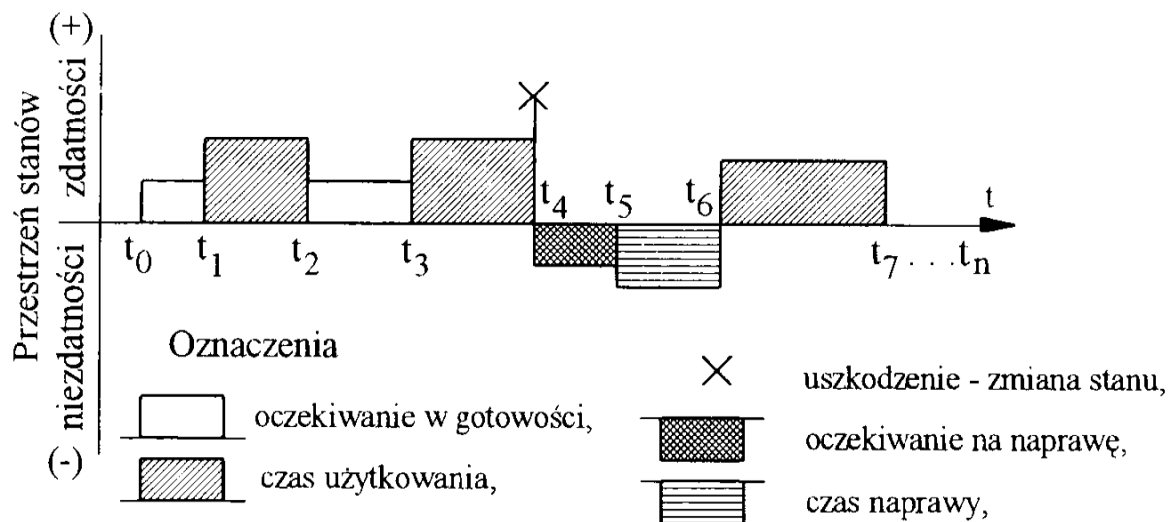
- prototyp (obmyślanie),
- stereotyp (upowszechnianie),
- cywilizacja (przyswojenie).

Okres eksploatacji rozpoczyna się od momentu, w którym obiekt znajdzie się w dyspozycji użytkownika i jest gotowy (zdatny) do pełnienia określonych funkcji lub je pełni. **Zdolność obiektu do pełnienia tych funkcji w określonych warunkach i w określonym czasie nazywa się niezawodnością.**

Podstawą badania procesu eksploatacji jest analiza zmian obiektu w funkcji czasu. Ogół wewnętrznych cech maszyny (obiektu) w jakiejś chwili  $t$  będziemy nazywać jej stanem.

Proces zmian jakościowych jest procesem ciągłym, co oznacza, że zbiór możliwych stanów tej maszyny jest nieskończony, a więc nieprzeliczalny. Zachodzi zatem potrzeba podzielenia tego zbioru na niewielką liczbę skończonych klas stanów (przy czym każda klasa zawierać winna stany o jednakowych cechach wybranych jako kryteria zakwalifikowania).

Z punktu widzenia użytkownika maszyny lub innego dowolnego obiektu technicznego najistotniejszy jest podział na dwie klasy stanów: zdatności i niezdatności. Graficzny obraz takich stanów pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Przebieg procesu eksploatacji obiektu technicznego

Do jednej klasy zalicza się wszystkie stany maszyny gdy była ona sprawna (była niezawodna), do drugiej - stany gdy była niesprawna (zawiodła nas). Opisywaniem tej pierwszej klasy stanów zajmuje się teoria niezawodności, a tej drugiej - teoria odnowy.

Przejęcie ze stanu zdatności do stanu niezdatności nazywa się uszkodzeniem. Określenie tego: co rozumiemy przez pojęcie „uszkodzenie” (tym zajmuje się diagnostyka) pozwala przyjąć bardzo ważne do dalszych rozważań

założenie, że obiekt może się znajdować tylko w jednej z dwóch klas stanów: zdatności lub niezdatności. Klasy te następują po sobie tworząc cykl zdarzeń eksploatacyjnych, który nazywamy procesem eksploatacji.

**Proces eksploatacji** jest to więc funkcja odwzorowująca zbiór chwil czasu eksploatacji w zbiór stanów eksploatacji. Całościowe sterowanie procesem eksploatacji wymaga zatem umiejętności posługiwania się teorią niezawodności i odnowy, a także znajomości zagadnień diagnostyki technicznej [8]. Wszystko to po to aby można było podjąć racjonalną decyzję eksploatacyjną.

Stany obiektu od momentu  $t_0$  do uszkodzenia ( $t_d$ ) opisywane są funkcją niezawodności. Po utracie niezawodności następuje wyłączenie eksploatowanego obiektu z użytkowania (na stałe lub czasowo). Zaistnienie faktu (nazwanego uszkodzeniem) dla różnych obiektów wyznacza inną drogę postępowania: dla obiektów naprawialnych będzie to przywrócenie użyteczności, a dla obiektów nienaprawialnych - kasacja.

Wpływ na niezawodność może mieć każdy, kto jest zaangażowany w „życie” danego obiektu. Ponieważ niezawodność jest ważnym aspektem konkurencyjności, istnieje potrzeba uwzględniania jej już podczas etapu projektowania [9].

## 1. 2. Niezawodność a projektowanie

Celem różnorodnych działań organizacyjno - technicznych w okresie projektowania i wytwarzania obiektu jest wydłużenie jego okresu trwałości. Założeniem wyjściowym tych etapów „życia” obiektu jest uzyskanie wysokiej jakości [4]. Ma to doprowadzić do osiągnięcia w trzecim etapie wysokiej niezawodności. Przeniesienie informacji eksploatacyjnej z dwóch pierwszych okresów „życia” maszyny (projektowanie i wytwarzanie) na trzeci (użytkowanie) odbywa się poprzez jakość. Jakość jest taką właściwością, która może się zmieniać w miarę upływu czasu [7]. W tych dwóch pierwszych okresach wzrasta, a w trzecim okresie następuje jej spadek. Prawdopodobieństwo tego, że spadek jakości nie pogarsza jeszcze jej właściwości użytkowych na tyle, że może ona spełniać swoje funkcje jest miarą niezawodności.

**Niezawodność, tak jak i inne właściwości wyrobów i usług, nie jest czymś co po prostu występuje: musi być wynikiem odpowiedniego projektu oraz dokładnego wykonania przy użyciu odpowiednich metod i technik.** Ponieważ jednak nie można badać nie wytworzonego jeszcze (i nie eksploatowanego) obiektu na niezawodność, projektant „zabezpiecza” zwykle tę cechę następującymi sposobami [9]:

1. Stosuje sprawdzone rozwiązania konstrukcyjne.
2. Stosuje proste rozwiązania.
3. Stosuje elementy o wysokiej sprawdzonej niezawodności.
4. Stosuje określone elementy „rezerwowe”.
5. Stosuje elementy odporne na uszkodzenia.
6. Stosuje sprawdzone metody wykonania.

Konstruktor mechanik, przy projektowaniu np. maszyny czy urządzenia, stosuje obliczenia swojej konstrukcji na wytrzymałość zmęczeniową, postaciową, udarność, wytrzymałość doraźną itp. Operując jednak w większości przypadków (świadomie lub nie) wartościami średnimi, realizuje w praktyce wyłącznie modele deterministyczne [5]. Posiada on szereg opanowanych metod i środków doboru tworzywa, kształtów, wymiarów elementów i ich wzajemnego położenia w obiekcie. Jednocześnie staje przed nim zadanie oceny wpływu losowo zmiennych czynników otoczenia na poszczególne elementy tego obiektu. Na dokonanie takiej oceny pozwala teoria niezawodności [12].

Teoria niezawodności posiada swój język, aparat pojęciowy i matematyczny (podobnie zresztą jak każda nauka), pozwalający na formułowanie modeli matematycznych i logicznych. Ma też swoją teorię eksperymentu, pozwalającą na weryfikację tych modeli. (obejmuje to określenie ilościowej specyfikacji niezawodności, technik przewidywania uszkodzenia, testowania, zbierania danych oraz analizy i syntezy).

Teoria niezawodności - to pewna teoria matematyczna, oparta na rachunku prawdopodobieństwa. W gruncie rzeczy nie jest ona panaceum (uniwersalnym środkiem) na złe wyroby techniczne, jednak może być pomocna wszędzie, jeśli zastosować ją właściwie [9].

Teoria - to jakby maszynka do mięsa: aby otrzymać dobry farsz, trzeba wybrać odpowiednie noże, kręcić rączką we właściwą stronę, a przede wszystkim - dobrać odpowiednie jego składniki. Inaczej będzie niesmaczny. Teoria zaś temu nie będzie winna [1]. Ważne jest aby potencjalny użytkownik teorii niezawodności zapoznał się z nią, uzbroił się w jej metody, lub chociażby wiedział, że taki oręż istnieje i gdzie może się on przydać. Potencjalni użytkownicy tej teorii mogą się więc inspirować nią w swych pracach, stawiać jej nowe zadania oraz uzyskiwać konkretną pomoc przy rozwiązywaniu problemów eksploatacyjnych.

Teoria niezawodności podaje metodykę do badania życia obiektów, ale co ważniejsze, pozwala przewidywać (prognozować) długość życia innych obiektów (nawet nie wyprodukowanych), należących do pewnego, jednorodnego



zbioru (populacji). Teoria ta - jak teoria eksploatacji - w swoich założeniach bazuje na pewnych modelach rzeczywistości.

Samochód-zabawka - to model prawdziwego, zabawa w „policjantów i złodziei” - to model bitwy. Obiekt i model mają wiele wspólnego, lecz nie pokrywają się w pełni. Modelem obiektu, procesu lub zjawiska nazywamy inny obiekt, proces lub zjawisko (może być myślowe), mający z nim jakieś cechy wspólne. Zwykle zakłada się, że model - to uproszczona wersja danego obiektu [2]. Modelowanie od dawien dawna przychodzi ludziom z pomocą przy badaniu rozmaitych zjawisk. Na modelach statków sprawdza się ich stateczność i zwrotność. Obserwacja zachowania się modeli samochodów w tunelu aerodynamicznym pozwala na udoskonalenie ich budowy. Przy projektowaniu elektrowni wodnych, mostów i wielkich konstrukcji też bada się najpierw ich modele, przedstawiając je w zminiaturyzowanej formie. Tego typu modelowanie nazywa się modelowaniem fizycznym i oparte jest na teorii prawdopodobieństwa.

Zasadniczą jednak wagę mają modele zachowań, opisane modelami matematycznymi. Pokazują one związek ilościowy pomiędzy wielkościami wejściowymi a wyjściowymi:  $y=f(x)$  (obraz transformacji zasileń obiektu w określony pożytek). Modele takie pozwalają sterować danym zachowaniem się obiektu - oczywiście przy sprecyzowaniu kryterium oceny „dobrej” pracy [8]. Inaczej bowiem sformułowane zadanie - inaczej postawiony problem - inne kryterium. W większości zagadnień technicznych, a w szczególności w kwestii optymalizacji, musi istnieć możliwość oceny ilościowej różnych wariantów (alternatyw wyboru działania obiektu). Dlatego ważna jest umiejętność precyzyjnego określania kryterium ilościowego. Na wyznaczenie takiego kryterium ilościowego, w przypadku działania czynników losowych, pozwala rachunek prawdopodobieństwa. Jest on podstawowym narzędziem badawczym teorii niezawodności [12].

W literaturze podaje się poziomy (klasy) niezawodności oparte w większości na normach zagranicznych [7]. Podane w nich wartości wskaźników niezawodnościowych stanowić mogą normatywy odbiorcze dla projektowanych urządzeń. Podstawowym wskaźnikiem w tych normach jest tzw. wskaźnik intensywności uszkodzeń  $\lambda$ , odpowiadający stosunkowi prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu do przyjętego (jako standardowy) okresu trwałości  $T = 1000$  godzin:

$$\lambda = \frac{q}{T_{1000}} = \cdot 100\% \quad (1)$$

Wyróżnia się przy tym pięć podstawowych klas (poziomów) niezawodności obiektów według wartości tego wskaźnika (czyli prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy obiektu w czasie 1000 h :

1. poziom  $O$  ( $\lambda=20\%$ ) - odpowiada obiektom, dla których ocena niezawodności praktycznie nie jest wymagana,
2. poziom  $R$  ( $\lambda=1.5\%$ ) - odpowiada obiektom mało ważnym, dla których wymagana jest ocena niezawodności,
3. poziom  $S$  ( $\lambda=0.5\%$ ) - odpowiada obiektom mało ważnym, dla których wymagana jest ocena niezawodności dla urządzeń przeznaczonych dla odbiorcy wojskowego,
4. poziom  $T$  ( $\lambda=0.05\%$ ) odpowiada obiektom ważnym, dla których wymagana jest ocena niezawodności,
5. poziom  $U$  ( $\lambda=0.005\%$ ) - odpowiada obiektom bardzo ważnym, dla których wymagana jest ocena niezawodności.

Projektant mając taki wzorzec, może zakwalifikować projektowany obiekt do określonej klasy niezawodnościowej. Kwalifikacja taka wpływa na szereg zróżnicowanych działań konstruktorskich, chociażby takich jak [12]:

- wyznaczenie niezbędnej ilości sprawdzianów (liczników, skal itp.) informujących o przekroczeniu stanów granicznych,
- specyfikacji niezbędnych urządzeń automatycznego zabezpieczenia przed przekroczeniem dopuszczalnego poziomu oddziaływania czynników wymuszających (bezpieczniki, wyłączniki krańcowe i inne urządzenia działające na zasadzie sprzężeń zwrotnych),
- specyfikacji dopuszczalnych wartości wielkości fizycznych charakteryzujących elementy składowe (np. dopuszczalne naprężenia mechaniczne, dopuszczalna liczba cykli naprężeń, dopuszczalne wartości sprawności mechanicznej itp.).

Zgodnie z istniejącymi poglądami: projektowanie, to podejmowanie decyzji w obliczu niepewności i wysokiej karze za błąd [5].

### 1. 3. Proces decyzyjny

Do osiągnięcia dowolnego celu konieczne są trzy czynniki: ponoszenie ryzyka, podejmowanie decyzji oraz działanie. O celowości działania orzekamy wówczas, gdy prowadzi do celu. Działanie celowe (*ex ante*) musi się okazać działaniem skutecznym (*ex post*). Jeżeli było nie skuteczne, to znaczy, że było

również bezcelowe. W ryzyko, na mocy definicji, wpisana jest możliwość nie osiągnięcia celu. Zawsze zatem jest tylko pewna szansa na pomyślne zakończenie dowolnego działania (sukces), ale nigdy pewność 100%. Naturalnym sposobem robienia postępu jest działanie, popełnianie błędów (porażka), a potem korekta błędnie podjętej decyzji [3].



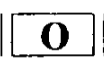

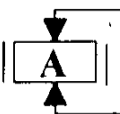
**Podjęcie decyzji jest dla każdego działania tym, czym oddech dla człowieka - daje życie.**

Projektowanie inżynierskie polega na zastosowaniu metod naukowych, informacji technicznej i wyobraźni do zdefiniowania mechanicznej struktury maszyny lub systemu, które służą do wykonania z góry określonych funkcji najbardziej ekonomicznie i skutecznie [5].

W działaniu należy więc odróżniać skuteczność od efektywności. Kiedy mówimy, że działanie było skuteczne, stwierdzamy, że otrzymaliśmy wynik zgodny z zamierzonym celem. Natomiast w przypadku działania ocenionego jako efektywne, otrzymujemy tylko pozytywne rezultaty - sukces.

Skuteczne decyzje, czegokolwiek one dotyczą, łączą pewne sposoby prowadzące do ich efektywności. Te sposoby są wszędzie takie same: czy to w technice, czy to w biznesie, administracji czy innej działalności człowieka. Efektywność - innymi słowy - to pewne nawyki, to kwestia pewnego kompleksu działań, a tych zawsze się można nauczyć. Drucker [3] podaje pięć takich sposobów postępowania - nawyków umysłu, które trzeba wyrobić w sobie, aby podejmować skuteczne decyzje. Nazwano je tutaj akronimem „**ZGODA**” (**Z**-zasada, **G**-granice, **O**-obmyślanie, **D**-działanie, **A**-akceptacja) i zilustrowano odpowiednimi piktogramami:

### Elementy skutecznego procesu decyzyjnego

1.  Uświadomienie sobie, że problem jest natury ogólnej i można go rozwiązać jedynie taką decyzją, która stanowi jakąś regułę, jakąś zasadę.
2.  Zdefiniowanie szczególnych warunków, którym rozwiązanie problemu musi sprostać, tj. warunków brzegowych (granic).
3.  Obmyślenie, co jest słuszne, tj. jakie rozwiązanie spełnia wszystkie owe szczególne warunki, zanim poświęci się uwagę kompromisom, zabiegom przystosowawczym i ustępstwom niezbędnym do tego, aby decyzja została przyjęta.
4.  Wbudowanie w decyzję działań wprowadzających ją w życie.
5.  Sprzężenie zwrotne, które pozwala sprawdzić trafność i efektywność decyzji w świetle aktualnych wydarzeń - akceptacja wariantu rozwiązania.

Podjęcie określonej decyzji jest opowiedzeniem się za określonym wariantem rozwiązania (postępowania), tym samym eliminowaniem z dalszych rozważań alternatywnych rozwiązań. Decyzja rozstrzyga - jest wyborem między alternatywami ! Decyzja, która ma spełnić dwa różne i z gruntu sprzeczne ze sobą warunki, nie jest decyzją - jest modlitwą o cud. Kłopot z cudami polega zaś nie na tym, że się zdarzają rzadko, lecz na tym, że trudno na nie liczyć.

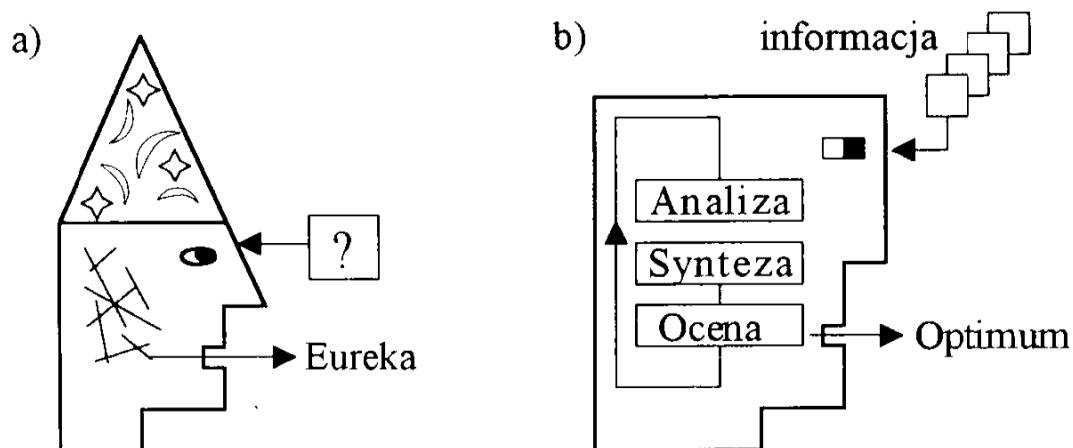
W przypadku skuteczności decyzji nie interesują nas jeszcze żadne nakłady. Po prostu stwierdzamy: cel został osiągnięty lub nie: mamy sukces lub porażkę. W momencie kiedy zaczynamy liczyć jakim kosztem (ustosunkowywać się do osiągniętych rezultatów i poniesionych nakładów), przechodzimy do następnej oceny szczegółowej - ekonomiczności, czyli gospodarności. Instrumentem realizacji zasady ekonomiczności jest rachunek ekonomiczny: analiza zysków i strat.

Jeżeli mamy taką sytuację, w której może być podjęta decyzja ekonomiczna zwiększająca efekty albo zmniejszająca nakłady (co najmniej na dwa różne sposoby) zaczynamy liczyć. Żeby zacząć liczyć, należy oczywiście mieć pewne dane liczbowe, przede wszystkim obraz stanu faktycznego (fakty). Uzyskujemy je w wyniku określonego badania dokumentów lub rzeczywistości. Funkcja celu stanowi kryterium wyboru optymalnego w danych warunkach wariantu alternatywy: A lub B. Dokonany wybór jest wyrazem naszych preferencji, czyli tego czemu dajemy pierwszeństwo. Preferencje w znacznej mierze wynikają z potrzeb jakie posiadają decydenci. Na gruncie potrzeb rodzą się ludzkie cele realizowane w toku życia [9].

W sytuacji problemowej (wyboru A lub B) zawarte są różnorodne dane początkowe (fakty), czyli informacje, które są zakodowane w postaci spostrzeżeń, wyobrażeń i pojęć. Chcąc rozwiązać problem, człowiek musi umieć wybrać to, co jest ważne i odrzucić nieważne.

Fakty - są to istniejące stany rzeczy (zdarzenia). Dla postępu technicznego ważne są jednak nie same fakty (one bowiem już zaistniały), ale ich interpretacje: co z danego faktu wynika ? Interpretacje są tym co powstaje w głowach decydentów. Są one podstawą procesów regulacyjnych systemu działania. Procesami regulacyjnymi systemu działania są procesy myślowe. Należą do nich: postrzeganie, przekazywanie i przetwarzanie informacji oraz przygotowanie i podejmowanie decyzji.

Podstawowym urządzeniem analizy procesów myślowych jest określony model decydenta (model człowieka). Jones w swojej pracy: Metody projektowania [5] przedstawia dwa takie modele - rys. 3.

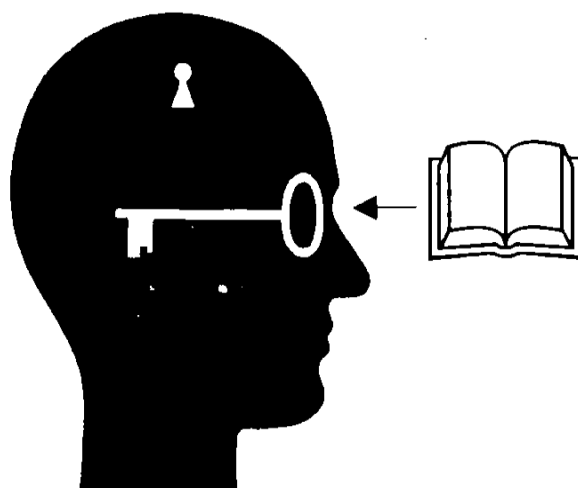


Rys. 3. Model decydenta : a- „człowiek jako czarodziej”, b - „człowiek - jako komputer”

A) analizowanego wg cybernetycznej metody „czarnej skrzynki” - rys. 3a. Dominują metody intuicyjne podejmowania decyzji. Człowiek jest „czarodziejem”, który przez system nerwowy przetwarza swe odczucia i wiedzę wewnętrzną na zjawisko zwane Eureka (odkrycie).

B) analizowanego wg metody „białej skrzynki” - rys. 3b. Dominują metody racjonalnego działania (człowiek jako komputer). W głowie decydenta zachodzi ciąg kolejnych, logicznych operacji przetwarzania informacji (analiza, synteza, ocena), rezultatem których jest optymalna decyzja.

Zgodnie z „regułą trzech”, czyli jedności w trzech aspektach, musi istnieć jeszcze trzeci aspekt (model) decydenta - dający dopiero pełne zobrazowanie rozpatrywanego zjawiska. Jest wiele przesłanek ku temu, zwłaszcza na bazie współczesnej psychologii, że takim „ukrytym” modelem dającym syntezę procesów myślowych decydenta jest model człowieka jako „samoorganizującego się systemu” - rys. 4 (zob. okładka)



Rys. 4. Model decydenta: „człowiek jako samoorganizujący się system”

Cała niniejsza książka opiera się na założeniu, że dni decydentów intuicyjnych (czarodzieji) są policzone. Wzory poprawnego myślenia podaje logika i metodologia. Wskazania metodologiczne trzeba jednak uzupełnić właściwą hierarchią wartości - odpowiednim paradygmatem.

Człowiek to co postrzega (widzi) jest tylko kluczem, ale zamek do tego klucza jest w jego głowie i każdy ma inny zamek - paradygmat (wzór, zespół przekonań, model działań) organizujących jego działanie. Paradygmat jest bowiem funkcją określonych warunków życia, doświadczeń oraz konkretnej wiedzy na dany temat, a te każdy ma inne.

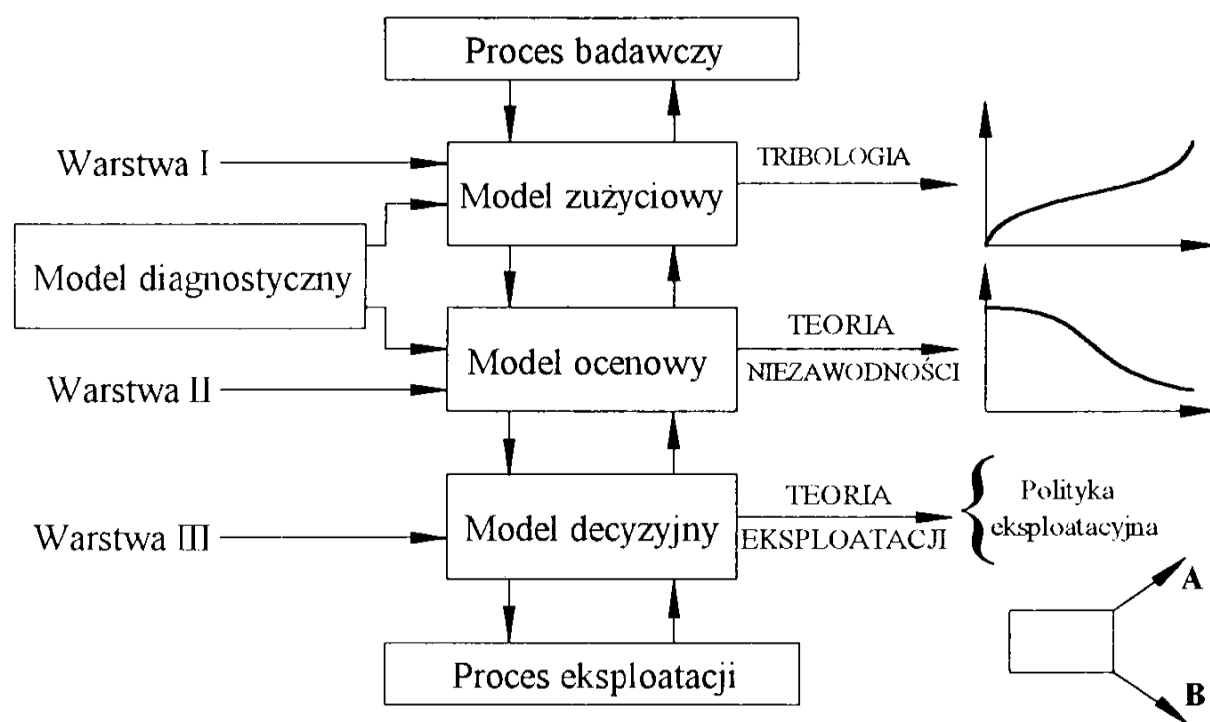
Decyzje w większości działań konstruktora podejmowane są w sytuacji otwartej, tzn. takiej, w której działania obarczone ryzykiem nieskuteczności nie są dane (decydent musi je najpierw sam sformułować). W takich sytuacjach człowiek tak długo poszukuje „dobrych” działań, aż jedno z nich odpowiada jego poziomowi aspiracji (określonemu zespołowi przekonań). Poziom aspiracji jest więc zasadniczym kryterium wyboru (alternatywy A lub B). decyduje on o tym: jakie działania człowiek odrzuca, a jakie przyjmuje do realizacji. **Zmiana poziomu aspiracji (wynikająca wraz ze zmianą wiedzy) modyfikuje proces decyzyjny.**

Decyzje konstruktora zawsze dotyczą tego co powinni zrobić inni - a do sukcesu nie wystarczy, że „kupią” wytwór jego działania. Muszą go kupić wiele razy ( $X+$ ), a to będzie wówczas, jeżeli jego decyzje uczynią swoją własną. Decyzje konstruktora (i technologa również) nabierają więc skuteczności dopiero przez działania innych ludzi (użytkujących - eksploatujących dany wyrób). Konstruktor więc ustala cele, definiuje problem, porządkuje informacje i organizuje przyszłe działania. Znajdując alternatywne rozwiązania i dokonując ich oceny - wybiera najlepsze. Żeby jednak rozwiązanie stało się decyzją użytkownika potrzeba działania tego ostatniego - a to nie jest już w gestii konstruktora. Może on tylko zawrzeć odpowiednie informacje w swoim wytworze, które będą skłaniać użytkownika do odpowiednich zachowań.

W procesie eksploatacji decydujemy się na wybór określonego środka technicznego (wyrobu i związanego z nim działania). Podejmujemy więc pewną decyzję (wybór „A” lub „B”), opartą zwykle na niepełnej informacji. Opieramy się na pewnym modelu (obrazie) rzeczywistości. Model ten nazywany jest modelem decyzyjnym i jest modelem najwyższego (III) rzędu - rys. 5.

Model decyzyjny opracowany jest zazwyczaj jako wynik analizy zużycia oraz oceny niezawodności obiektu w określonych warunkach eksploatacji. Przyjmując pewien model decyzyjny uważamy, że posiadane informacje są na tyle wystarczające, aby dokonać wyboru danego wariantu postępowania.

Prawdziwa trudność w decyzjach polega jednak na tym, aby w ogóle chcieć szukać alternatyw. Każdy człowiek bowiem myśli pewnymi schematami myślowymi i jeżeli nie musi odchodzić od tego schematu - to tego nie robi.



Rys. 5. Modelowanie teorii eksploatacji w zależności od poziomu badań eksploatacyjnych

Zwykle jest tak, że zadawaliśmy się dostatecznym rozwiązaniem czy podejściem do rozwiązania, nie szukając już lepszych rozwiązań. Musimy wymyślać jak najwięcej alternatywnych rozwiązań (zawsze jest jakiś wybór), niezależnie od tego jak bardzo kusi nas przyjęcie jednej z nich jako najlepszej i jedynie prawdziwej- wtedy dopiero bowiem tworzy się postęp [2].

Kiedy się jednak szuka różnych rozwiązań (wyjść, alternatyw), najłatwiej złapać się w pułapkę „wystarczająco dobrego”. Dopóki nie wyobrazimy sobie, że może być lepsze rozwiązanie, nie mamy motywacji aby go szukać. Tylko wtedy, gdy uświadomimy sobie potrzebę lepszego rozwiązania (innej alternatywy), zaczynamy jej szukać. Taką potrzebę i miejsce („słaby punkt”), w którym należy zastosować to inne rozwiązanie, pokazuje nam dopiero eksperyment, (najlepiej jeszcze, żeby był to eksperyment naturalny). Dopóki bowiem nie znamy „posunięć” losu, nie możemy podjąć własnego, kolejnego działania w tej grze o jakość [4].

Metoda naukowa postępowania polega na tym, że określoną hipotezę (wariant rozwiązania, model, alternatywę wyboru) uznaje się za słuszną, dopóki się jej nie obali. Wtedy przyjmuje się inną lepszą. Eksperyment naukowy



proceedzi się po to, aby obalić hipotezę. Natura ludzka powoduje jednak, że większość eksperymentów planuje się w nadziei, że hipotezę potwierdzą [1].

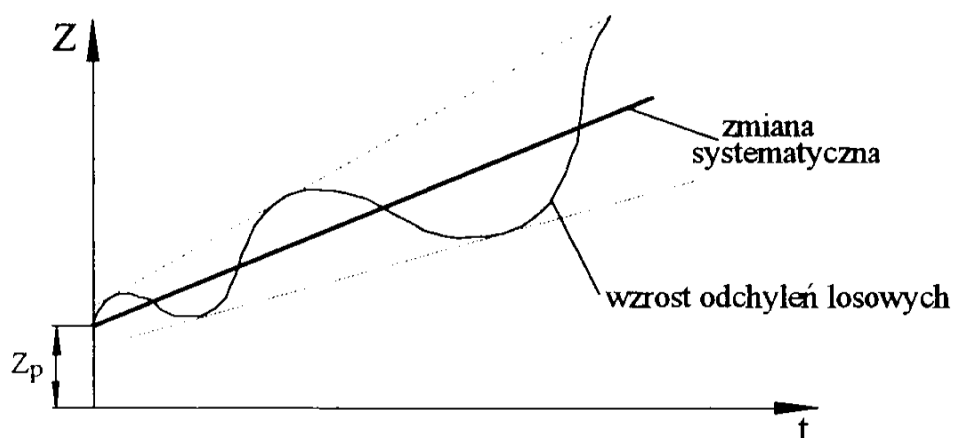
Całe zło sytuacji polega na tym, że istniejące hipotezy determinują i ograniczają nasze pole widzenia i rodzaj dowodów jakie poszukujemy. Dlatego często konieczny jest błąd, pomyłka, przypadek lub jakieś inne nieprzewidziane (losowe) zdarzenie, aby „podrzucić” nam materiał dowodowy, jakiego w ogóle nie szukaliśmy, trzymając się dotychczasowych „prawomyślnych” hipotez. Temu właśnie sprzyja eksperyment naturalny, czyli obserwacja zachowania się obiektu w normalnych warunkach eksploatacji, które ze swej natury są losowe.

Projektant obiektu (maszyny, urządzenia lub każdego innego wyrobu codziennego użytku) znając, lub częściej, zakładając warunki jego użytkowania, powinien określić jego okres trwałości użytkowej, czyli jak długo obiekt ten winien poprawnie pracować. Znając proces zużycia  $Z = f(t)$ , buduje model I rzędu-model tribologiczny - (zużyciowy). Model ten dotyczy współpracujących elementów badanego obiektu. Określa on wartość dopuszczalnych zmian czynników charakteryzujących jakość użytkową, przy założonym okresie trwałości. Cechą charakterystyczną modelu jest posługiwanie się charakterystykami fizykochemicznymi obiektu lub badanie ich zmian w procesie eksploatacji. **Zwykle dążeniem ludzkim jest, aby to „coś” co powstało, żyło jak najdłużej**, czyli:  $T \nearrow$ . Jest to zarazem podstawowy cel badań i analiz, które prowadzą do budowania modelu ocenowego (II rzędu). Model ten jest wynikiem uogólnienia występującego zjawiska zużywania się pojedynczego obiektu na całą populację. Uzyskanie danych do analiz niezawodnościowych umożliwia diagnostyka techniczna ze swym modelem diagnostycznym.

Z pewnych względów (zwykle komercyjnych) często zakłada się jednak pewien optymalny okres użytkowania obiektu, czyli  $T = \text{optimum } (T_o)$ , biorąc pod uwagę nasycenie rynku danymi wyrobami oraz możliwości rozwoju technologii wytwarzania.

W ten sposób, określając przeznaczenie obiektu do użytkowania w określonych warunkach, np. samochód osobowy do jazdy po drogach utwardzonych, konstruktor nakłada na swoją konstrukcję pewne warunki ograniczające (więzy słabe  $W_s$  lub mocne  $W_m$ ), wyznaczając dopuszczalną zmienność pewnych parametrów lub funkcji użytkowych.

Zagadnienie nie jest w rzeczywistości tak proste, gdyż niezależnie od zdeteminowanego procesu zużycia  $Z$ , występują w praktyce przypadki losowych uszkodzeń poszczególnych elementów obiektu, wpływające na skrócenie jego trwałości użytkowej - rys. 6.



Rys. 6. Model zużycia zdeterminowanego i zużycia losowego

Średnia wartość intensywności zużycia zdeterminowanego wzrasta liniowo i jednocześnie wzrastają niemierzalne wartości losowych intensywności zużycia. Taki układ oddziaływań losowych powoduje, że w praktyce uzyskuje się pewien rozkład trwałości obiektów tego samego typu.

#### 1. 4. Zużycie zdeterminowane a zużycie losowe

Natura fizykalno - chemiczna procesu zużycia losowego, czyli uszkodzeń przypadkowych, jest zbliżona do znanych procesów zużycia zdeterminowanego, jednak istotną różnicą tych obydwu procesów jest charakter występujących w nim zdarzeń. Odzwierciedla się to w konsekwencji zmianą modelu matematycznego procesu: ze zdeterminowanego na losowy. Rodzaj modelu odpowiadającego procesowi zużycia określa z kolei tak ważną dla badań doświadczalnych cechę procesu, jaką jest mierzalność. Rozróżniamy zatem [10]:

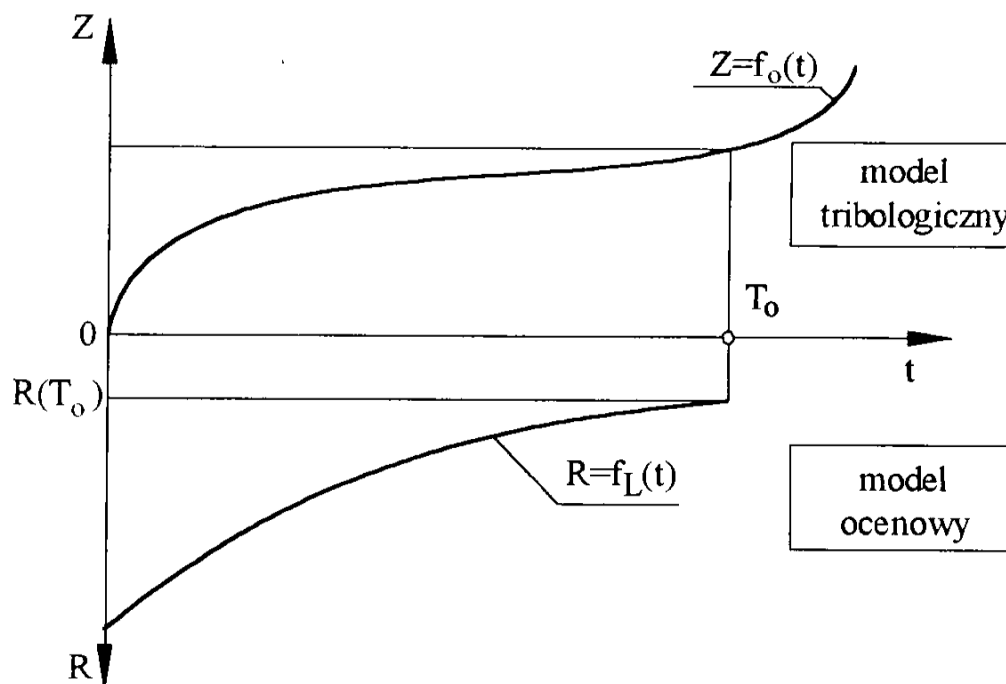
1. **Proces zużycia mierzalnego** (jawnego), w którym możliwe są pomiary określonych wartości czynników, np. jakości użytkowej warstwy wierzchniej (najczęściej: ścieralności, korozyjności itp.), stanowiących zdeterminowane miary tego procesu zużycia, oznaczone np. ogólnym symbolem  $Z$ . Najczęściej jest przy tym w pełni możliwe określenie związków między procesem zużycia zdeterminowanego, a czasem użytkowania obiektów, np. w postaci zależności:

$$Z = f_o(t) \quad (2)$$

Można zatem tę wartość przewidzieć i uwzględnić podczas projektowania konstrukcji. Zależność powyższa stanowi podstawę do określenia znanego pojęcia okresu trwałości  $T_o$ .

2. **Proces zużycia niemierzalnego** (utajonego), w którym zdarzenia - polegające na uszkodzeniu elementu - są zdarzeniami losowymi, będącymi konsekwencją losowego stanu tego elementu po jego wyprodukowaniu i losowych warunków jego użytkowania. Proces zużycia występuje tu od

samego początku procesu użytkowania, lecz nie jest widoczny i nie jest mierzalny - przynajmniej określonymi, typowymi metodami pomiaru. Najczęściej są to zmiany jakości użytkowej warstwy wierzchniej o podłożu zmęczeniowym, a więc trudno dostępne do zmierzenia typowymi technikami pomiarowymi. Jeżeli na ten proces nałożymy losowy stan jakościowy elementu, określane przez losowe czynniki występujące w procesie produkcji oraz nieprzewidziane losowe zmiany warunków użytkowych, to otrzymamy w rezultacie proces zużycia losowego, w którym miarą jest niezawodność  $R$  - rys. 7.



Rys. 7. Charakterystyka Z-R (zużycie - niezawodność) typowego procesu zużycia

W praktyce - dotyczącej różnych zagadnień technicznych - mogą wystąpić przypadki szczególne zużycia zdeterminowanego i losowego. Pokazano je schematycznie na rysunku 8 - jako związki modeli tribologicznych z ocenowymi [10].

- Zużycie wyłącznie zdeterminowane  $Z$  (mierzalne), przy braku w granicach błędu pomiaru niezawodności, zużycia losowego (rys. 8a):

$$Z = f_o(t),$$

$$R = R(0) = 1.$$

- zużycie wyłącznie losowe  $R$ , przy braku w granicach błędu pomiaru zużycia zdeterminowanego (rys. 8b):

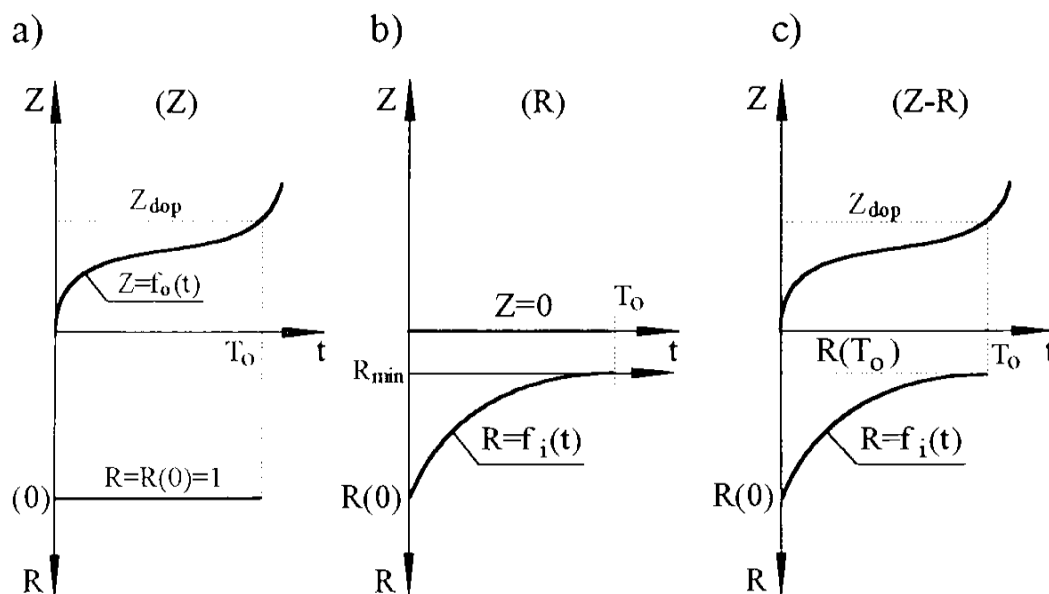
$$Z \cong 0,$$

$$R = f_L(t).$$

- zużycie zdeterminowane i losowe, określone typową charakterystyką  $Z-R$  (rys. 8c):

$$Z = f_o(t),$$

$$R = f_i(t).$$



Rys. 8. Przypadki szczególne uwzględniające zużycie  $Z$  i niezawodność  $R$

Przypadki tego rodzaju można mnożyć, wprowadzając różne wartości dopuszczalne  $Z_d$  i  $R_d$ , łącznie ze stanem idealnym:

$$Z \cong 0,$$

$$R \cong R(0) \cong 1,$$

w którym obiekt praktycznie nie ulega zużyciu w danych warunkach i czasie użytkowania.

Zagadnienia uwzględniania niezawodności na etapie projektowania konstrukcji wymaga rozważania z tego powodu, że obliczenia dotyczące konstrukcji maszynowych, były do niedawna skoncentrowane przede wszystkim na procesach zużycia o charakterze zdeterminowanym ( $Z$ ). Zużycie losowe natomiast traktowano jako anomalie, wynikiłe z błędów produkcji lub eksploatacji.

Rozwój konstrukcji maszynowych, szczególnie w zakresie złożoności konstrukcji i wymogów stawianych ich pewności działania powoduje, iż procesy zużycia losowego (którego miarą jest przede wszystkim niezawodność  $R$ , lub w pewnych warunkach parametry pochodne, np. współczynnik  $\lambda$ ) winne być uwzględniane na etapie założeń konstrukcyjnych. Sprawia to, że **analizy niezawodnościowe stają się jednymi z ważniejszych zagadnień pracy inżyniera**. Ani technika, ani nauka nigdy bowiem nie potrafi zbudować obiektu

niezawodnego, tylko obiekt, który zawsze zawiedzie (w dostatecznie długim czasie), choć - dzięki inteligencji poszczególnych twórców - zdolny do asymptotycznego zbliżenia się do niezawodnego [13].

Im bardziej precyzyjnego, trafnego i optymalnego wyboru określonego wariantu wykonania z wielu alternatywnych możliwości dokona twórca, tym mniej zawodna stanie się konstrukcja wynikła z tego wyboru.

Należy zatem zgodzić się z myślą, że pojęcie „niezawodny” to kategoria nie techniczna - pojęcie myślowe, idea przewodnia. Idea, która trafia na produkcję (w świat rzeczywisty), zawsze musi nosić na sobie - choć w różnym stopniu - piętno katastrofy i klęski. Nie jest dla takiego stwierdzenia istoty rzeczy ważne, czy będzie to z prawdopodobieństwem 0,99 czy 0,999999 (która to wartość na dzień dzisiejszy może być uważana za barierę techniczną niezawodności). Nawet bowiem w tym ostatnim przypadku możemy bowiem oczekiwać, iż z miliona jednakowych obiektów jeden nie spełni naszych wymagań.

Wbrew panującej opinii, inżynierowie nie zdają sobie sprawy z takiej sytuacji. Nie wiedzą, że choć dysponują ścisłym aparatem matematycznym, rozwiniętą techniką obliczeniową i choć opierają się na deterministycznych pewnych przesłankach, to jednak ich opis rzeczywistości ma zawsze jedynie charakter przybliżony i niepewny [13].

Niezależnie jednak od takich filozoficznych dywagacji (inżynier jest zawsze filozofem, bo tworzy byt, którego wcześniej nie było), w praktyce inżynierskiej należy dążyć do maksymalizacji niezawodności projektowanych obiektów [12]. Jakie są zatem postulaty (dezyderaty) do takiego działania?

## 1. 5. Dezyderaty do maksymalizacji niezawodności

Obiekt byłby całkowicie niezawodny, gdyby mogły być spełnione następujące dezyderaty [7]:

1. gdyby dostatecznie trafne były nasze przewidywania dotyczące warunków, w jakich obiekt po wykonaniu, będzie w interesującym nas okresie czasu przechowywany, transportowany i użytkowany lub innymi słowy, gdybyśmy mogli dostatecznie dokładnie przewidzieć działania mechaniczne, elektryczne, klimatyczne, chemiczne i inne, na jakie będzie narażony dany obiekt, wszystkie jego części składowe i materiały, z których są one wykonane. Dezyderat ten nazywamy **dezyderatem trafnej prognozy istnienia obiektu**.
2. gdybyśmy dostatecznie trafnie ocenili wpływ powyższych warunków na własności obiektu, jego części i materiały, z których je wykonano. Jest to

**dezyderat dostatecznie głębokiej wiedzy o zjawiskach fizycznych**, które mogą wystąpić w obiekcie.

3. gdybyśmy zaprojektowali obiekt, proces realizacji (w tym proces dystrybucji i proces eksploatacji) tak, żeby obiekt spełniał stawiane mu wymagania. Ten dezyderat jest nazywany **dezyderatem syntezy na ekstremalne okoliczności**.
4. gdybyśmy, po czwarte, nie popełnili żadnej, istotnej ze względu na niezawodność, omyłki w trakcie projektowania, wytwarzania, dystrybucji i eksploatacji, lub gdybyśmy skutek tych omyłek usunęli we właściwym czasie. Jest to **dezyderat bezbłędnej realizacji**.

Prognozę dotyczącą warunków, w jakich obiekt znajdzie się po wykonaniu go, powinniśmy uważać za trafną, jeśli w interesującym nas okresie istnienia obiektu nie będzie mógł zajść przypadek bardziej niekorzystny, ze względu na niezawodność, niż założyliśmy projektując daną konstrukcję ( $T < t_m$ ).

Niestety, jeśli chodzi o wytwory materialne, nigdy nie możemy zapewnić tego, że przypadek taki nie zajdzie, ponieważ w założeniach projektowych nie możemy umieszczać wymagań niewykonalnych, nieracjonalnych ekonomicznie, np. nie możemy wymagać od telewizora odporności na ogień, a od samochodu osobowego odporności na zderzenia z lokomotywą [12].

Możemy się jednak umówić, że przypadki nieprzewidziane przy projektowaniu obiektu, nawet przypadki małej rangi, będziemy uważali, że pochodzą od tzw. sił wyższych [7]. Ujemne skutki spowodowane przez siły wyższe nie będą się liczyły. Zamiast zabezpieczać się, ewentualnie ubezpieczymy się przeciw tym skutkom (po to właśnie istnieją różne towarzystwa ubezpieczeniowe). Nie będziemy więc ich uwzględniali przy ocenie niezawodności naszego obiektu.

Niezawodność obiektu, oceniana przy takim założeniu, nie jest niezawodnością rzeczywistą lecz niezawodnością umowną.

Użytkownik obiektu mówiąc o niezawodności, z reguły myśli o niezawodności rzeczywistej, producent zaś - raczej o niezawodności umownej.

Niezawodność rzeczywista może być znacznie mniejsza od umownej, jeżeli obiekt znajduje się w warunkach mniej korzystnych niż założono, lecz również może być większa, jeśli warunki życia obiektu będą łżejsze od przewidywanych.

W technice przez niezawodność zawsze rozumie się niezawodność umowną, a więc zakłada się, że warunki, w których będzie istniał obiekt, nie będą bardziej niekorzystne od założonych - co zresztą nie oznacza, że oddziaływanie takie nie może wystąpić [12]. Mimo wprowadzenia pojęcia sił wyższych nie mamy więc nigdy pewności, że postulat pierwszy jest spełniony,

bowiem nigdy nie jesteśmy pewni, że nie poniechaliliśmy jakiegoś istotnego czynnika oddziałującego na obiekt.

Drugi dezyderat dotyczy oceny wpływu warunków, w których obiekt będzie istniał, na jego własności. Trafność oceny tego wpływu zależy od stanu naszej wiedzy o zjawiskach, jakie wystąpią w obiekcie w przewidywanych warunkach, a więc od dostatecznie dokładnej znajomości mikro i makrostruktury obiektu. Stąd też niezawodność wszelkich nowych rodzajów obiektów, zwłaszcza gdy działanie ich jest oparte na wykorzystaniu nowo odkrytych zjawisk fizycznych, jest z reguły początkowo mała lub bardzo mała. Przykładowo: kiedy w latach pięćdziesiątych lampy elektronowe zaczęto zastępować tranzystorami, to początkowo urządzenia zawierające tranzystory były bardziej zawodne od urządzeń z lampami elektronowymi. Dopóki więc wiedza o naturze rzeczy nie jest zupełna (a taka nigdy nie będzie), nie mamy pewności, że dezyderat drugi będzie spełniony.

Trzeci dezyderat żąda takiego zaprojektowania obiektu i procesu realizacji, żeby w przewidywanych warunkach i w ciągu określonego czasu istnienia obiektu, jego własności nie zmieniły się więcej, niż to jest dopuszczalne. Taki sposób projektowania nazywa się projektowaniem na ekstremalne okoliczności. Oczywiście, chodzi tu o okoliczności przewidywane w wymaganiach, najgorsze ze względu na niezawodność.

Dezyderat ten nie wymaga koniecznie zaprojektowania samego obiektu na ekstremalne okoliczności [5]. Wystarczy, gdy proces jego wykonania zostanie zaprojektowany tak, żeby obiekty nie odpowiadające ekstremalnym okolicznościom zostały odrzucone przez kontrolę techniczną.

Spełnienie dezyderatu trzeciego zależy od spełnienia dezyderatów drugiego i czwartego. Nie mamy zatem nigdy pewności, że dezyderat ten jest spełniany.

Dezyderat czwarty możemy wyrazić w następujący sposób: żeby obiekt nas nie zawiódł, nie możemy popełnić żadnej pomyłki w trakcie jego realizacji. Należy zwrócić uwagę, że chodzi tu o omyłki popełniane nie tylko przez bezpośrednich wykonawców danego obiektu i ich narzędzia, lecz również przez wszystkich tych, którzy brali jakikolwiek udział w całym procesie realizacji, np. wytapiając materiał, dowożąc go, ucząc wykonawców itp. Skutki wszelkich omyłek, również popełnianych poza warsztatem wytwarzającym dany obiekt, mogą być (choć nie wszystkie) wykryte przez kontrolę, a potem usunięte. Zastosowanie odpowiednich metod i środków kontroli technicznej i ich poprawne stosowanie do tego stopnia zmniejsza prawdopodobieństwo skutków omyłek i koryguje skutki ich oddziaływania, że staje się rzeczą osiągalną zbudowanie obiektu, który nie zawiedzie w rozsądnie długim czasie - chociaż wymaga podkreślenia, że nigdy nie jesteśmy pewni, czy rzeczywiście nie zawiedzie.



Natomiast jest rzeczą niemożliwą zbudowanie dowolnie dużej liczby obiektów, z których wszystkie nie zawiodłyby w dowolnie obranym okresie czasu.

**Niemożliwie jest więc zbudowanie obiektów technicznych całkowicie niezawodnych.** Żeby to się stało, musielibyśmy znać naturę rzeczy bez reszty i być nieomylni. Z drugiej jednak strony, pogłębiając naszą wiedzę tribologiczną oraz doskonaląc nasze umiejętności działania możemy zbliżyć się w tym zakresie do rozsądnej granicy - wyznaczonej przez zjawiska fizyczne i względy ekonomiczne [6].

## 1. 6. Synteza niezawodnościowa obiektu

Punktem wyjścia do zaprojektowania obiektu o określonej niezawodności umownej jest jego synteza niezawodnościowa. Synteza - *gr. synthesis* - (połączenie, zestawienie) to obraz połączenia wielu elementów w jedność i poznanie właściwości tej jedności (całości) po uprzednim poznaniu elementów.

Zagadnienie to zostanie szerzej naświetlone przy omawianiu struktur niezawodnościowych i ich wpływu na kształtowanie się niezawodności całego obiektu technicznego. Ogólnie jednak rzecz biorąc, dysponujemy w tym względzie pewnym aparatem pojęciowym (struktura szeregową, struktura równoległą itd.) oraz aparatem algebry matematycznej (prawo iloczynu prawdopodobieństw, prawo rezerwy), pozwalającym dokonać syntezy niezawodnościowej tak, aby obiekt złożony z zawodnych elementów wykonał niezawodnie swoje zadanie.

Należy tu jednak zauważyć, że wyniki obliczeń opartych na prawie iloczynu i prawie rezerwy winny być traktowane jedynie jako orientacyjne (prawdopodobne) oszacowanie niezawodności obiektu. Zakłada się bowiem w tym postępowaniu np. stochastyczną niezależność powstawania niesprawności (uszkodzenie jednego elementu nie wpływa na uszkodzenie innego elementu). Możliwe są jednak i przypadki przeciwne. Wówczas ocena niezawodności oparta na założeniu stochastycznej niezależności zdarzeń niesprawności może dać wyniki daleko odbiegające od rzeczywistych [7]. Oczywiście, w tym przypadku niezawodność będzie mniejsza od obliczonej.

Są też jeszcze i inne przyczyny takiego stanu. Przy stosowaniu np. „rezerwy gorącej”, gdy ubywa element, który stał się niesprawny, może się zmienić obciążenie pozostałych elementów, co osłabia założenie o stochastycznej niezależności zdarzeń. Inną z przyczyn jest też np. to, że włączenie elementu rezerwowego do pracy (z „rezerwy zimnej”) wymaga pewnego czasu, co może zakłócić funkcjonowanie obiektu i zmniejszyć tym samym jego niezawodność.

Znając strukturę niezawodnościową obiektu można wyznaczyć orientacyjnie średni okres trwałości  $T$  i jego obszar zmienności. Wartość tę oblicza się z prostej formuły:

$$T = k \cdot T_e \Big|_{\min}^{\max} \quad (3)$$

gdzie:  $T$  - jest wartością oczekiwaną trwałości (średnią, maksymalną lub minimalną) całego obiektu,

$T_e$  - oczekiwany czas życia poszczególnych elementów tworzących tę strukturę, w warunkach wzorcowych ( $k = 1$ ),

$k$  - współczynnik zagrożenia pracy elementu warunkami otoczenia.

Aby zatem określić tę oczekiwaną trwałość obiektu, potrzebne są tylko dane dotyczące trwałości poszczególnych jego elementów tworzących strukturę niezawodnościową oraz współczynnik  $k$ , wynikający z utrudnienia warunków pracy obiektu przez dane otoczenie. Dane te zostały zebrane w skrypcie do ćwiczeń z eksploatacji [11 s.268].

## 1. 7. Wpływ warunków otoczenia na niezawodność obiektu

Każdy obiekt techniczny (i nie tylko techniczny, ale i przyrodniczy również) jest „odbiciem” otoczenia w jakim „żyje” [1]. Przykładowo; wiosło tak jest zbudowane - jak wymagało to od niego środowisko (woda), w którym pracuje. Niedźwiedź polarny też „wygląda” tak, jak wymaga to od niego środowisko. Do człowieka również odnosi się to „prawo odbicia”. Na tym tle powstało powiedzenie: „pokaż mi swoich przyjaciół, a powiem ci jakim jesteś”.

Projektując obiekt techniczny powinniśmy m. in. określić: po pierwsze, w jakich zespołach czynników fizycznych będzie on istniał, oraz po drugie, w jakich zespołach tych czynników obiekt powinien spełniać postawione mu wymagania, tj. powinien być odpowiednio niezawodny i trwały. Inaczej mówiąc, powinniśmy określić fizyczne warunki istnienia obiektu oraz zdecydować się, w jakim stopniu będziemy je uwzględniać przy produkcji. Tym samym przyjmujemy (założymy), jakie czynniki uznamy za siły wyższe.

Przykładowo: jeżeli założyć warunki pracy obiektu w laboratorium klimatyzowanym za 1, to zastosowanie tego obiektu np. na pokładzie samolotu, zmniejsza oczekiwaną jego niezawodność do wartości 0,16 [4].

Spośród zbioru czynników występujących w otoczeniu, zawsze można wydzielić zbiór czynników aktywnych, tzn. takich na oddziaływanie których narażony jest obiekt w danej chwili. Specyfikacje takich czynników i siłę ich wpływu na trwałość obiektu podaje np. literatura [7, 12].

Z reguły nie uwzględniamy np. możliwości zniszczenia obiektu przez pożar, trzęsienie ziemi, zbłąkane pociski i inne takie czynniki, które zaliczamy do sił wyższych. Do grupy sił wyższych zaliczamy w naszym klimacie również wysokie i niskie temperatury, spotykane co prawda - ale nie często.

Decyzje o tym, co zaliczamy do sił wyższych są treścią zbioru wymagań określających czynniki wewnętrzne i zewnętrzne życia obiektu. Nie znając w pełni tych czynników, projektant obiektu (należy podkreślić, że prawie 70 % zmian dotyczących niezawodności obiektu leży w jego rękach) zabezpiecza się wprowadzając do projektowanej konstrukcji współczynnik bezpieczeństwa  $x$ .

## 1. 8. Współzależność współczynnika bezpieczeństwa $x$ oraz niezawodności $R$

Współczynnik bezpieczeństwa  $x$  jest ilorazem wartości nominalnej  $Z_z$  oraz naprężeń dopuszczalnych  $k_z$

$$x = \frac{Z_z}{k_z} \quad (4)$$

Różnica  $Z_z - k_z$  stanowi margines bezpieczeństwa; można by powiedzieć, że jest to rezerwa wytrzymałości.

Współczynnik bezpieczeństwa  $x$  związany jest z tym, czego nie wiemy o obiekcie. Anglicy współczynnik bezpieczeństwa nazywają niekiedy „*faktor of ignorance*”. Rosjanie zaś nazywają go potocznie „*czto by w tiurmu nie popaść*”. Z takich różnych opisów pojęciowych można wyciągnąć wnioski dotyczące różnych dróg działania.

Naturalnym dążeniem w pierwszym przypadku jest chęć zmniejszenia swojej ignorancji i tym samym występuje możliwość zmniejszenia wartości współczynnika  $x$ . W tym drugim przypadku występuje natomiast naturalna chęć do coraz to większego zabezpieczenia się przed pójściem w to „miejsce”, a tym samym dążność do zwiększania wartości współczynnika  $x$ .

A Polacy? - ich miejsce i działania określiło położenie geograficzne. Są „rozdarci” pomiędzy tymi dwoma skrajnymi dążeniami. Ci, którzy potrafią oszacować ryzyko i odważą się na nie - wygrywają. Ci, którzy się nie odważą, też wygrywają - tylko swój uwiad. (Jak podaje jednak profesor Janusz Dietrych [2]: „uwiad rozumnych żądań może stać się przyczyną upadku gospodarki”). Jest to zatem zmiana przeciwwartościowa, a każda przeciwwartościowa zmiana świadomości jest istotą wsteczności. Jest to więc droga odwrotna do drogi postępu.

Określenie niezawodności wymaga zatem wcześniej świadomego (racjonalnego) określenia pierwotnej wartości - pierwszej przyczyny zawodności. Stawiam hipotezę, że **powodem zawodności jest człowiek** - nie należy jednak zbyt jej uogólniać. Nie sam fakt istnienia człowieka, lecz jego naturalną przypadłość. Co jest więc istotną przyczyną tego, że człowiek staje się przyczyną zawodności? Prawda jest taka, że istotną przyczyną zawodności jest niewiedza i stąd też zaistniało pojęcie: współczynnik bezpieczeństwa  $x$ . Bowiem niewiedza i niepewność są dwoma logicznie związanymi pojęciami [1].

Opierając się na doświadczeniu i na takiej wiedzy jaką posiadano oraz zdając sobie sprawę ze swojej niewiedzy, inżynierowie XVIII i XIX stulecia wznosząc budowle, budując maszyny, mechanizmy, narzędzia itp., chcąc mieć pewność działania swoich konstrukcji, obierali współczynniki bezpieczeństwa o wartościach: od kilkunastu do około 20 [7]. Było to koniecznością uniknięcia katastrof. Z czasem, potrzeby rozwoju różnych dziedzin techniki postawiły przed konstruktorami zadanie budowania obiektów mniejszych i lżejszych. Zadanie to było rozwiązywane m.in. również na drodze stosowania środków, które pozwoliłyby na zmniejszenie marginesu bezpieczeństwa.

Zmniejszenie marginesu bezpieczeństwa, a więc współczynnika bezpieczeństwa  $x$ , w praktyce jest równoznaczne ze zwiększeniem naprężeń dopuszczalnych  $k_z$ . Powstaje więc pytanie: kiedy zwiększenie  $k_z$  nie zmniejszy niezawodności? Aby odpowiedzieć na to pytanie, konieczne jest znalezienie sposobów wyznaczania związku pomiędzy współczynnikiem bezpieczeństwa a niezawodnością.

Pierwsze próby znalezienia tego związku należą według [7] do profesora Politechniki Warszawskiej W. Wierzbickiego i pochodzą z lat 30, bieżącego stulecia. Ogólną metodę wyznaczania związku pomiędzy tym współczynnikiem a niezawodnością podano jednak dopiero w latach 70 tych. Zagadnieniem tym zajmowali się probabiliści pracujący nad niezawodnością pojazdów rakietowych. Opracowana przez Aerine Research Corporation metoda opiera się na założeniu, że obiekt staje się niesprawny, gdy naprężenie  $\sigma$  jest większe od wytrzymałość  $Z$ , tj. gdy zajdzie przypadek

$$\sigma - Z > 0.$$

Niezawodność  $R$  można wyrazić w zależności od parametrów  $f_1(Z)$  i  $f_2(\sigma)$ . Również i współczynnik bezpieczeństwa  $x$  można wyrazić w funkcji tych parametrów. Dzięki temu można wyznaczyć relację pomiędzy niezawodnością  $R$  i współczynnikiem  $x$ .

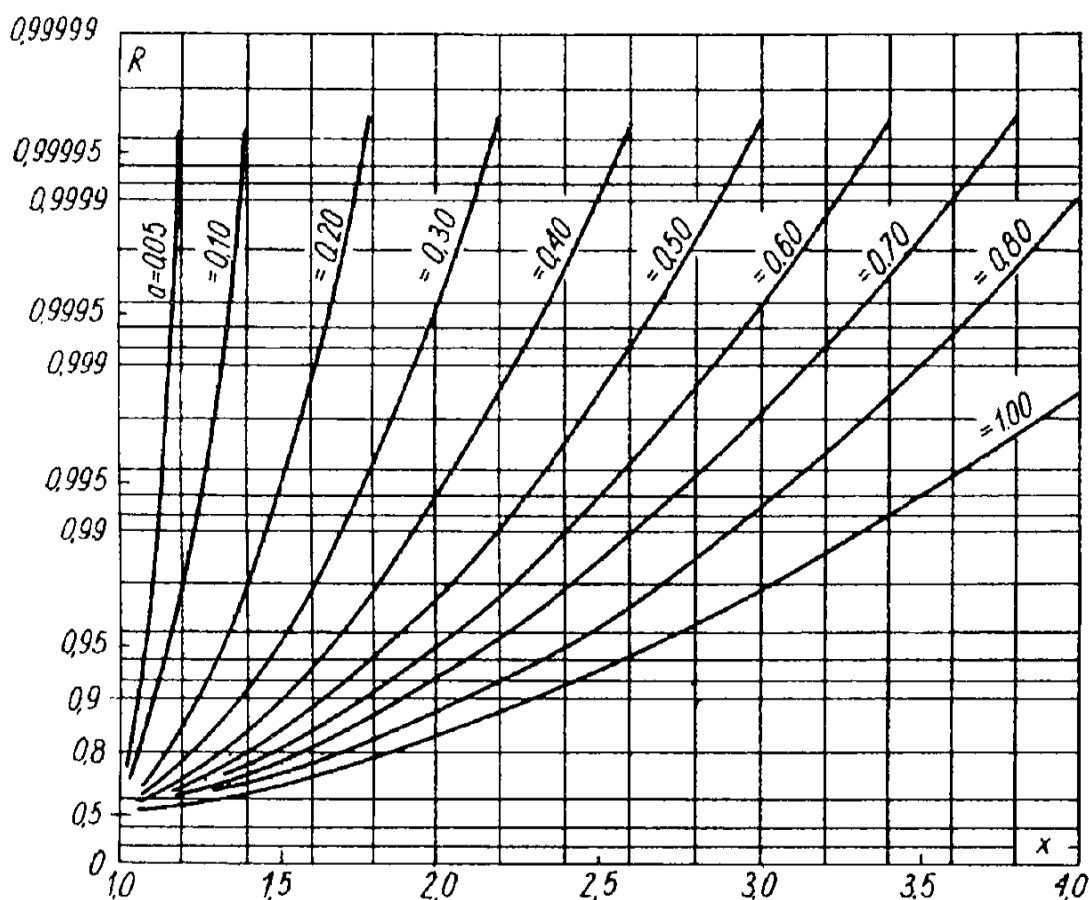
Na rys. 9. pokazano zależność między niezawodnością a współczynnikiem bezpieczeństwa  $x$ , opracowaną przez Olpińskiego dla przypadku rozkładów normalnych wytrzymałości i naprężeń, przy różnych wartościach parametru przeliczeniowego  $\alpha$ . Parametr  $\alpha$  wyraża się przy tym następującą zależnością [7].

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{s(\sigma)}{E(\sigma)}\right)^2 + \left(\frac{s(Z)}{E(Z)}\right)^2} \quad (5)$$

przy czym:

$E(\sigma)$ ,  $E(Z)$  - średnie wartości wytrzymałości i naprężenia,

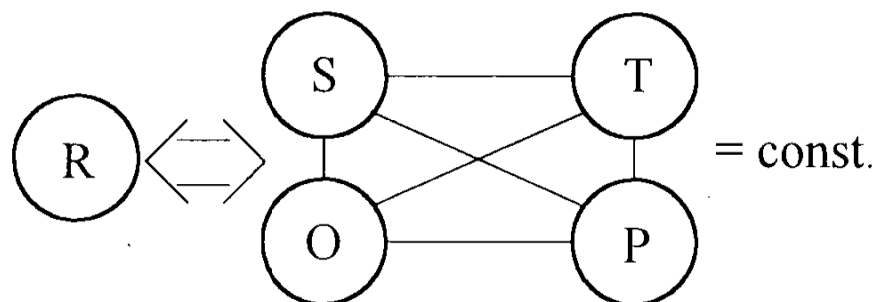
$s(\sigma)$ ,  $s(Z)$  - odchylenia standardowe wytrzymałości i naprężenia.



Rys. 9. Zależność między niezawodnością  $R$ , a współczynnikiem bezpieczeństwa  $x$

Z przebiegu krzywych pokazanych na rysunku 9 wynika, że określonej wartości współczynnika bezpieczeństwa  $x$ , odpowiadają różne niezawodności, w zależności od tego, jakie są parametry (wartość średnia i odchylenie standardowe) rozkładów wytrzymałości i naprężenia. Im mniejsze wartości odchyżeń standardowych (opisujących rozrzut) i większe średnie tych rozkładów, tym większa niezawodność przy tym samym współczynniku bezpieczeństwa  $x$  i tym samym większe efekty zwiększania zapasu bezpieczeństwa wyrażanego tym współczynnikiem.

Złożoną problematykę związku niezawodności z innymi parametrami funkcjonalnymi obiektu obrazuje zapis modelowy tego pojęcia - rys. 10 [2].



Rys. 10. Model powiązań niezawodności z innymi parametrami funkcjonalnymi obiektu

Niezawodność R działającego obiektu jest związana z:

**S** - skutecznością działania, wyznaczoną osiąganymi technicznymi i efektami ekonomicznymi,

**O** - okolicznościami, które mogą dodatnio lub ujemnie wpływać na działanie obiektu,

**T** - trwałością, mierzoną czasem lub krotnością działania,

**P** - pewnością skutecznego działania.

Dla określonego pod względem konstrukcji obiektu:

1. Jeżeli określone są: skuteczność S i okoliczności działania O, to przewidywanie większej pewności P możliwe jest jedynie przy przewidywaniu mniejszej trwałości T, co może stanowić wynik doraźnej polityki eksploatacyjnej.
2. Jeżeli określone są okoliczności działania O, domaganie się większej skuteczności S, np. przeciążenia maszyny z chęci uzyskania większej wydajności, łączy się ze zmniejszeniem trwałości T lub pewności działania P.
3. Jeżeli występuje niesprzyjająca zmiana okoliczności działania O, to koniecznością faktyczną jest zmniejszenie skuteczności S, bądź trwałości T lub pewności działania P.
4. Przy założonej trwałości T i pewności P, domaganie się większej skuteczności S uzasadnione jest jedynie przy możliwości zmiany okoliczności działania O na bardziej sprzyjające.

Na zakończenie zapoznajmy się jeszcze, pokrótce, z interesującymi teoriami dotyczącymi powstawania uszkodzeń (modelami tribologicznymi), które mogą być przydatne przy analizie niezawodności na etapie projektowania obiektu. Model tribologiczny jest bowiem bazą wyjściową do opracowania modelu ocenowego (niezawodnościowego).

Do niezdatności dochodzi wtedy, gdy w strukturze systemu (którym jest ten obiekt) zajdą takie zmiany, że warunki na wyjściu z tego systemu przekroczą graniczne tolerancje. Na przykład, nadmierne zużycie sworznia i tulei przedniego zawieszenia pojazdu samochodowego powoduje zaburzenia w sterowaniu samochodem. Własności elementów tego układu tribomechanicznego i relacje pomiędzy nimi (luz) wpływają na stan zużycia zdeterminowanego  $Z$  tego układu. Przekroczenie granicznej wartości luzu w przegubie czyni ten zespół niezdatnym. W celu określenia prawdopodobieństwa wystąpienia niezdatności analizuje się hipotetyczne przyczyny powstawania uszkodzeń w oparciu o pewne teorie.

W [6] podaje się, że istnieją trzy (główne) takie teorie (modele uszkodzeń).

Pierwsza - to **teoria „domina” Heinricha**.

Według niej do wypadku (uszkodzenia) prowadzi pięć czynników:

1. Cechy osobowe, przy oddziaływaniu otoczenia,
2. Brak osobowości, tzn. możliwość błędnego działania lub istnienie niebezpieczeństwa fizycznego lub mechanicznego,
3. Wystąpienie pomyłki albo uchybienia,
4. Wypadek,
5. Uszkodzenie.

Czynniki te ustawione są, jak domino, w szeregu; jeśli popchnąć jeden kamień, przewróci się reszta. (jeśli nie zapobiegiesz małej niesprawności, zaczną się pojawiać coraz większe). Aby zapobiec wypadkowi (uszkodzeniu) Heinrich zaleca usunąć jeden kamień, najlepiej ten z nazwą „pomyłka”, uchybienie lub (w dalszej kolejności) rozpoznać niebezpieczeństwo fizyczne względnie mechaniczne.

Drugą jest **teoria Haddona - „nadmiernej wymiany energii”**. Według tej teorii, uszkodzenie zachodzi wtedy, gdy system wymienia energię ze swoim otoczeniem powyżej dopuszczalnego poziomu. Przy tym, poziom ten można określać jakościowo, ilościowo lub względnie. Energia może być: elektryczna, mechaniczna, akustyczna, promieniowania, cieplna itp. Aby zapobiec uszkodzeniom, należy znać - według tej teorii - poziom energii wymienianej z otoczeniem i początkujące uszkodzenie.



Trzecią jest **teoria Grimaldiego** - „akceptowanego niebezpieczeństwa”. Zakłada ona, że w rzeczywistości nie można wyeliminować całego niebezpieczeństwa. Akceptacja niebezpieczeństwa polega na tolerowaniu określonego ryzyka. Wielkość tego ryzyka natomiast określa przestrzeń trójwymiarowa o współrzędnych:

1. Wrażliwość na odkrycie,
2. Prawdopodobieństwo wydarzenia,
3. Waga skutku.

Wrażliwość na odkrycie zawiera takie czynniki jak legalność, tajność i etyka. Według tej teorii, można panować nad uszkodzeniami przez zmniejszenie prawdopodobieństwa przypadku, dzięki:

- zastosowaniu odpowiednich zabezpieczeń obiektu przed uszkodzeniami,
- przez zmniejszenie wagi skutku uszkodzenia obiektu - dzięki narażeniu mniejszej liczby ludzi w krótszym czasie,
- przez zmniejszenie wrażliwości obiektu na uszkodzenia - dzięki takim zaleceniom eksploatacyjnym, aby mogły być one akceptowane przez szerokie kręgi społeczeństwa.

Czy jeżeli uwzględnimy zalecenia tych wszystkich teorii mamy pewność, że zbudowane przez nas urządzenie będzie niezawodne? Nie - takiej pewności nigdy nie mamy, ale mamy większe szanse na takie działanie - i to chodzi w całej nauce niezawodności.

---

## **Literatura podstawowa do rozdziału 1**

1. Churgin J.: *I co dalej*. Wyd. Wiedza Powszechna. Warszawa 1981
2. Dietrych J.: *System i konstrukcja*. WNT, Warszawa 1985
3. Drucker P.: *Menadżer skuteczny*. Wyd. Ak. Ekonomicznej w Krakowie, Kraków 1994
4. Juran J.M., Frank M., Gryna I.R.: *Jakość - projektowanie, analiza*. WNT, Warszawa 1974
5. Jones Ch., J.: *Metody projektowania*. WNT, Warszawa 1997
6. Lawrowski Z. *Tribologia*. Skrypt Pol. Wrocławskiej, Wrocław 1985 r.
7. Kiliński A.: *Podstawy teorii procesów realizacji*. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1972
8. Konieczny J.: *Sterowanie eksploatacją urządzeń*. PWN, Warszawa 1975
9. Muhlemann A.P., Oakland J.S., Lockyer K.G.: *Zarządzanie: produkcja i usługi*. PWN, Warszawa 1995
10. Polański Z.: *Metody optymalizacji w technologii maszyn*. PWN, Warszawa 1977
11. Słowiński B.: *Ćwiczenie z eksploatacji*. Wyd. WSI w Koszalinie, Koszalin 1995
12. Smalko Z.: *Podstawy projektowania niezawodnych maszyn urządzeń mechanicznych*. PWN, Warszawa 1972
13. Trąbka J.: *Inteligencja - katalizator przemian niezawodności*. Przegląd Techniczny, Nr 19 /1989, s. 13

## 2. JAKOŚĆ A EKSPLOATACJA

### 2. 1. Jakość w technice

Eksploracja jest finalnym etapem w cyklu powstawania i użytkowania obiektów technicznych, przy czym za **obiekt techniczny** uważać będziemy przedmiot materialny (pojazd, maszynę, narzędzie) przeznaczony do przetwarzania energii pozyskiwanej z otoczenia w pracę użytkową. Każdy z takich obiektów jest najpierw projektowany, potem wytwarzany, a następnie eksploatowany. Projektowanie obejmuje: studia literatury, projekt koncepcyjny i projekt techniczny. Produkcja składa się: z przygotowania produkcji i dostaw, właściwego wytwarzania i kontroli. Eksploatacji obiektu winno towarzyszyć: ekonomia, niezawodność i zadowolenie użytkownika. W przypadku większości obiektów technicznych, te dwa pierwsze okresy ich „życia” trwają pomijalnie krótko w stosunku do czasu, w jakim trwa eksploatacja. **W trójfazowym okresie istnienia** określonego obiektu następuje weryfikacja dwóch poprzednich zarówno co do prawidłowości przyjętej myśli konstrukcyjnej, jak i właściwości oraz obróbki przyjętych materiałów i poprawności ich złożenia w gotowy wyrób. Wytworzony obiekt uzyskuje pewną zdolność do spełniania wymagań użytkownika, którą nazywamy jakością. Twierdzenie Locke'a mówi, że „żaden przedmiot materialny nie jest rozpoznawalny inaczej niż przez swe cechy jakościowe”. Jakością jest wszystko to, co odróżnia jeden przedmiot od drugiego. Jakość przenika wszystko i wszędzie. Stała i wciąż była i jest. Jakość to wielka, główna siła sprawcza postępu technicznego. Kierunek jakości nadaje technologia. Brak jakości jest kwitesencją застоju.

**Jakość - jak pisał John Ruskin - nigdy nie jest dziełem przypadku. Jest zawsze wynikiem rozumnego wysiłku. Trzeba prawdziwie chcieć by rzeczy tworzone były doskonalsze.**

Przypisywanie obiektowi określonej jakości związane jest z tym, że pewne jego cechy lub parametry spełniają mniej lub bardziej ściśle ustalone dla tego wymagania. Zwykle wymagania te podane są w normach, dokumentacji technicznej lub umowie pomiędzy producentem a użytkownikiem. Określają one na ogół granice dopuszczalnych cech lub parametrów od wartości odniesienia, zwanych wartościami nominalnymi.

**Cecha** jest odrębną właściwością, która może służyć do różnicowania obiektów tego samego rodzaju.

**Parametr** jest wielkością mogącą się zmieniać w określonych granicach wartości.

Przedział dopuszczalnej zmienności cechy między nominałem a graniczną jej wartością, nazywany jest **tolerancją**.

Granice tolerancji  $T$  stanowią: minimalna dopuszczalna wartość  $D$ , np. ciśnienie sprężania w silniku spalinowym, lub maksymalna dopuszczalna wartość  $G$  badanego parametru, np. zużycie graniczne tłoka tego silnika. Użytkowanie maszyny (obiektu) do chwili osiągnięcia minimalnej, dopuszczalnej wartości  $D$  określonego parametru (lub maksymalnej wartości  $G$  innego parametru) jest okresem użytkowania sprawnej technicznie maszyny, w odróżnieniu od dalszego użytkowania zdatnej jeszcze maszyny, ale już w pewnym stopniu niewydolnej. Wykroczenie wartości badanych parametrów poza wartości graniczne  $D$  lub  $G$  pociąga więc za sobą odpowiednią przemianę jakościową, np. przejście obiektu z jakości dobrej (zdatnego) w jakość złą (niezdatnego).

Jakość jest pojęciem względnym. I nic w tym dziwnego. Przecież dla różnych obiektów, ocenianych przez różnych użytkowników, różne cechy tego obiektu mogą być istotne, a więc jakość jego może być oceniana według różnych cech i różne mogą być wartości graniczne  $D$  i  $G$  badanych parametrów.

Powodem, dla którego ludzie postrzegają jakość rozmaicie jest fakt, że wyposażeni są w różne zasoby wzorców (analogii). Dwaj ludzie z identycznym zasobem wzorców postrzegają ją tak samo.

Nasuwa się tu więc pytanie: **co to jest dobra jakość określonego obiektu?** Wiadomo jest bowiem, że jedne obiekty lepiej, inne gorzej zaspokajają określone potrzeby użytkowników.

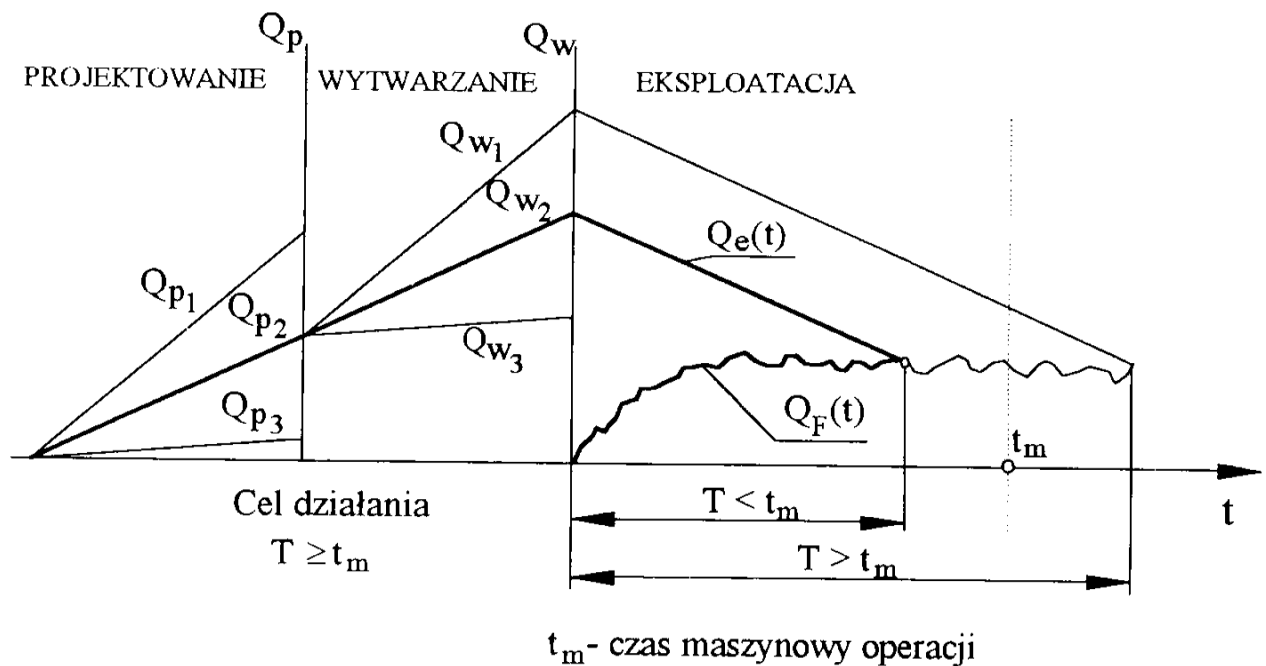
Określając stopień zaspokojenia potrzeb użytkowników przez dany obiekt mówi się potocznie, iż ma on wysoką jakość (obiekt wysokiej klasy), lub niską jakość (obiekt niskiej klasy). Jakość będąca z natury pojęciem względnym nie istnieje sama w sobie. Można więc mówić o jakości określonego obiektu tylko w powiązaniu z celem, do jakiego ma służyć. Oznacza to przykładowo, że złe narzędzie do wykonania jednej operacji, może być przydatne do wykonania innej operacji. Ocena poziomu jakości obiektów technicznych dotyczy więc problemu: w jakim stopniu cechy określonego obiektu spełniają warunki narzucone przez użytkownika i jaka jest ewentualnie powtarzalność tego spełnienia przez różne obiekty.

Rzeczywista jakość użytkowa zależy zarówno od trafności przewidywań zawartych w założeniach projektowych, jak i od jakości strony technicznej tego projektu.

Różnica między ustalonymi w dokumentacji właściwościami obiektów przeznaczonych do tego samego użytku jest to różnica **jakości projektowej**  $Q_p$ , zwanej często klasą. Samochody Mercedes i Fiat 126 służą w zasadzie do tego samego celu. Ich rozwiązania konstrukcyjne różnią się jednak pod wieloma

względami, wskutek czego ich jakość projektowa jest różna. Są one wykonywane według innej dokumentacji. Są to obiekty innej klasy.

Fiat 126, działający sprawnie, i inny samochód tej marki, który zawodzi w działaniu, mają tę samą jakość projektową, różnią się jednak **jakością wykonania**  $Q_w$ . W czasie wytwarzania tych obiektów ustalają się bowiem pewne ich cechy związane z występowaniem procesów losowych w produkcji. Objawi się to zróżnicowaniem ich właściwości eksploatacyjnych - rys. 11.



Rys. 11. Schemat procesu zmian jakościowych obiektu technicznego

Istnieją więc dwa podstawowe aspekty jakości - projekt i jego zgodność z wymaganiami odbiorcy. Jakość projektu polega na określeniu, jak dobrze został zaprojektowany wyrób, który ma zaspokoić potrzeby i spełnić wymagania konsumenta. Zgodność projektu z oczekiwaniami odbiorców jest to stopień, w jakim ten wyrób osiąga jakość projektu. Szczegóły ustalania systemu jakości zawarte są w Normach Międzynarodowych ISO serii 9000.

Uzyskanie dobrej jakości obiektów technicznych wymaga dążenia do jednoczesnej realizacji dwóch zadań:

1. Uzasadnionej względami technologicznymi ciągłej poprawy charakterystyki technicznej obiektu, poprzez wprowadzenie do eksploatacji obiektów wyższej klasy jakości.
2. Wykonanie obiektów o dużej powtarzalności określonych cech w całej partii i ich klasyfikacja jakościowa.

Poprawne wykonanie funkcji przez obiekt techniczny uwarunkowane jest przede wszystkim tym, na ile jego stan rzeczywisty odbiega od nominalnego (wymaganego). Stan techniczny określamy na podstawie pomiarów różnych wielkości (cech) charakterystycznych dla eksploatacji określonego obiektu. Gdy pewnej cechy nie możemy zmierzyć w sposób bezpośredni, to możemy dokonać pomiarów przejawów oddziaływania tej cechy, np. niewłaściwy luz w łożysku objawi się zwiększonym wydzielaniem się ciepła.

Badania jakości przeprowadza się na ogół na pewnej liczbie egzemplarzy stanowiących tzw. próbkę wyrywkową, którą wybiera się z partii lub serii wyrobów w sposób możliwie przypadkowy.

Stwarza to wtedy najlepsze warunki reprezentatywności tej próbki w stosunku do całej partii badanych wyrobów.

Wyznaczenie stanu technicznego określonego obiektu wymaga uprzedniego opracowania systemu diagnostycznego dla tej grupy obiektów (różnorodna budowa i przeznaczenie wymagają bowiem konieczności innego podejścia do metodyki pomiarów i stosowanego oprzyrządowania). Punktem wyjścia do opracowania takiego systemu jest sformułowanie zadania diagnostycznego, którego jedną z istotnych części jest przyjęcie określonych wielkości (parametrów) wzorcowych, mogących występować podczas badań i wielkości granicznych tych parametrów. Bez ustalenia bowiem wzorca i wyznaczenia wartości granicznych ( $D$  lub  $G$ ) nie można dokonywać kwantyfikacji (wartościowania) jakości zadanych obiektów technicznych. Jakość dopiero zaczyna być zrozumiała, kiedy potrafimy ją zmierzyć. Ocena jakości obiektów winna więc dostarczyć obiektywnych informacji: czy odpowiadają one wymaganiom ustalonego standardu (normy), czy są od niego gorsze, czy lepsze i w jakim stopniu? Na przykład dla samochodu osobowego, taką standardową cechą jakościową może być zużycie paliwa na 100 km, odzwierciedlającą zarówno jakość projektową ( przy porównywaniu samochodów różnych marek ), jak i jakość wykonania ( przy porównywaniu samochodów tej samej marki ).

Przyjęcie pewnej wartości zużycia paliwa jako granicznej ( $G$ ) pozwala na klasyfikację badanych samochodów na dobre (sprawne) i złe (niesprawne).

## 2. 2. Cechy określające jakość

Ze względu na rodzaj wyróżnia się:

1. **Cechy techniczne** - określające konstrukcję, wykonanie i funkcje danego obiektu technicznego. Do tych cech należą: stan powierzchni , wymiary geometryczne, właściwości fizykochemiczne oraz techniczne parametry działania takie jak: sprawność, wydajność i prędkość.

2. **Cechy użytkowe** - charakteryzujące przydatność i właściwości eksploatacyjne, z których najważniejszymi są: niezawodność, trwałość, odnawialność oraz dogodność i bezpieczeństwo użytkowania.
3. **Cechy estetyczne** - charakteryzujące wygląd zewnętrzny i staranność wykonania oraz aktualną modę i tendencję wzornictwa. Cechy te obejmują proporcje wymiarów, kształty i rozwiązania graficzne oraz kolorystyczne, estetykę opakowania itp.
4. **Cechy ekonomiczne** - określające koszty produkcji, nabycia i eksploatacji. Do kosztów eksploatacji należą koszty transportu, zainstalowania, przechowywania, użytkowania, konserwacji i napraw.

Cechy obiektu wyznaczają jego wartość. Wartość (dobro) rozumiemy tu jako własność rzeczy, ze względu na którą chcemy tę rzecz mieć, lub ze względu na którą jest ona nam potrzebna.

Opisy cech obiektu podaje się w zbiorze wymagań, które winien ten obiekt spełniać. Zbiór ten może zabierać wymagania określające jakość tego obiektu z różnych punktów widzenia: potrzeb użytkownika, interesów producenta, wymogów transportu, potrzeb handlu zagranicznego itp. Punktem wyjścia do specyfikacji wymagań jakościowych jest w pierwszej kolejności wyodrębnienie istotnych cech obiektu z danego punktu widzenia, a następnie przypisanie tym cechom określonych miar i metod ich sprawdzania.

Obiekt o wysokiej jakości winien posiadać dobre cechy użytkowe, być dobrze wykonany, użyteczny w dostatecznie długim czasie, mieć określone cechy estetyczne i być ekonomiczny w eksploatacji. W zależności od punktu widzenia różne cechy stają się cechami najistotniejszymi, które podlegają sprawdzaniu. O ile nie są to cechy krytyczne (zagrożające życiu i zdrowiu człowieka) to zwykle podlegają sprawdzaniu przy pomocy pewnej procedury zwanej badaniami wrywkowymi.

### **2. 3. Plany badań wrywkowych**

Wrywkowe badania polegają na ocenie próbki pobranej z pewnej partii wyrobów w celu przyjęcia względnie odrzucenia całej tej partii, odpowiadającej (bądź nie) specyfikacji wymagań jakościowych. Główną zaletą **badania wrywkowych** jest zmniejszenie czasu i kosztu badań. W tego typu badaniach stosuje się pewne zasady kontroli statystycznej. Przy takiej kontroli, pojęcie jakości nie odnosi się do pojedynczego egzemplarza ale całej partii lub serii wyrobów. Jakość partii definiowana jest za pomocą jej wadliwości,

tj. procentowego udziału obiektów wadliwych w partii lub liczby wad przypadających na 100 sztuk tych obiektów.

Przy wyrywkowych badaniach odbiorczych można posługiwać się albo oceną **alternatywną** (np. tak jak sprawdzianem dwugranicznym) albo **liczbową** (dokładny pomiar za pomocą określonych przyrządów). Szerszy zakres informacji uzyskuje się z planu badań z oceną liczbową. Mogą przy tym być stosowane plany jednostopniowe lub wielostopniowe (powtarzalne).

Plany badań wyrywkowych ujęte zostały Polską Normą:

- ♦ PN-ISO 2859-1+AC1: 1996. Kontrola odbiorcza według oceny alternatywnej.
- ♦ PN-ISO 2859-2+AC1: 1996. Kontrola odbiorcza według oceny liczbowej.

Poszczególnym planom podporządkowuje się określone krzywe operacyjne oparte na rozkładzie Poissona, wyrażające (zależnie od wadliwości) prawdopodobieństwo przyjęcia danej partii. Na krzywej operacyjnej wyróżnia się punkt zwany AQL (Acceptable Quality Level), oznaczający **akceptowany wskaźnik jakości**. Przyjęcie krzywych operacyjnych, uwzględniających jednakowe ryzyko dostawcy i odbiorcy, pozwoliło na opracowanie odpowiednich **tablic**, dotyczących różnych planów i nadających się do wielu zastosowań.

Na wybór planu kontroli wyrywkowej wpływa wiele czynników, z których najważniejszy to poziom ryzyka jakie chce ponieść producent lub użytkownik przy ocenie całej partii na podstawie badań wyrywkowych. Ponieważ zastosowanie badań wyrywkowych zmniejsza koszty kontroli, producent i użytkownik idą na pewne (określone) ryzyko, uzgadniając wadliwość dopuszczalną - AQL. Gdy wadliwość partii odpowiada dokładnie wskaźnikowi AQL, to prawdopodobieństwo jej przyjęcia wynosi 90%.

Gdy pewna cecha obiektu wyrażona jest w jednostkach czasu (tak jak ma to miejsce przy badaniach niezawodności lub trwałości), może być stosowany jeden z planów z oceną alternatywną - tabl. 1. gdzie pokazano jedną z tablic służących do oceny alternatywnej obiektów (dobry lub wadliwy).

Plan odbioru zawarty w normie PN-ISO 2859-1+AC1: 1996 podaje:

- liczbę sztuk w próbce,
- liczbę dopuszczalnych sztuk wadliwych w próbce w zależności od:
  - wadliwości dopuszczalnej AQL oraz
  - litery kodu licznosci próbki.

Literę kodu i licznosc próbki dobiera się w zależności od licznosci partii oraz poziomów kontroli - tabl. 2.



Tabl. 1. Plany badań z oceną alternatywną według normy PN-ISO 2859-1+AC1: 1996

Literek kodu licznosci próbki	AQL - Wadliwość dopuszczalna [%]																											
	0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0	1.5	2.5	4.0	6.5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1000		
A	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
B	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
C	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
D	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
E	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
F	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
G	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
H	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
J	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
K	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
L	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
M	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
N	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
P	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
Q	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
R	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
↘	- należy stosować plan jednostopniowy z wiersza, powyżej którego kończy się strzałka. Jeżeli licznosc próbek w tym wierszu jest równa licznosci partii lub większa, należy zastosować kontrolę stu procentową partii.																											
↗	- należy stosować plan jednostopniowy z wiersza, poniżej którego kończy się strzałka.																											
P	- kryterium przyjęcia																											
Od	- kryterium odrzucenia																											

Tabl. 2. Litery kodu licznosci próbki przy ocenie alternatywnej  
PN-ISO 2859-1+ACI: 1996

Licznosc partii	Specjalne poziomy kontroli				Ogólne poziomy kontroli		
	S - 1	S - 2	S - 3	S - 4	I	II	III
2 - 8	A	A	A	A	A	A	B
9 - 15	A	A	A	A	A	B	C
16 - 25	A	A	B	B	B	C	D
26 - 50	A	B	B	C	C	D	E
51 - 90	B	B	C	C	C	E	F
91 - 150	B	B	C	D	D	F	G
151 - 280	B	C	D	E	E	G	H
281 - 500	B	C	D	E	F	H	J
500 - 1200	C	C	E	F	G	J	K
1201 - 3200	C	D	E	G	H	K	L
3201 - 10000	C	D	F	G	J	L	M
001 - 35000	C	D	F	H	K	M	N
000 - 150000	D	E	G	J	L	N	P
150 001 - 500000	D	E	G	J	M	P	Q
5000 001 i więk.	D	E	H	K	N	Q	R

Uwzględnianie różnych poziomów kontroli pozwala użytkownikowi wyważyć koszty kontroli w stosunku do wymaganego stopnia ochrony. Stosunek licznosci próbek przy ogólnych poziomach kontroli kształtuje się w przybliżeniu jak 0.4 : 1.0 : 1.6. W tablicach przewiduje się także cztery specjalne poziomy kontroli dla sytuacji wymagających „mało próbkowej” kontroli.

Zwykle stosuje się II poziom kontroli, natomiast przy ocenie złagodzonej - poziom kontroli S-1 lub S-2, albo wyżej.

**Przykład:** Wymagany czas życia pewnej baterii elektrycznej wynosi 20 godzin. Dopuszczalna wadliwość została określona na 2,5%. Jaki jednostopniowy plan badań wyrywkowych należy zastosować do odbioru poszczególnych partii obejmujących po 500 baterii każda?

Tryb postępowania: według licznosci partii (tabl. 2.), przy kontroli zwykłej, literą kodu licznosci próbki jest *H*. Na podstawie tabl. 1 wybiera się plan, według którego:

- licznosc próbek do badań - 50 szt.,
- kryterium przyjęcia  $P = 3$ , odrzucenia  $Od = 4$ .

Plan wskazuje, że należy badać próbkę obejmującą 50 baterii w ciągu 20 godzin. Jeżeli przed upływem 20 godzin nastąpi uszkodzenie w 3 lub mniej sztukach - partia zostaje przyjęta, jeżeli 4 lub więcej - odrzucona.

W stosunku do obiektów, dla których można przyjąć, że badana cecha ma rozkład normalny, odpowiedni plan badań wybiera się z tablic planów z oceną liczbową (tabl. 4). Kontrolą obejmuje się określoną cechę obiektu, dającą się wyrazić za pomocą liczbowej wartości. Obiekt uważa się za dobry, gdy wartość  $x$  tej cechy nie przekracza ustalonej w umowie wartości  $x_0$ . Litera kodu licznosci próbki dobierana jest na podstawie tablicy 3.

Tabl. 3. Litera kodu licznosci próbki przy ocenie liczbowej PN-ISO 2859-2+AC1: 1996

Liczność partii	Poziomy kontroli				
	I	II	III	IV	V
3 - 8	B	B	B	B	C
9 - 15	B	B	B	B	D
16 - 25	B	B	B	C	E
26 - 40	B	B	B	D	F
41 - 65	B	B	C	E	G
66 - 110	B	B	D	F	H
111 - 180	B	C	E	G	I
181 - 300	B	D	F	H	J
301 - 500	C	E	G	I	K
501 - 800	D	F	H	J	L
801 - 1300	E	G	I	K	L
1301 - 3200	F	H	J	L	M
3201 - 8000	G	I	L	M	N
8001 - 22000	H	J	M	N	O
22001 - 110000	I	K	N	O	P
110001 - 550000	I	K	O	P	Q
550001 i większa	I	K	P	Q	Q

Przewidziane jest pięć poziomów kontroli.

Poziom IV przyjmuje się jako poziom kontroli normalnej i ogólnie stosowanej.

Poziomy I, II, III są poziomami o kontroli złagodzonej, stosowanymi wówczas, gdy jest dobrze ustabilizowana produkcja, natomiast poziom V jest poziomem o kontroli zaostrej, stosowanym wówczas, jeżeli występuje duże zróżnicowanie cech eksploatacyjnych obiektów tego samego rodzaju.

Tabl. 4. Plany badań z oceną liczbową wg PN-ISO 2859-2+AC1: 1996

Litera kodu licznosci próbki	Liczność próbki	AQL - Wadliwość dopuszczalna (kontrola zwykła) [%]														
		0,04 k	0,065 k	0,10 k	0,15 k	0,25 k	0,40 k	0,65 k	1,00 k	1,50 k	2,50 k	4,00 k	6,50 k	10,00 k	15,00 k	
B	3	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
B	3	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
D	5	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
E	7	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
F	10	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
G	15	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
H	20	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
I	25	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
J	30	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
K	35	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
L	40	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
M	50	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
N	75	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
O	100	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
P	150	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
Q	200	→	→	→	→	→	→	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
		0,065	0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,00	1,50	2,50	4,00	6,50	10,00	15,00		
Wadliwości dopuszczalne (Kontrola obostrzona)																
Wszystkie wartości AQL w procentach wadliwych sztuk.																
Należy stosować plan z wiersza, powyżej którego kończy się strzałka (tzn. przyjęć odpowiednie wartości licznosci próbki i współczynnika k). Jeżeli licznosc próbki w tym wierszu jest równa licznosci partii lub większa, to należy zastosować kontrolę stuprocentową partii.																

Sposób postępowania przy planowaniu z oceną liczbową:

1. Obliczyć średnią z próbki ( $\bar{x}$ ) i oszacować wartość odchylenia standardowego w partii  $\sigma_{n-1}$ , a następnie obliczyć wartość ułamka  $\frac{G-\bar{x}}{\sigma_{n-1}}$ , gdy wyznaczona jest górna granica kontrolna  $G$  w wartościach odchylenia standardowego, np. przy poziomie ufności 95% :  $\pm 2\sigma$ , a przy 99% :  $\pm 3\sigma$ , lub ułamka  $\frac{\bar{x}-D}{\sigma_{n-1}}$ , gdy wyznaczona jest dolna granica kontrolna - również w postaci wartości odchylenia standardowego.

**Praktyczna uwaga:** przy warunku ograniczenia minimalnego czasu gwarantowanej pracy obiektu (co występuje w zdecydowanej liczbie przypadków), zalecać można stosowanie dolnej granicy kontrolnej.

2. Jeżeli wartość obliczonego w p. 1 ułamka jest równa podawanej w tabelicy 4 wartości  $k$  (lub większa od niej) przyjmuje się partię, w przeciwnym wypadku odrzuca się.

**Przykład:** Czas życia baterii z poprzedniego przykładu ma rozkład normalny. Odchylenie standardowe jest nieznane. Według liczebności partii, dla kontroli zwykłej (IV) literą kodu jest  $I$ . Wobec tego: liczebność próbki - 25, kryterium przyjęcia  $k = 1.53$ . Plan wskazuje, że należy 25 baterii poddać badaniom trwałości i prowadzić je dotąd, aż we wszystkich sztukach nastąpi uszkodzenie. Obliczono że  $\bar{x} = 22$  i  $\sigma_{n-1} = 6$ . Przyjęto także, że istotna jest granica kontrolna dolna przy poziomie ufności 99%. Wobec tego:  $D = 3\sigma = 3 \times 6 = 18$ .

Wartość ułamka  $\frac{\bar{x}-D}{\sigma_{n-1}} = \frac{22-18}{6} = 0.67$ . Ponieważ jest to liczba mniejsza od 1.53, partia zostaje odrzucona.

Liczebność próbek przy ocenie liczbowej jest mniejsza niż przy ocenie alternatywnej, trudniejsza jest jednakże procedura badań (bardziej czasochłonne). W związku z tym, że w badaniach praktycznych dąży się do minimalizacji łącznych kosztów, należy sprawdzić, przy której procedurze czynności odbiorcze dają łącznie niższe koszty.

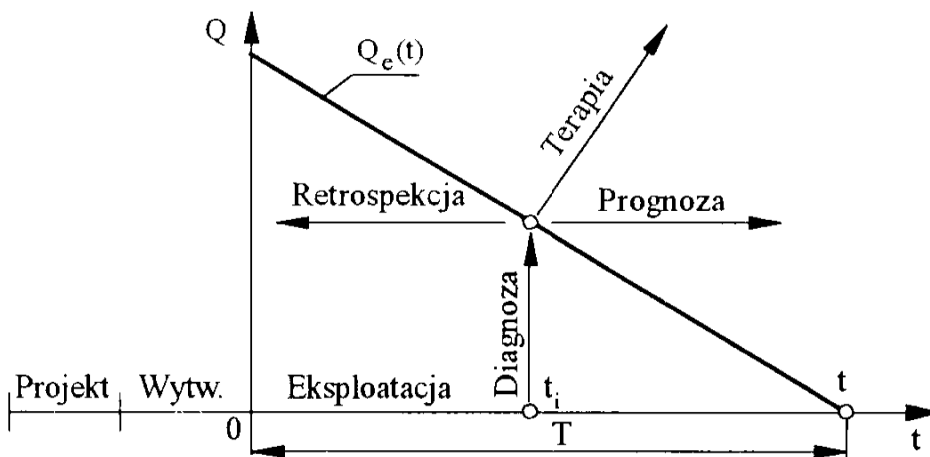
Przy planie dwustopniowym rozpoczyna się kontrolę od pobrania próbki zwykle mniejszej niż przy planach jednostopniowych: decyzja przyjęcia lub odrzucenia jest podejmowana na podstawie wyników badania tej pierwszej próbki, jeżeli liczba wadliwych sztuk jest mniejsza od pewnej wartości bądź większa od pewnej innej wartości. Gdy pomiary pierwszej próbki dały wynik pośredni, pobiera się drugą próbkę. Wobec tego, że pobieranie i badanie drugiej próbki jest potrzebne tylko w przypadku niejednoznacznego wyniku badania

pierwszej, liczba badanych sztuk na partię przy planie dwustopniowym jest na ogół mniejsza niż przy planie jednostopniowym.

Przy planach wielostopniowych pobiera się w zależności od potrzeby jedną, dwie lub kilka jeszcze mniejszych próbek zwykle dotąd, aż stanie się możliwe podjęcie decyzji. Tak więc przy planach dwustopniowych lub wielostopniowych może wystarczyć niekiedy zbadanie mniejszej liczby sztuk, lecz procedura jest bardziej skomplikowana.

## 2. 4. Zmiany parametrów stanu technicznego w czasie

Z punktu widzenia cech użytkowych obiektu, wszystkie stany techniczne tego obiektu rozpatrywane są na osi czasowej  $t$ . Założeniem wyjściowym teorii eksploatacji jest, że każdy obiekt techniczny ma skończoną w czasie trwałość. Pokazano to schematycznie na rys. 12.



Rys. 12. Schemat pomocniczy do analizy zmian stanu technicznego obiektów

Rozpatrując historię „życia” obiektu, (w której za punkt zerowy praktycznie przyjmujemy rozpoczęcie przez niego eksploatacji - pracy użytecznej), możemy w określonym czasie (np. po przejechaniu przez samochód określonej liczby kilometrów), dokonać diagnostyki technicznej w dowolnym czasie  $t_i$ . Diagnostowaniem nazywamy rozpoznawanie aktualnego stanu technicznego obiektu na podstawie objawów charakteryzujących zaistniałe w obiekcie zmiany (niedomagania, niezdatności itp.) Cofając się myślowo na osi czasowej dokonać możemy **retrospekcji**, czyli przeanalizować zjawiska (przyczyny) takich a nie innych stanów technicznych obiektu, np. brak oleju doprowadził do zatarcia się silnika. Znając aktualny stan obiektu możemy **prognozować** (wnioskować) przyszły stan obiektu, np. określony stopień zużycia panewek łożyskowych, doprowadzi do wcześniejszej awarii silnika. Możemy temu zapobiec, stosując **terapię techniczną**, która polega na przywracaniu wymaganego stanu technicznego, usuwaniu przyczyn i zapobieganiu występowania niepożądanych

zmian tego stanu. W oparciu zatem o znajomość przyczyn, wynikającą z przyjętego modelu tribologicznego i zakładając ustalone uwarunkowania, wnioskujemy w przyszłość. Podczas terapii usuwamy niepożądane zmiany stanu technicznego obiektów i staramy się zapobiegać kolejnym możliwym zagrożeniom w poprawnym funkcjonowaniu i racjonalnym ich użytkowaniu.

Jak wynika z retrospekcji, stany techniczne obiektów ulegają zmianom z upływem czasu - w zależności od intensywności oddziaływań zewnętrznych i wewnętrznych czynników wymuszających. Przejawiają się one w postaci rozmaitych procesów destrukcyjnych, takich jak: starzenie, zużycie zmęczeniowe, obciążenia udarowe itp. Procesy te wywołują: plastyczne i sprężyste odkształcenia, przepalenia, stopienia oraz utratę wewnętrznej spójności tworzywa elementów. Zmiany wymiarów i przełomy powodują zmianę wzajemnego rozmieszczenia elementów. te z kolei są przyczynami określonych **niedomagań** (niesprawności, niewydolności, niezadziałań), wynikających z niewłaściwego przebiegu procesów pracy i ruchów roboczych.

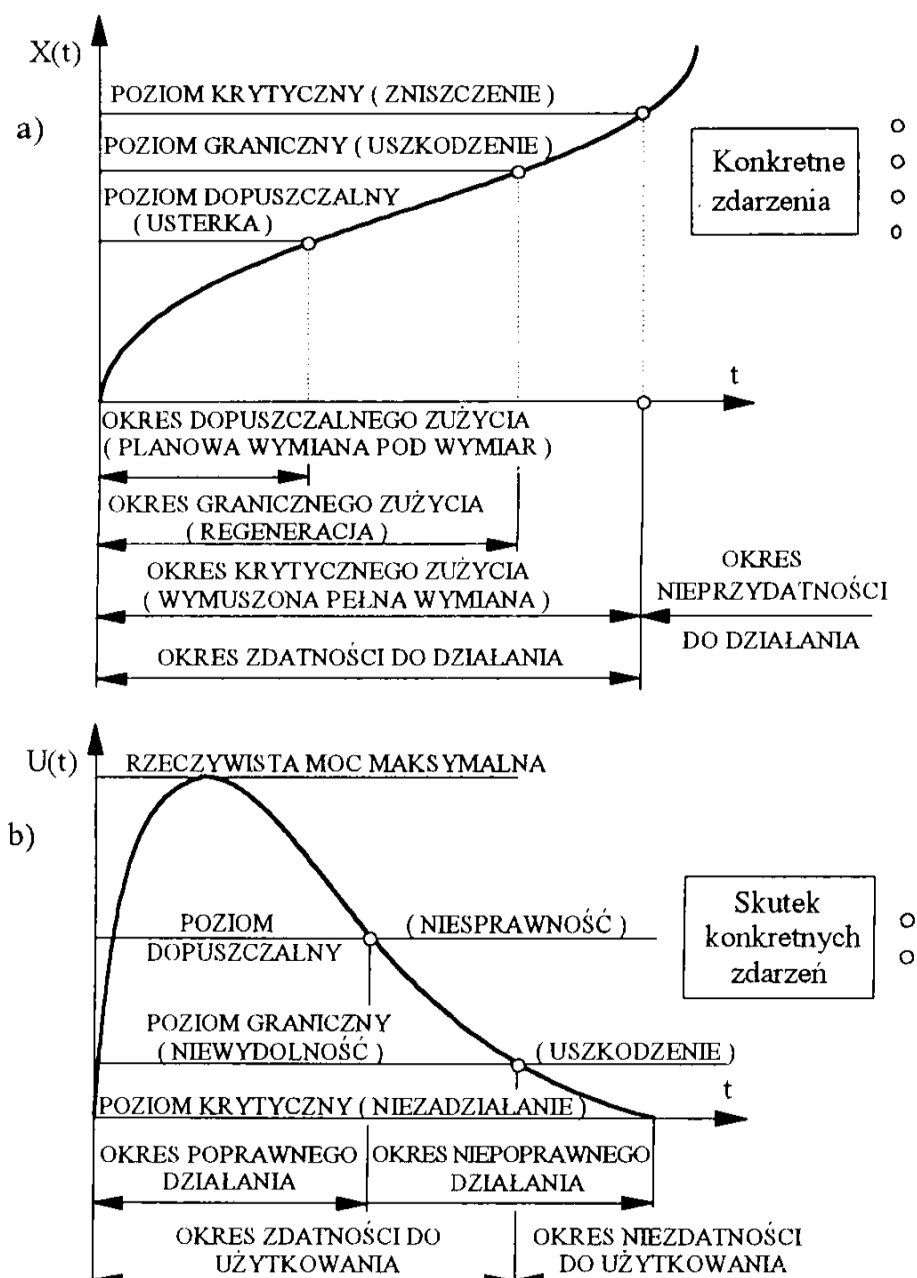
W efekcie rzeczywisty obiekt może ulegać różnym, niepożądanym, regresywnym zmianom (odwracalnym lub nieodwracalnym).

Z punktu widzenia wiedzy inżynierskiej, mają one następującą hierarchię ważności:

1. Zmiany bardzo istotne (krytyczne) - zagrażające życiu i zdrowiu ludzi oraz środowisku naturalnemu.
2. Zmiany istotne (graniczne) - zagrażające utracie wydajności przez obiekt.
3. Zmiany mniej istotne (dopuszczalne) - zagrażające racjonalnemu sposobowi wykorzystania obiektu.

Wobec powyższego, zmiany parametrów stanu technicznego obiektów można podzielić na: krytyczne, graniczne i dopuszczalne.

Jak wcześniej podano, zmiany parametrów strukturalnych przede wszystkim wynikają z przebiegających w obiekcie procesów destrukcyjnych. Ilustracją tego może być przykład zmian parametru strukturalnego, jakim może być np. zużycie masowe  $X(t)$  elementu obiektu przez tarcie (rys. 13a) i skorelowanego z nim parametru użytkowego, jakim może być moc użytkowa  $U(t)$ , co pokazano schematycznie na rys. 13b. Parametr ten jednocześnie może być parametrem diagnostycznym.



Rys. 13. Realizacja: a) parametru strukturalnego  $x(t)$ ,  
b) parametru użytkowego - diagnostycznego  $U(t)$

W pierwszym przypadku (tj. „a”) wyróżniamy pewne poziomy (stany techniczne): dopuszczalne - ze względu np. na kojarzone wymiary, graniczne np. ze względu na możliwość dokonania zabiegu regeneracyjnego oraz krytyczne ze względu na nagły (niekontrolowany) wzrost intensywności zużywania się, stwarzający zagrożenie dla elementu i konstrukcji obiektu jako całości. Zaistnieć mogą zatem następujące zdarzenia: 1) **usterki**, 2) **uszkodzenia**, 3) **zniszczenia**.

Patrząc z innego punktu widzenia (tj. „b”) wyróżnić można również pewne poziomy (stany użytkowe) tzw. dopuszczalne - w ramach przewidzianej tolerancji mocy użytkowej, graniczne (np. ze względu na niedopuszczalny spadek mocy, umożliwiający tylko jałowy bieg obiektu) i krytyczne (np. kiedy następuje



unieruchomienie obiektu jako całości). Zaistnieją zatem niepożądane zdarzenia: 1) **niesprawności**, 2) **niewydolności**, 3) **niezadziałania**.

Jeżeli żaden z parametrów struktury ze zbioru opisującego stan techniczny obiektu nie osiągnął wartości dopuszczalnej - obiekt jest sprawny technicznie. Oznacza to, że jego właściwości techniczno - eksploatacyjne odpowiadają założonym podczas konstruowania i wytwarzania, i obiekt może wypełniać wszystkie funkcje zgodnie z przeznaczeniem.

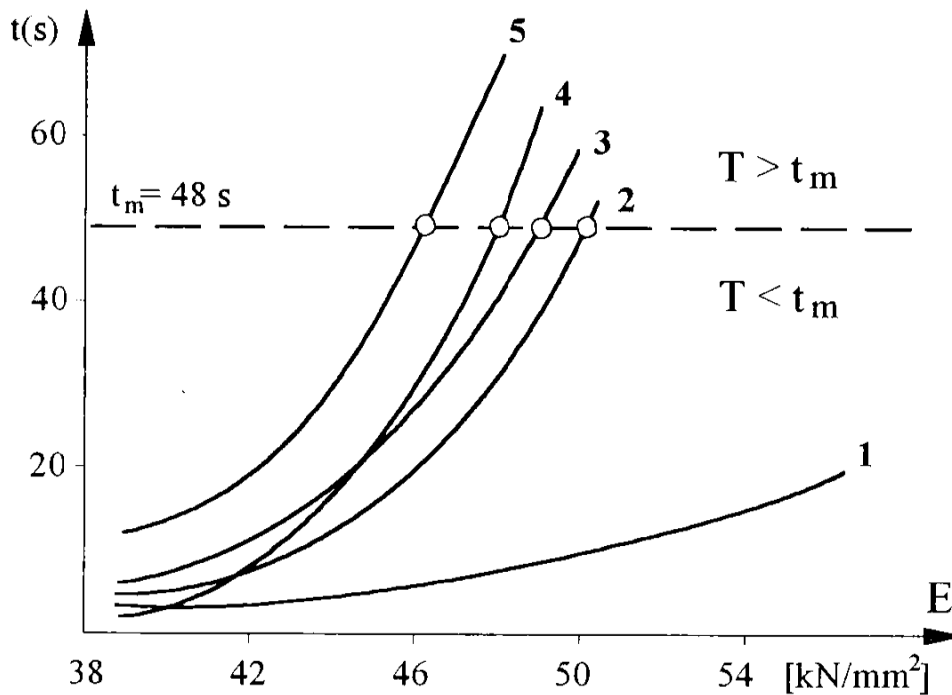
Gdy jakiś parametr ze zbioru  $U$  osiągnie i przekroczy wartość dopuszczalną, np. nastąpi w samochodzie spadek mocy poza wartość dopuszczalną, obiekt może nadal wypełniać zasadnicze funkcje robocze, tzn. jest w stanie zdatności. Jednakże biorąc pod uwagę inne kryteria, obiekt będzie miał właściwości techniczno - eksploatacyjne nie w pełni odpowiadające założonym (np. zwiększone zużycie paliwa w silniku samochodu). Obiekt będzie w okresie nieprawidłowego działania, czyli w stanie **niewydolności technicznej**.

Gdy któryś z parametrów ze zbiorów  $U$  osiągnie wartość graniczną, nastąpi uszkodzenie i obiekt utraci swoje właściwości techniczno - eksploatacyjne. Będzie zatem w **stanie niezdatności**, ponieważ nie będzie mógł wypełniać założonych funkcji roboczych.

Należy tu zaznaczyć, że pojęcia: niesprawności i uszkodzenie opisują konkretne zdarzenia, a niewydolność oznacza stan spowodowany niesprawnością, natomiast niezadziałanie - stan spowodowany uszkodzeniem.

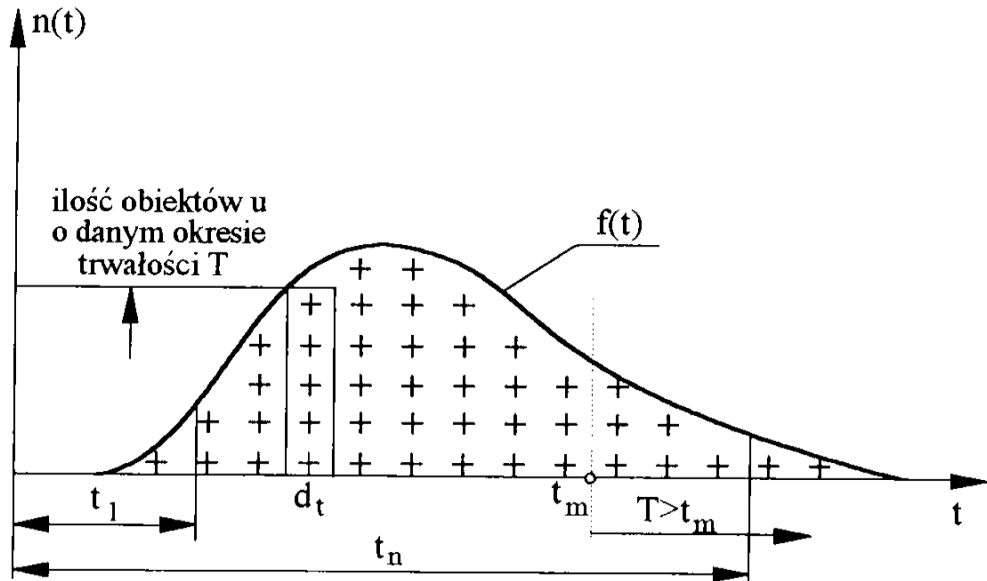
Wobec zmiennych warunków użytkowania i oczywistej niejednorodności obiektów rzeczywistych, występujących błędów projektowania, wad produkcyjnych i obsługowo - naprawczych, uchybień w użytkowaniu i diagnozowaniu, okresy te zmieniają się losowo, tzn. obiekty wykonane wg tej samej dokumentacji technicznej, pracujące w tych samych warunkach środowiskowych, ulegają uszkodzeniu po różnych czasach poprawnej pracy. Rozrzut tych czasów jest często wyraźny, np. dla łożysk tocznych jest rzędu od 1 do 30.

Dla narzędzi, np. ściemych, jest on zróżnicowany zarówno w obrębie tej samej partii (rys. 14), wykonanej przez jednego producenta - wpływ jakości wykonania - jak i partiach wykonywanych przez różnych producentów - oznaczonych na tym rysunku cyframi od 1 do 5 (wpływ jakości projektowej).



Rys. 14. Trwałość ściernic ceramicznych stosowanych do szlifowania pierścieni łożysk tocznych w funkcji rozrzutu ich twardości (mierzonej wg modułu  $E$ )

Jeśli uwzględnić, że czas trwania rozpatrywanej operacji szlifierskiej (czas maszynowy) wynosi  $t_m = 48$  s, to można zauważyć, że w tej samej partii (np. 5) znajdują się narzędzia, które nie są w stanie wykonać danej operacji szlifierskiej - są niezdatne i muszą być wyeliminowane, oraz narzędzia o trwałości przekraczającej czas maszynowy operacji. W danej partii jest zatem pewien procent narzędzi dobrych (niezawodnych) i nieprzydatnych (zawodnych). Zawodne mogą być i całe dostarczone partie - np. partia oznaczona cyfrą 1. Jej jakość projektowa jest dla danego przypadku zła, niemniej jednak partia tych narzędzi może być z powodzeniem zastosowana przy innych warunkach obróbczych. Naturalną jest więc rzeczą potraktowanie czasów pracy  $t$  do chwili uszkodzenia jako zmiennych losowych, a opisywanych zdarzeń jako przypadkowych. Obiekty techniczne tego samego rodzaju, pracujące w tych samych warunkach środowiskowych będą miały różne okresy pracy, zanim nastąpi ich „śmierć” techniczna. Czas pracy jako zmienna losowa  $t$ , będzie miał pewien rozkład  $f(t)$ , którego na ogół przed podjęciem doświadczenia na ogół nie znamy. Oczywiście, nie sposób przewidzieć, ile będzie wynosił czas pracy do uszkodzenia konkretnego badanego obiektu. Przez badanie wielu obiektów (np. próbki o określonej liczności  $n$ ), można jednak przewidzieć prawdopodobieństwo uszkodzenia (śmierci +) tego obiektu w chwili  $t$ , oznaczone przez  $F(t)$ , lub prawdopodobieństwa życia - niezawodnej pracy obiektu  $R(t)$  - rys. 15.



Rys. 15. Rozrzut okresów trwałości obiektów technicznych

Funkcja  $f(t)$  jest gęstością prawdopodobieństwa tego, że losowa wartość czasu życia obiektu (bezawaryjnej pracy) będzie mniejsza od długości przedziału  $(0, t)$ , czyli szacunkiem tego, że uszkodzenie jego nastąpi do chwili  $t$ . Graficznie pole pod krzywą  $f(t)$  obrazuje intensywność uszkodzeń obiektów w poszczególnych jednostkach czasowych  $dt$ . Należy mieć na uwadze przy tym podstawową właściwość funkcji  $f(t)$ , którą opisuje równanie:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (6)$$

Jeżeli przyjąć, że minimalnym granicznym czasem pracy obiektów będzie czas  $t_m$ , to prawdopodobieństwo tego, że obiekty będą eksploatowane bezawaryjnie w przedziale  $(0, t_m)$  opisuje funkcja niezawodności tych obiektów, których trwałość  $T$  do uszkodzenia będzie większa niż  $t_m$  czyli:

$$R(t_m) = \int_{t_m}^{\infty} f(t) dt \quad (7)$$

Interpretacją geometryczną tej funkcji jest zatem pole pod krzywą  $f(t)$  w przedziale  $t_m$  do nieskończoności. Wobec powyższego prawdopodobieństwo tego, że obiekt nie wykona swojego zadania w przedziale  $0 - t_m$  (nastąpi jego uszkodzenie do chwili  $t_m$ ) jest funkcją zawodności:

$$F(t_m) = \int_0^{t_m} f(t) dt \quad (8)$$

której interpretacja geometryczną jest pole pod krzywą  $f(t)$  w przedziale od zera do  $t_m$ .

Ponieważ funkcja zawodności jest przeciwieństwem funkcji niezawodności, istnieje zatem zależność:

$$R(t_m) = 1 - F(t_m) \quad (9)$$

Aby obliczyć zatem funkcje niezawodności obiektów dla określonego czasu  $t_m$ , należy mieć rozkład okresów trwałości tych obiektów w przedziale  $0 - t$ , następnie zbudować na jego podstawie dystrybuantę  $F(t_m)$  i obliczyć funkcję niezawodności  $R(t_m)$  - jako przeciwieństwo tej dystrybuanty.

## 2. 5. Ocena jakości eksploatacyjnej obiektów - resursy

Złożoność konstrukcji urządzeń mechanicznych oraz różnorodność procesów starzenia się ich elementów sprawia, że do opisanie modeli niezawodności - słusznych dla wszystkich urządzeń i ich elementów - należałoby stosować różne miary eksploatacyjne, a więc: czas, przebieg kilometrów, liczba włączeń zespołów itp. Celem uniknięcia tej różnorodności miar przy wprowadzeniu ogólnych charakterystyk niezawodności, niejednokrotnie przyjmuje się pojęcie średniego zasobu (**resursu**) pracy.

Jakość projektowa i jakość wykonania odzwierciedlają się w procesie eksploatacji obiektu i nadają mu określoną jakość eksploatacyjną  $Q_e(t)$ .

Z punktu **widzenia użytkownika**, o jakości eksploatacyjnej określonego obiektu decydują właściwości podstawowych funkcji, które ma on spełniać, np. bezpieczeństwo, wygoda, koszty użytkowania, trwałość i niezawodność.

Użytkownik jest zainteresowany w uzyskaniu możliwie największej pracy z urządzenia, przy ponoszeniu jak najmniejszych strat w okresie jego użytkowania. Zmniejszenie strat ponoszonych przy użytkowaniu obiektów mechanicznych może się odbywać różnymi sposobami, na każdym etapie powstawania i istnienia obiektu. Należy sobie jednak zdawać sprawę, że niektóre specjalne zabiegi technologiczne stosowane przy produkcji, jak również zbyt duże współczynniki bezpieczeństwa dla zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności, pogarszają wiele innych cech jakościowych takiego obiektu (np. ciężar, wymiary, koszt wykonania itp.). Dlatego przy ocenie jakości należy zawsze brać pod uwagę różne wskaźniki jakości eksploatacyjnej obiektu, szczególną uwagę zwracając zaś na **wskaźniki optymalne** dla danego obiektu.

Jednym z najważniejszych wskaźników jakości eksploatacyjnej obiektów mechanicznych w teorii i praktyce eksploatacyjnej jest **resurs eksploatacyjny**, będący miarą zdolności obiektu do realizacji wyróżnionych rodzajów

użytkowania. Dla każdego obiektu mechanicznego wyznaczyć bowiem można taki zasób pracy  $L$  (resur), wyrażony np. liczbą przejechanych kilometrów przez samochód, liczbą przeszlifowanych elementów przez ściernicę, liczbą włączeń żarówki, po której wymaga on określonego rodzaju obsługi technicznej (OT1, OT2...), lub wymiany na nowy. Samochód jest kierowany do odnowienia, jeśli jego zespół lub element osiągnął stan graniczny starzenia fizycznego, czyli wyczerpał **resurs międzyobsługowy lub międzynaprawczy**.

Dla tego samochodu wyróżnić można np.:

- resurs do naprawy głównej,
- resurs do kolejnego napełnienia zbiornika paliwa (resurs ten opisuje liczbę kilometrów przejechanych na jednym zbiorniku paliwa i związany jest ze średnim zużyciem paliwa na 100 km),
- resursy międzyobsługowe, podyktowane koniecznością wymiany oleju, filtrów, świec, opon itp. (resursy do określonej obsługi technicznej OT). Umożliwiają one uzyskanie określonej niezawodności eksploatacyjnej oraz najmniejszych kosztów obsługi na jednostkę przebiegu. Nazywane są i traktowane jako **optymalne**.

Dla właściwej pracy obiektu (optymalnej), bardzo istotnym problemem jest ustalenie wartości resursów międzyobsługowych, czyli okresowości obsługi oraz jej zakresu. Można to ustalić na podstawie wyników badań rzeczywistych potrzeb w zakresie wykonania czynności kontrolnych (diagnozowania), regulacyjnych, smarowniczych itp. Dla określenia tych potrzeb, należy znać intensywność starzenia się fizycznego elementów, zespołów, mechanizmów (wyznaczaną na podstawie modelu tribologicznego) oraz dopuszczalne (ze względu na ekonomiczne lub techniczne kryteria) tolerancje ich stanów granicznych.

Wyznaczone wartości resursów międzyobsługowych oraz zakresy obsług powinny nie tylko zmniejszyć intensywność starzenia się elementów i przyczyniać się do wykrycia węzłów, mechanizmów i zespołów, które nieodpowiednio działają, ale również spowodować zmniejszenie do minimum ilości napraw bieżących między obsługami, tzn. zapewnić uzyskanie spodziewanego poziomu prawdopodobieństwa pracy bez uszkodzeń (oczekiwanej niezawodności obiektu).

Do wyznaczenia **optymalnych wartości resursów** międzyobsługowych wykorzystuje się metody uwzględniające różne kryteria, jak np. przebieg zmian i dopuszczalne wartości stanu technicznego obiektu, dopuszczalny poziom prawdopodobieństwa pracy bez uszkodzeń, minimalne jednostkowe koszty obsług (metoda techniczno - ekonomiczna), dopuszczalny poziom prawdopodobieństwa pracy bez uszkodzeń i koszty obsług (metoda ekonomiczno - probabilistyczna).

Dwie ostatnie z wymienionych metod są najbardziej przydatne do optymalizacji wartości resursów.

**Metoda techniczno - ekonomiczna** oparta jest na wyznaczeniu minimalnych kosztów wynikających z okresowych obsług technicznych i kosztów napraw bieżących.

Okresowość obsług technicznych wyznaczona tą metodą może być taka sama (lub zbliżona) w przypadku, gdy występuje mała liczba uszkodzeń, których usunięcie jest bardzo kosztowne, oraz w przypadku, gdy średnia częstotliwość występowania uszkodzeń jest duża, ale ich naprawa nie jest kosztowna. Oczywiście, oba przypadki nie są równoważne z punktu kierowania procesem obsługiwania i organizacji jego wykonania. Wynika stąd konieczność sprawdzania i korygowania (w przypadku potrzeby) wartości resursów międzyobsługowych, korzystając ze wskaźników niezawodności.

Prawdopodobieństwo pracy bez uszkodzeń w okresach międzyobsługowych powinno być nie mniejsze od 0.8.

W celu uzyskania stałej wartości prawdopodobieństw pracy bez uszkodzeń w okresach między obsługami, przy wzroście intensywności uszkodzeń wraz ze wzrostem czasu eksploatacji obiektu (co ma na ogół miejsce w większości obiektów technicznych), należy odpowiednio zmniejszyć wartości resursów międzyobsługowych, np.: przy podziale całkowitego ресурсu  $L_r$  na trzy części:  $L_1 = (0 - 0.5)L_r$ ,  $L_2 = (0.5 - 0.75)L_r$ ,  $L_3 = (0.75 - 1)L_r$  i przyjęciu wartości resursu międzyobsługowego  $L_1$  za jeden: dla przedziału  $(0.5 - 0.75)L_r$  resurs międzyobsługowy wyniesie  $L_2 = 0.75L_1$ , a dla przedziału  $(0.75 - 1)L_r$  resurs  $L_3 = 0.5L_1$ .

Przy ustalaniu okresowości obsług technicznych **metodą ekonomiczno - probabilistyczną**, zakres periodycznych obsług technicznych może być rozszerzony o niektóre naprawy bieżące, mające znaczenie profilaktyczne. Okresowość tych napraw ustala się na podstawie warunku, że określone mu stosunkowi kosztów na wykonanie operacji naprawczych, przymusowo czy zgodnie z potrzebami, odpowiada tylko jedna optymalna wartość resursu międzyobsługowego i poziom prawdopodobieństwa pracy bez uszkodzeń, przy których koszty jednostkowe będą mniejsze. Na podstawie rozkładu resursów w zbiorze obsług, można określić harmonogramy obsług, które wyznaczają miejsce obsług profilaktycznych.

Znając resursy poszczególnych elementów obiektów mechanicznych, można wyznaczyć **resursy** grupy elementów.

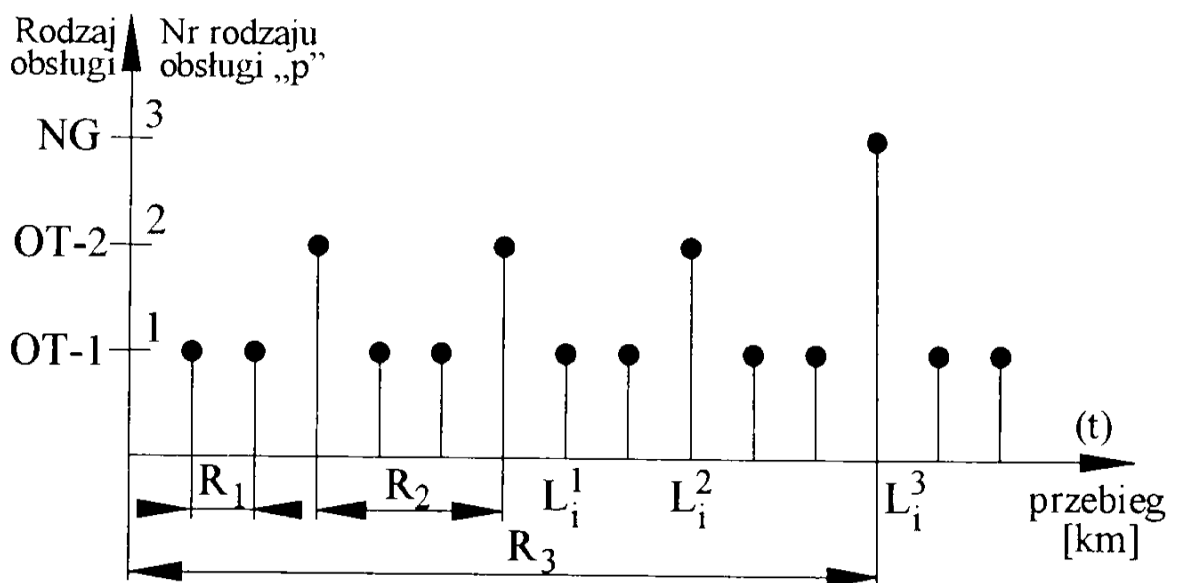
Dla elementów jednorodnych resursy danego rodzaju są identyczne, dzięki temu chwilowy resurs grupy elementów wyznacza się sumując chwilowe resursy

poszczególnych elementów. Nie należy natomiast sumować ze sobą resursów elementów różniących się od siebie rodzajem.

Obiekty, których resursy zostały zużyte, przechodzą z systemu użytkowania do systemu obsługi, w którym odtwarzane są początkowe wartości resursów.

Przy ocenie trwałości obiektów jednorodnych często stosowanym wskaźnikiem trwałości jest przebieg (**resurs**) **gamma procentowy**, gdzie  $\gamma$  oznacza, że w nie mniej niż  $\gamma$  procent obiektów w danej partii ma mieć trwałość zgodną z wymaganiami, np.  $\gamma = 90\%$  oznacza, że tylko 10 sztuk obiektów na 100 może nie osiągnąć określonego przebiegu do naprawy głównej.

Opracowanie szczegółowych harmonogramów obsług (podawane najczęściej przez producenta w instrukcji obsługi) oraz bieżąca kontrola wykonanych jednostek pracy „ $R$ ” (np. przejechanych kilometrów przez samochód) pozwala w sposób planowy i we właściwej chwili skierować obiekt do odpowiedniej (planowej) obsługi „ $p$ ”. Do potrzeb planowania eksploatacji używa się też pojęcia zapas resursu rodzaju „ $p$ ” (np. ilość kilometrów „ $L$ ” do I przeglądu, do II, czy też do naprawy głównej). Jest to zatem wielkość określająca liczbę jednostek pracy obiektu, jaką od danej chwili należy zrealizować aż do momentu wykonania obsługi rodzaju „ $p$ ”. Na podstawie rozkładu wielkości resursów w zbiorze obsług można określić harmonogramy obsług (rys. 16), które wyznaczają zbiór  $\{L_{pt}\}$  wartości pracy obiektu, po zrealizowaniu których należy wykonać kolejną obsługę określonego rodzaju „ $p$ ”.



Rys. 16. Harmonogram obsług przywracających „przydatność” obiektu

Wartości resursu można zmieniać w pewnych granicach przez zmianę konstrukcji i technologii obiektu (zadanie dla konstruktora i technologa mechanika). Dąży się do skonstruowania takiego obiektu mechanicznego (i tak

dobiera się technologię produkcji), aby obsługa obiektu odbywała się w miarę możliwości w równych i stałych odstępach czasu, a poszczególne resursy spełniały warunki wielokrotności. Uważa się, że obiekty mechaniczne nie spełniające warunku wielokrotności resursów są źle zaprojektowane z punktu widzenia ich użytkownika.

Reasumując zagadnienia tego podrozdziału, można dać odpowiedź na pierwsze z pytań postawione w przedmowie do skryptu. Ten samochód jest lepszy od innego, który posiada korzystniejsze dla użytkownika wartości resursów eksploatacyjnych.

## **Literatura podstawowa do rozdziału 2**

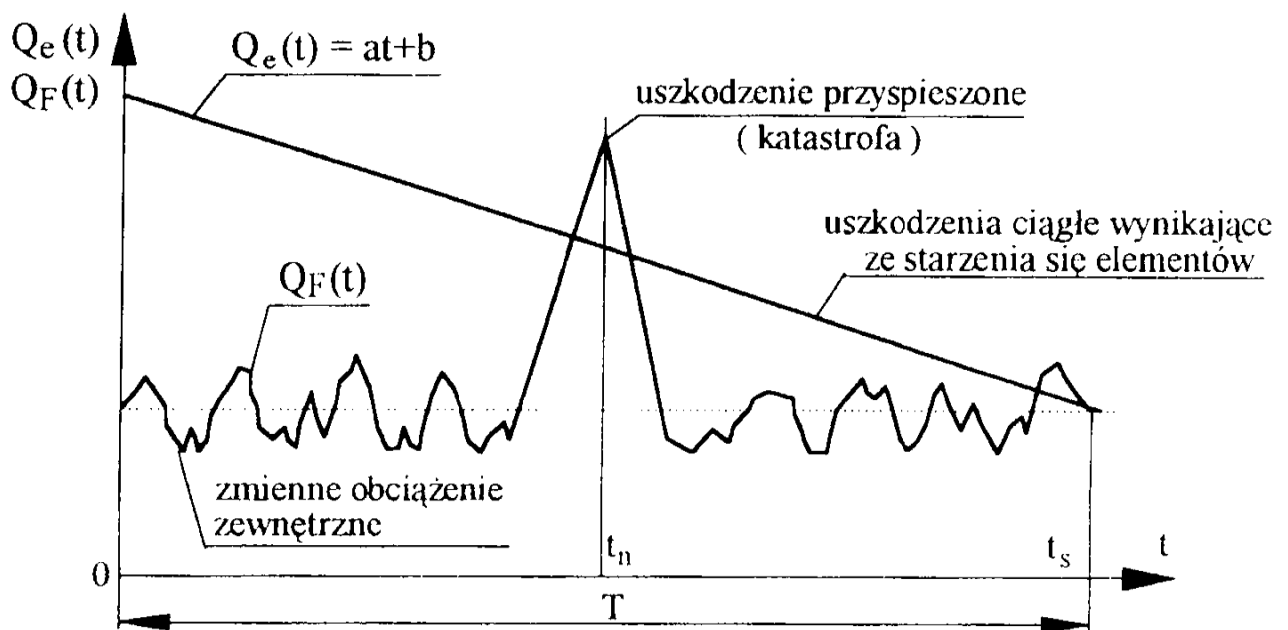
1. Adamkiewicz A. : *Wstęp do racjonalnego wykorzystania urządzeń technicznych*. WKiŁ, Warszawa 1982
2. Bojarski W. : *Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych*. PWN, Warszawa 1967
3. Dubowikow B. N. : *Podstawy naukowej organizacji i kierowania jakością*. PWE, Warszawa 1969
4. Hebda M., Mazur T., Pelc H. : *Teoria eksploatacji pojazdów*. WKiŁ, Warszawa 1978
5. Juran J. M. , Frank M., Gryna I. R. : *Jakość - projektowanie, analiza*. WNT, Warszaw 1978
6. Kiliński A. : *Jakość*. WNT, Warszawa 1979



### 3. USZKODZENIA OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

#### 3. 1. Model procesu uszkodzenia obiektu technicznego

W eksploatacji uszkodzenie rozpatrywane jest jako **zdarzenie losowe**, zachodzące wówczas, gdy obciążenie zewnętrzne  $Q_F(t)$  przewyższy odporność wewnętrzną  $Q_e(t)$  badanego elementu, powodując tym samym niezdatność obiektu. Obiekt ten po uszkodzeniu może znajdować się w stanie niezdatności czasowo, (jeżeli to będzie obiekt odnawialny, np. ściernica) lub na stałe (jeżeli będzie to obiekt nieodnawialny, np. żarówka). Załóżmy, że naszym obiektem będzie ściernica. Model procesu uszkodzenia tego obiektu pokazano na rys. 17.



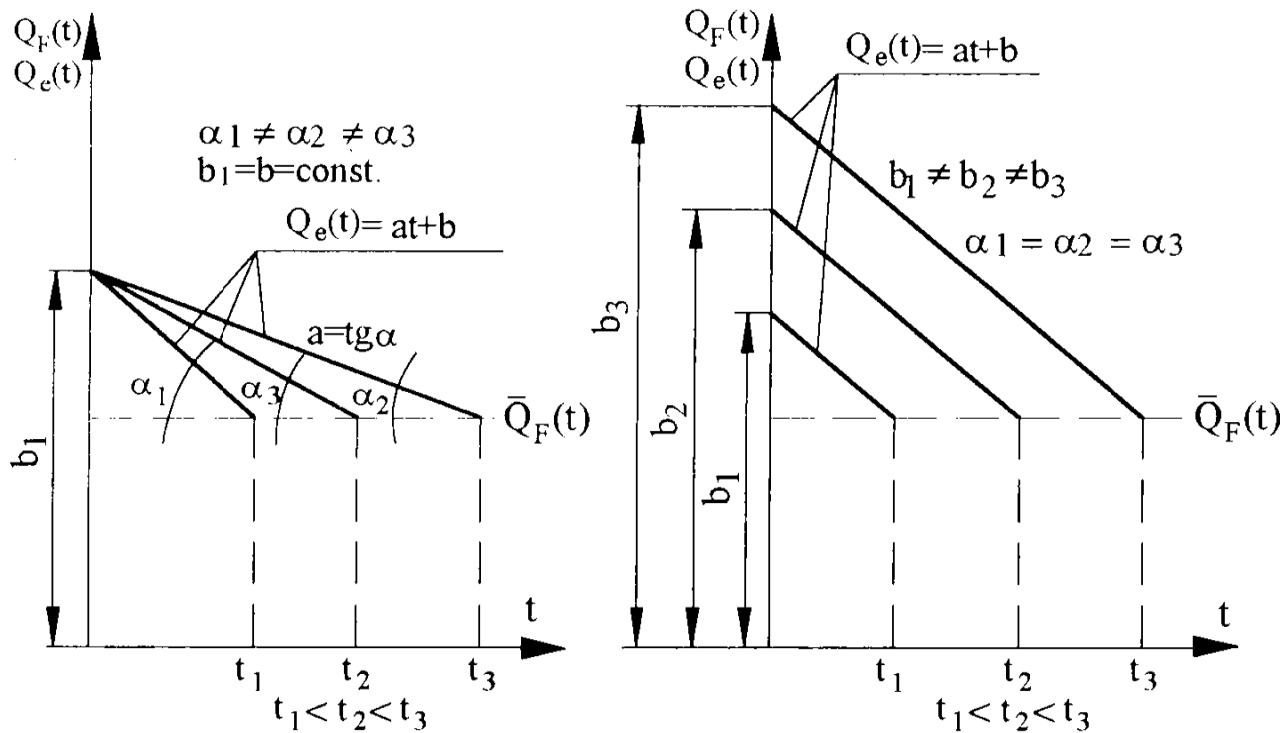
Rys. 17. Model procesu uszkodzenia obiektu technicznego

Elementem ściernicy podlegającym procesom zużycia pod wpływem zmiennych obciążeń  $Q_F(t)$ , wywołanych siłami skrawania, jest ziarno ściernic o odporności wewnętrznej  $Q_e(t)$ . Ziarno to może ulec uszkodzeniu nagłemu (w czasie  $t_n$ , jeżeli nastąpi nagły wzrost przyłożonego obciążenia), lub uszkodzeniu stopniowemu - ścieraniu się w czasie  $t_s$ .

Uszkodzenia ziarna zachodzące w czasie  $t_n$  lub  $t_s$ , są zdarzeniami losowymi, bo zarówno wartości obciążeń  $Q_F(t)$  są przypadkowe, jak i odporność wewnętrzna ziarna też jest losowo zmienna. W najprostszym modelu można przyjąć, że funkcja zmian stanu technicznego  $Q_e(t)$  obiektu jest funkcją liniową, wobec powyższego postać takiej funkcji opisuje równanie prostej:

$$Q_e(t) = at + b \quad (10)$$

Występuje zatem pewien składnik wytrzymałości  $a$ , zmienny z czasem (starzenie fizyczne) oraz składnik  $b$ , niezależny od czasu obróbki, związany z jakością wykonania (połączenia ziarna ze spoiwem). Zmiana wartości tych składników wpływać będzie na różny czas pracy elementów (ziaren), a tym samym na trwałość obiektu (ściernicy) - rys. 18a i 18b.



Rys. 18. Postać realizacji funkcji starzenia się obiektu technicznego:  
a) skutek zastosowania różnych materiałów, b) skutek różnej jakości

Postać realizacji funkcji starzenia badanego elementu w czasie, wyrażona np. jako jego zużycie, jest zależna od stanu początkowego tego elementu ( $b_1, b_2, b_3$ ) oraz od intensywności jego zużywania się (kąt  $\alpha$  nachylenia prostej).

Konstruktor i technolog ma pośrednio wpływ na przebieg procesu zużywania się eksploatowanego obiektu przez nadawanie elementom różnej jakości projektowej i jakości wykonania (przez co ustala wartość składnika  $b$ ) oraz wykonanie ich z różnych materiałów (przez co ustala wartość składnika  $a$ ).

Uszkodzenie elementu w czasie  $t_1, t_2, t_3$ , wpływa na zmienność okresów trwałości całego obiektu. Przyjmując że niezdatność elementu zaistnieje przy wartości obciążenia zewnętrznego  $Q_e(t) = Q_{Fb}$ , czas poprawnej pracy tego elementu oblicza się z poniższej zależności:

$$t = \frac{b - Q_{Fgr}}{\tan \alpha} \quad (11)$$

Im większa jest zatem odporność początkowa elementu  $b$  (wynikająca z jego jakości), tym można oczekiwać dłuższego czasu pracy do jego uszkodzenia (większej niezawodności tego elementu).

Obiekt mechaniczny należy rozpatrywać jako pewien złożony system, a elementy tego obiektu jako elementy tego systemu. Uszkodzenie dowolnego elementu nie musi być jednakowe w skutkach dla tego obiektu jako systemu. W jednym przypadku skutki uszkodzenia elementu powodują utratę zdolności obiektu do dalszego użytkowania (np. uszkodzenia pompy paliwowej w samochodzie), a w innym - pogorszenie jej cech eksploatacyjnych, jak np. ma to miejsce w przypadku uszkodzenia żarówki kierunkowskazów samochodu. W tym drugim przypadku mamy do czynienia z niesprawnością, tj. takim zdarzeniem, które powoduje zmianę założonej wartości jakiegoś parametru struktury obiektu zawartych w dokumentacji.

**Przez uszkodzenie rozumie się zatem zdarzenie losowe, polegające na przejściu obiektu dwustanowego ze stanu zdolności do niezdadności.**

Miejsce elementu w strukturze i jego relacje z innymi elementami struktury tego obiektu warunkuje natomiast rozległość skutków uszkodzenia elementu i w konsekwencji niezdadność lub niesprawność obiektu, np. inny jest efekt uszkodzenia koła jezdnego i inny klamki u drzwi w samochodzie.

Zewnętrznym objawem uszkodzenia obiektu jest przekroczenia przez parametr charakteryzujący stan techniczny elementu lub zespołu takiej wartości, że dalsza eksploatacja jest niemożliwa lub niezgodna z ustalonymi wymaganiami. Przejście zatem w obszar niezdadności następuje po osiągnięciu przez element lub cały obiekt stanu granicznego.

Problem wyboru stanów granicznych jest jednym z trudniejszych w problematyce niezawodności obiektów mechanicznych. Oceny stanu granicznego obiektu należy dokonywać z uwzględnieniem kryteriów technicznych, techniczno - ekonomicznych i technologicznych:

- **techniczne** - w przypadkach, gdy element nie będzie mógł wypełniać swych funkcji z powodu zniszczenia,
- **techniczno-ekonomiczne**, np. w przypadkach, kiedy w rezultacie przekroczenia stanu granicznego spada ekonomiczna efektywność obiektu,
- **technologiczne** - w przypadkach niedopuszczenia do pogorszenia charakterystyk obiektu, np. hałasu podczas pracy.

Zbiory granicznych wartości (dopuszczalnych zmian) parametrów stanu elementów, zespołów lub całych obiektów są podstawą racjonalnego

wyznaczania trwałości tych obiektów i przewidywania terminów ich odnowy (**prowadzenia pewnej polityki eksploatacyjnej**).

Prawidłowa eksploatacja wymaga zatem pewnej wiedzy teoretycznej (pozwalającej na zbudowanie modelu tribologicznego) oraz korzystania z wyników badań eksploatacyjnych, będących źródłem informacji o charakterze uszkodzeń.

### 3. 2. Klasyfikacja uszkodzeń

Zmiana stanu niezawodnościowego jest zdarzeniem losowym. Ze względu na sposób pojawienia się tego zdarzenia w czasie, uszkodzenia dzieli się na:

- uszkodzenia stopniowe - związane ze starzeniem fizycznym,
- uszkodzenia nagłe - związane z nagłą zmianą określonego parametru poza wartości dopuszczalne.

W niezawodności pojęcie „nagle” czy „stopniowe” uszkodzenie obiektu związane jest też praktycznie z tym, czy jest to wielkość mierzalna czy niemierzalna. Uszkodzenie nagłe rejestrowane jest na ogół po fakcie zajścia takiego zdarzenia natomiast uszkodzenie stopniowe rejestrowane jest jako ciągła - (przebiegająca z określoną prędkością w czasie) zmiana badanego parametru do wartości granicznej. W ten sposób uszkodzenia stopniowe mogą być prognozowane - jako zdarzenia, które znajdują w czasie z określonym prawdopodobieństwem. Katastrof nie możemy prognozować, możemy co najwyżej przeciwko nim się ubezpieczyć.

Dla potrzeb eksploatacji, uszkodzenia obiektów lub ich elementów dzieli się również na:

- uszkodzenia pierwotne,
- uszkodzenia wtórne.

**Uszkodzenie pierwotne** elementu jest niezależne od miejsca zajmowanego w strukturze funkcjonalnej obiektu i jest rozumiane jako zdarzenie, którego powstanie jest wywołane procesem fizycznym lub fizyko-chemicznym, przebiegającym w danym elemencie. Uszkodzenia pierwotne stanowią podstawę wnioskowania o trwałości i niezawodności elementów obiektu w danych warunkach eksploatacji.

**Uszkodzenia wtórne** elementów rejestrowane są jako skutki uszkodzeń pierwotnych lub też wynikające z wymogów procesu technologicznego. Przykładem elementu podlegającego uszkodzeniu pierwotnemu i wtórnemu może być uszczelka pod głowicę samochodu, podlegająca wymianie z powodu utraty

szczelności głowicy (uszkodzenie pierwotne), jak i z powodu uszkodzenia wymuszonego technologią naprawy (uszkodzenie wtórne). Uszkodzenia pierwotne i wtórne są podstawą do ustalania zapasów magazynowych części.

Stosuje się również **podział uszkodzeń** na określone grupy, różniące się istotnością wpływu na obiekt. Jedną z możliwych klasyfikacji uszkodzeń, według określonych kryteriów podano w tabl. 5.

*Tabl. 5. Ogólna klasyfikacja uszkodzeń*

Kryterium klasyfikacji	Rodzaje uszkodzeń
Stopień wpływu na zdolność do poprawnej pracy	Całkowite Częściowe
Fizyczny charakter powstawania uszkodzeń	Katastroficzne Parametryczne
Związek z innymi uszkodzeniami	Niezależne Zależne
Charakter procesu pojawiania się uszkodzeń	Nagle Stopniowe
Czas występowania uszkodzeń	Stałe Chwilowe Chwilowo-wielokrotne

Ogólnie klasyfikować można uszkodzenia w zależności od:

- rozległości skutków,
- wpływu na parametry ruchu,
- zmian cech fizycznych elementów i zespołów,
- lokalizacji,
- naprawialności,
- zagrożeń zdrowia i życia,
- konieczności rezerwowania urządzeń,
- wpływu na transportowany ładunek.

Najbardziej przydatna jest taka klasyfikacja uszkodzeń elementów, która umożliwia makroskopową ocenę postaci uszkodzenia oraz domniemanej przyczyny jej powstania na tle warunków eksploatacji obiektu, w którym nastąpiło uszkodzenie elementu. Najczęściej spotykana klasyfikacja uszkodzeń to: niesprawność, awaria, katastrofa.

### 3. 3. Przyczyny uszkodzeń

Przyczyny powstawania uszkodzeń złożonych obiektów są różnorakie. W każdym przypadku wiadomo jednak, że jego źródłem są czynniki wymuszające. Ogólnie wydziela się przyczyny uszkodzeń jako wynikające z:

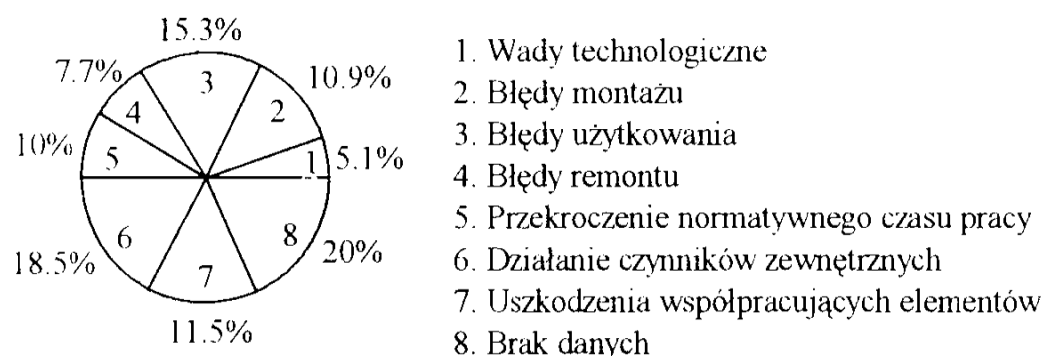
1. wad konstrukcji i błędów technologicznych obiektu,
2. niewłaściwej eksploatacji (nieumiejętność obsługi),
3. czynników zewnętrznych (zmiennych warunków otoczenia).

Przykładowe postaci uszkodzeń, ich przyczyny i objawy podano w tabl. 6.

Uszkodzenia obiektów eksploatacji może być spowodowane zatem:

- przekroczeniem przez czynniki wymuszające wartości, na które obiekt był projektowany,
- przekroczeniem wartości granicznych jednego z elementów obiektu, których zmiana została wywołana zużyciem pod wpływem działania czynników wymuszających,
- niedotrzymanie wymaganych właściwości początkowych obiektu (niewłaściwa technologia wykonania).

Przyczyny te odpowiednio odniesione do elementów, zespołów lub całych obiektów, dają podstawę utworzenia kodu przyczynowego, umożliwiającego zbieranie i gromadzenie informacji o niezawodności danego obiektu - tabl. 7. Przykład zastosowania opisanej klasyfikacji przyczyn powstania uszkodzeń pokazano na rys. 19.



Rys. 19. Zestawienie częstości występowania przyczyn uszkodzeń

Tabl. 6. Klasyfikacja postaci uszkodzeń występujących w pojazdach samochodowych

Postać uszkodzenia	Przyczyna bezpośrednia	Typowe objawy
Zużycie warstwy wierzchniej	Zużycie na skutek tarcia ślizgowego, obciążeń kontaktowych oraz gradientu cieplnego	Zmiana wymiarów kształtu i gładkości powierzchni, wzrost luzów, stuków, nieciągłości ruchu,
Złamania, zerwania lub pęknięcia elementów	Niedostateczna wytrzymałość doraźna, zmęczeniowa, udarność	Utrata spoiwości, utrata cech funkcjonalnych, niesprawność obiektu, utrata sztywności
Odształcenia trwałe, deformacja elementów	Przekroczenie dopuszczalnych obciążeń doraźnych	Zmiana kształtu postaci, miejscowe wgniecenie lub wydłużenie
Rozregulowania	Obciążenia zmienne, drgania	Obluzowanie połączeń, stuki, utrata cech funkcjonalnych
Zwarcia lub przerwy w instalacji elektrycznej	Nadmierne obciążenia cieplne, a także zjawiska chemiczne	Przerwa w pracy silnika, utrata cech funkcjonalnych
Nieszczelność	Obciążenia doraźne lub zmienne, zużycie na skutek tarcia ślizgowego	Ubytki czynnika ciekłego lub gazowego, utrata cech funkcjonalnych
Przepalenia	Nadmierne obciążenia cieplne	Niesprawność obiektu pogorszenie parametrów funkcjonalnych
Zanieczyszczenia, zapchania	Zjawiska chemiczne i fizyczne	Niesprawność obiektu, pogorszenie parametrów funkcjonalnych
Inne	Starzenie elementów, korozja, niszczenie powłok ochronnych	Zmian barwy, gładkości, połysku, nieestetyczny wygląd

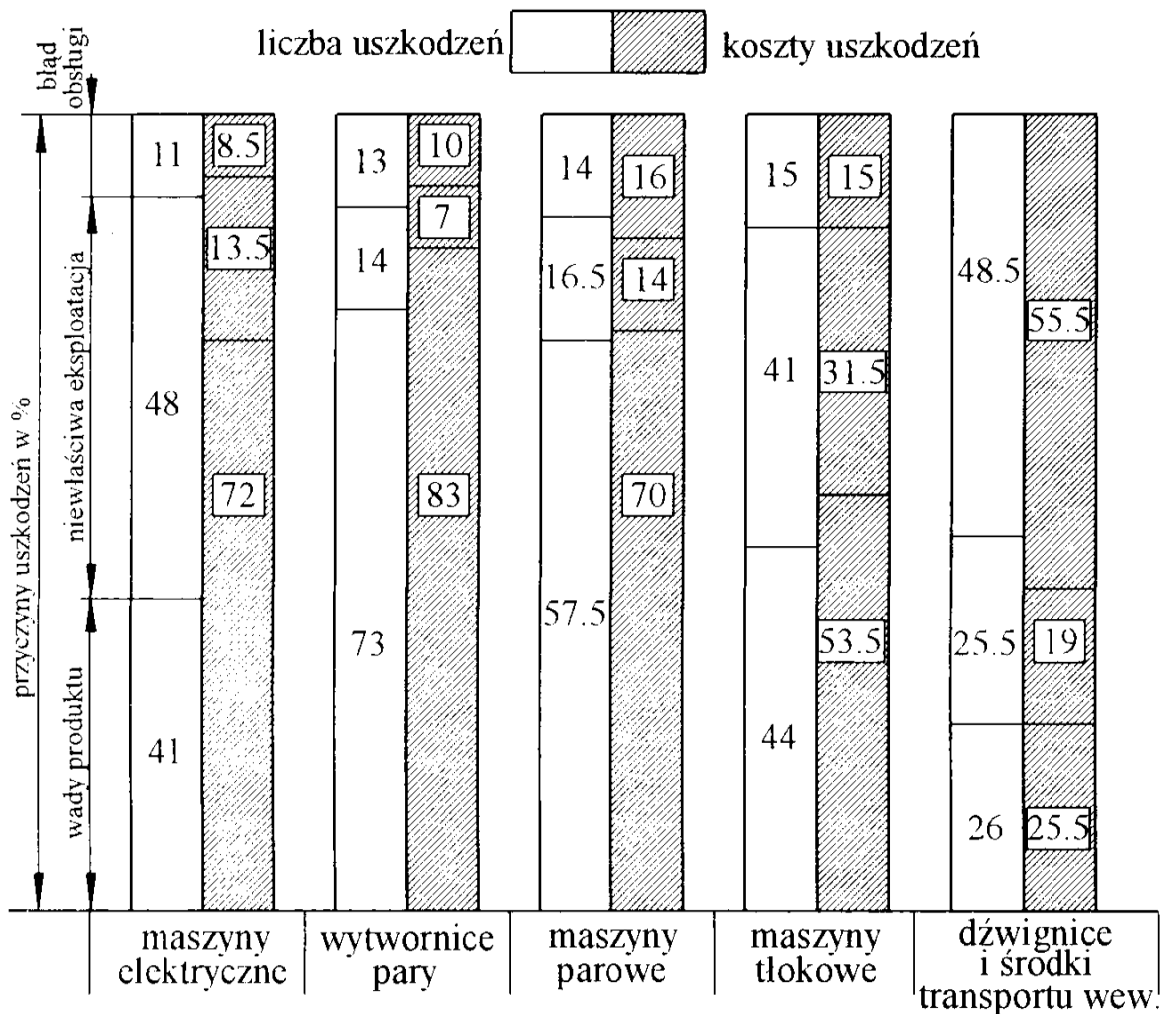
*Tabl. 7. Szczegółowa klasyfikacja przyczyn powstawania uszkodzeń silników spalinowych*

Symbol	Przyczyny uszkodzenia
A 0.0.	<b>USZKODZENIA WYNIKAJĄCE Z BŁĘDÓW PRODUKCJI</b>
A 1.0.	- błędy konstruowania,
A 2.0.	- niewłaściwy materiał konstrukcyjny,
A 3.0.	- materiał z ukrytymi wadami technologicznymi,
A 4.0.	- błędy technologii wytwarzania,
A 4.1.	- błędy obróbki mechanicznej,
A 4.2.	- błędy obróbki cieplnej,
A 4.3.	- błędy obróbki chemicznej,
A 5.0.	- błędy montażu,
A 6.0.	- błędy regulacji,
A 7.0.	- zanieczyszczenia produkcyjne.
B 0.0.	<b>USZKODZENIA WYNIKAJĄCE Z BŁĘDÓW NAPRAWY</b>
B 1.0.	- niewłaściwy materiał
B 2.0.	- błędy regulacji
B 3.0.	- błędy technologii napraw,
B 4.0.	- błędne zastosowanie części zamiennej,
B 4.1.	- zastosowanie uszkodzonej części,
B 4.2.	- zastosowanie części z niewłaściwego materiału,
B 4.3.	- zastosowanie części z ukrytą wadą technologiczną,
B 4.4.	- zastosowanie części o niewłaściwych wymiarach,
B 5.0.	- błędy montażu,
B 6.0.	- zanieczyszczenia po naprawie.
C 0.0.	<b>USZKODZENIA WYNIKAJĄCE Z BŁĘDÓW EKSPLOATACJI</b>
C 1.0.	- błędy regulacji,
C 2.0.	- przekroczenie dopuszczalnych parametrów pracy,
C 2.1.	- celowe przekroczenie dopuszczalnych parametrów pracy,
C 2.2.	- w wyniku zmiany warunków zewnętrznych,
C 2.3.	- w wyniku zmiany obiegu termodynamicznego,
C 2.4.	- w wyniku błędnego odczytu wskazań przyrządów,
C 3.0.	- naruszenie kolejności czynności eksploatacyjnych,
C 4.0.	- zaniedbanie przeglądów technicznych,
C 5.0.	- zaniedbanie planu remontów,



C 6.0.	- zastosowanie niewłaściwego czynnika,
C 7.0.	- chemiczne oddziaływanie zewnętrzne,
C 8.0.	- nieumiejętność lub nieuwaga obsługi.
D 0.0.	<b>USZKODZENIA WYWOŁANE PRZEKROCZENIEM DOPUSZCZALNYCH OBCIĄŻEŃ MECHANICZNYCH</b>
D 1.0.	- odkształceniem sprężystym elementów,
D 2.0.	- odkształceniem plastycznym elementów,
D 3.0.	- pęknięciem elementów,
D 4.0.	- zniekształceniem przekroju czynnego elementów,
D 5.0.	- zużyciem czynnej powierzchni zewnętrznej elementów,
E 0.0.	<b>USZKODZENIA WYWOŁANE PRZEKROCZENIEM DOPUSZCZALNYCH OBCIĄŻEŃ CIEPLNYCH</b>
E 1.0.	- przepalanie,
E 2.0.	- naprężenia cieplne w ściankach,
E 3.0.	- naprężenia cieplne wewnątrz elementu,
E 4.0.	- wydłużenia cieplne,
E 5.0.	- zmiana właściwości materiału,
E 6.0.	- zmiana właściwości czynników roboczych.
F 0.0.	<b>USZKODZENIA WYWOŁANE KOROZJĄ</b>
F 1.0.	- tlenową,
F 2.0.	- parowo-wodną,
F 3.0.	- kwasową,
F 4.0.	- międzykrystaliczną,
F 5.0.	- zmęczeniową.
G 0.0.	<b>USZKODZENIA WYWOŁANE KAWITACJĄ</b>

Kod przyczynowy uszkodzeń pozwala na analizę przyczyn uszkodzeń w odniesieniu do różnych grup obiektów technicznych, co pokazano przykładowo na rys. 20.



Rys. 20. Struktura awarii dla różnych grup obiektów technicznych

Z podanego zestawienia wynika przykładowo, że w zależności od grupy obiektów technicznych, niewłaściwa eksploatacja może powodować od 14 do 48% awarii i największy procent jest dla maszyn elektrycznych.

Udział w konkretnej grupie obiektów uszkodzeń wynikających z wad konstrukcji, zwykle maleje w miarę starzenia się produkcji (poprawa jakości wykonania) oraz dokładniejszego przewidywania zróżnicowanych warunków eksploatacji danego typu obiektów. Staje się on coraz bardziej „dopasowany” do danych warunków użytkowania. Nie musi to wynikać z poprawy obsługi i dozoru.

W obiektach złożonych różne mogą być przyczyny uszkodzeń elementów. Wynika stąd zróżnicowanie ich niezawodności po różnym czasie „życia” obiektu - tabl. 8.

Tabl. 8. Zestawienie wartości niezawodności  $R(l)$  różnych zespołów jednośladowych pojazdów silnikowych

Nazwa zespołu	Wartość funkcji $R(l)$ dla			
	$l = 500 \text{ km}$	$l = 750 \text{ km}$	$l = 5000 \text{ km}$	$l = 7500 \text{ km}$
Silnik	0.8137	0.5388	0.1237	0.0454
Skrzynia biegów	0.8957	0.7186	0.3323	0.1916
Układ zasilania paliwem	0.9023	0.7405	0.3778	0.2355
Układ ssąco-wydechowy	0.9254	0.7519	0.3047	0.1464
Układ zapłonowy	0.7436	0.5021	0.1484	0.0084
Sprzęgło	0.9943	0.9258	0.4330	0.1932
Układ sterowania	0.8856	0.6235	0.2547	0.1616
Koło tylne	0.7501	0.5054	0.1664	0.0462
Układ nośny	0.9595	0.8834	0.6615	0.5381
Instalacja elektryczna	0.7370	0.4438	0.1608	0.1007
Koło przednie	0.9999	0.9975	0.7833	0.5402
Osprzęt i wyposażenie	0.9472	0.8498	0.5813	0.4432

Przedstawione w tabl. 8 dane, dotyczące przewidywanego poziomu niezawodności po różnych okresach pracy obiektu, wykorzystywane mogą być w syntezie niezawodnościowej danej grupy elementów. Głównym bowiem celem badania i analizy zdarzeń eksploatacyjnych podczas badań niezawodnościowych jest uzyskanie konkretnych liczbowych wyników. Dla obiektów złożonych, jakimi są np. silniki spalinowe, jest to możliwe do uzyskania po względnie krótkim czasie wyłącznie poprzez zawężenie pola badawczego do badania najistotniejszych jego elementów. Zgodnie bowiem z prawem Pareto (20/80), tylko 20% podstawowych cech (elementów) jest przyczyną 80% strat związanych z jakością (niezawodnością). Należy zatem wyszukać te elementy i główny wysiłek skierować na podniesienie ich niezawodności, bowiem zwykle one stają się przyczyną „śmierci” technicznej obiektu.

W pojazdach jednośladowych, wg danych tabl. 8, takim najbardziej zawodnym elementem jest układ zapłonowy i układ elektryczny, na nie w pierwszej kolejności winny być skierowane wszystkie prace z zakresu poprawy niezawodności. Istotne jest również to, że (jak wskazują wyniki badań niezawodności), przeszło 30% uszkodzeń tych obiektów wywołanych jest

błędami popełnionymi na etapie eksploatacji. Stwierdzono też, że około 50% uszkodzeń „zaskakuje” użytkownika podczas jazdy. Jest to zjawisko bardzo niekorzystne, gdyż w takich warunkach użytkownik posiada ograniczone możliwości poprawnego i szybkiego usunięcia uszkodzenia. Przy tego typu pojazdach, użytkownik traci bowiem średnio około 15% czasu na lokalizację uszkodzenia, ponad 50% czasu pochłaniają czynności demontażowe i montażowe, a tylko 30% czasu przeznaczają się na czynności związane z naprawą uszkodzonych elementów. Zwykle przy tym około 40% napraw dokonuje się poprzez wymianę uszkodzonych elementów.

Właściwa obsługa eksploatacyjna ma też wpływ na rodzaj powstających uszkodzeń. Na przykład: z ogólnej liczby zarejestrowanych uszkodzeń podczas badań eksploatacyjnych samochodów wynikało, że 40÷60% stanowiły uszkodzenia stopniowe, z których 60÷65% (35% ogólnej liczby uszkodzeń) zależało bezpośrednio od regularności i prawidłowości wykonania obsługi technicznych.

### **3. 4. System gromadzenia danych o uszkodzeniach**

System gromadzenia danych o uszkodzeniach i o czasie działania złożonych obiektów nazywany jest **systemem informacji** w zakresie niezawodności. Są trzy podstawowe źródła tego rodzaju danych:

- badania w fabryce,
- badania we eksploatacji,
- dane o działaniu wyrobów, pochodzące od głównego użytkownika.

Zaprojektowanie systemu rozpoczyna się od ustalenia formularza meldunków o uszkodzeniach. Istnieje wielka różnorodność takich formularzy, bo każde przedsiębiorstwo musi dopasować go do swoich wyrobów. Ogólnie rzecz biorąc, formularz zawierać winien wymienione niżej informacje:

1. Pełne zidentyfikowanie części, która zawiodła,
2. Czas sprawnego działania,
3. Opis zakłócenia,
4. Doraźnie podjęte kroki i zalecane dalsze kroki,
5. Czas potrzebny do przywrócenia sprawnego działania układu,
6. Wnioski z analizy uszkodzenia,
7. Warunki pracy zaobserwowane w czasie dokonywania naprawy,

8. Wymienione przy naprawie części,

9. Czas naprawy,

10. Inne

11. .

Wobec tego, że w przyszłości mogą być potrzebne jeszcze inne informacje, dobrze jest przewidzieć na formularzu kilka nienumerowanych pustych rubryk, którym można będzie w razie potrzeby dać odpowiednie nagłówki. Unika się w ten sposób kompletnego przerabiania formularza, ilekroć trzeba włączyć nową informację. Przykładową kartę uszkodzenia pojazdu, stosowaną przez Instytut Transportu Politechniki Warszawskiej przedstawiono na rys. 21.

System gromadzenia danych o uszkodzeniach musi mieć rozpracowane takie zagadnienia jak:

- uzyskiwanie informacji,
- zbieranie informacji,
- przesyłanie informacji,
- obróbka informacji,
- przechowywanie informacji,
- przedstawianie informacji.

Systemy informacyjne dzieli się na **systemy typu technologicznego**, przeznaczone do obsługi procesów technologicznych - rozumianych w szerokim sensie oraz systemy typu **administracyjno - organizacyjnego**.

W przypadku systemów informacyjnych typu technologicznego, charakterystyczne jest otrzymywanie informacji od urządzeń automatycznych (czujników) i dostarczenie ich również pewnym automatycznym odbiornikom (miernikom, rejestratorom, organom wykonawczym). W systemach informacyjnych typu administracyjnego, źródłami informacji mogą być dokumenty opracowane przez człowieka. Dane te można wykorzystywać do celów planowania i zarządzania eksploatacją, jak również do celów udoskonalenia technologii i konstrukcji eksploatowanego obiektu.

IDENTYFIKATOR JEDNOSTKI OPRACOWUJĄCEJ KARTĘ		<b>KARTA USZKODZEŃ</b>			
Typ pojazdu	Nr identyfikacyjny	Stan licznika			
<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>			
Uszkodzenia wykryto:		1. w kraju	2. za granicą	▶ <input type="checkbox"/>	
		1. na trasie	2. podczas OT	3. podczas NB	▶ <input type="checkbox"/>
Nazwisko wypełniającego		m-c	dzień	godz.	min
<input style="width: 100%;" type="text"/>		<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>
Uszkodzony układ:		3. układ kierowniczy	6. silnik ▶ <input type="checkbox"/>		
1. układ napędowy	4. układ nośny	7. nadwozie			
2. układ napędowy	5. klimatyzacja	8. instalacja elektryczna			
Nazwa zespołu, podzespołu, części A	Nr katalogowy B	C	D	E	
	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>
	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>
	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/>
Opis pola C - Rodzaj uszkodzenia		1. pierwotne    2. wtórne			
Opis pola D - Postać uszkodzenia					
01. pęknięcie	08. skręcenie	15. zwarcie			
02. ścięcie	09. zgięcie	16. przepalenie			
03. zerwanie	10. zapiecenie	17. rozłączenie			
04. złamanie	11. zatarcie	18. rozregulowanie			
05. ukręcenie	12. korozja	19. zużycie tarciove			
06. stłuczenie	13. rozdarcie	20. zużycie starzeniowe			
07. wgniecenie	14. przebicie	21. nieszczelność			
Opis pola E - Przyczyna uszkodzenia					
01. zmęczenie materiału	04. brak zabezp. antykor	08. niewłaściwe użytkowanie			
02. zestarzenie	05. odkręcenie	09. niewłaściwa OT			
03. zanieczyszczenie	06. złe wykonanie	10. brak OT			
	07. wada materiału	11. inne			
Następstwa uszkodzenia:		1. wypadek	3. holowanie ▶ <input type="checkbox"/>		
		2. dalsza jazda	4. naprawa		
Dokładny opis słowny uszkodzenia umieścić na odwrocie					
Nr karty obsługi	Nazwisko weryfikującego				
<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>				

Rys. 21. Karta uszkodzeń pojazdu samochodowego

W zależności od charakteru informacji eksploatacyjnych można wyróżnić **informacje obligatoryjne** - o mocy obowiązującej (dyrektywy) i **fakultatywne**, które tej mocy nie posiadają. Innym podziałem informacji może być ich podział na **jakościowe**, charakteryzujące opisowo określony obiekt techniczny (stan podzespołów, zespołów, a także procesy ich obsługi i użytkowania) oraz **ilościowe** - określające wielkość i charakterystykę informacji jakościowych.

Podstawowym przeznaczeniem systemu informacji eksploatacyjnych jest „obsługa informacyjna” kierownictwa eksploatacji i zaopatrzenia, producenta oraz placówek naukowo - badawczych.

Zakres gromadzonych danych implikuje postać i ilość nośników informacji pierwotnych. Zasób danych i organizacja przedsiębiorstwa narzuca sposób wypełniania nośników i ich weryfikacji. Badanie eksploatacyjne można określić jako ciąg czynności:

- gromadzenia informacji,
- przetwarzania informacji,
- wnioskowania i opracowywania wyników.

Będące dzisiaj w dyspozycji inżynierów, nowoczesne techniki przetwarzania informacji oraz komputerowego wnioskowania, np. (systemy ekspertowe) i automatycznego opracowywania wyników, przesadzają o tym, że skuteczność badań eksploatacyjnych zależy wyłącznie od poprawności gromadzenia informacji. Badanie eksploatacyjne jest maksymalnie skuteczne, gdy zbiór informacji pierwotnych jest maksymalnie użyteczny, czyli zgromadzone informacje są:

- kompletne (co do rodzajów),
- wiarygodne (w tym dokładne),
- w dostatecznej liczbie (w zakresie jednego rodzaju) odpowiadające potrzebom wnioskowania statystycznego.

Zrealizowanie warunku kompletności informacji pierwotnych jest możliwe, jeżeli wybór informacji pierwotnych został dokonany w oparciu o ściśle określony cel badania i założony model przedmiotu badania. Ponieważ przed badaniem często brak modelu, a cel badania określony jest ogólnie, należy liczyć się z małą efektywnością wyboru informacji eksploatacyjnych.

**Wiarygodność informacji** pierwotnych zależy od zastosowania metod ustalania treści informacji źródłowych (metoda identyfikacji zdarzeń) oraz metod weryfikacji treści informacji źródłowych już po zarejestrowaniu ich na nośnikach informacji, tj. od oczyszczania wyników badań odpowiednimi testami.

**Liczebność informacji** pierwotnych (źródłowych) w zakresie jednego rodzaju jest problemem istotnym ze względu na ograniczenia czasu badań i liczby badanych obiektów. Dlatego też typowym działaniem jest wykonywanie wyrywkowych badań eksploatacyjnych na próbkach o mniejszej liczności. Zawsze występuje jednak problem, że im mniejsza liczba wyników typu zwykle mniejsza wiarygodność oceny, ale i mniejsze koszty. Zwykle jest bowiem tak, że uzyskujemy coś za coś: mniejsza wiarygodność przy mniejszych kosztach pozyskania wyniku, lub większa wiarygodność przy wyższych kosztach na badania. Wybór zależy od konkretnej sytuacji, oraz od umiejętności oceny procesów losowych przez wykonującego badania. Zalecane jest tutaj korzystanie z nomogramu wg rozkładu Poissona. Przykład postępowania w tym względzie podano w skrypcie do ćwiczeń z eksploatacji [7].

### **Literatura podstawowa do rozdziału 3**

1. Adamkiewicz W. i inni : *Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym*. WKiŁ, Warszawa 1983
2. Adamkiewicz W. : *Wstęp do racjonalnego wykorzystania urządzeń technicznych*. WKiŁ, Warszawa 1982
3. Bojarski W. : *Wprowadzenie do oceny niezawodności działania obiektów technicznych*. PWN, Warszawa 1967
4. Fokin J. D. : *Niezawodność eksploatacyjna urządzeń technicznych*. MON, Warszawa 1973
5. Hebda M., Janicki D. : *Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji* WKiŁ, Warszawa 1977
6. Smalko Z. : *Podstawy projektowania niezawodnych maszyn i urządzeń mechanicznych*. PWN, Warszawa 1972
7. Słowiński B. : *Ćwiczenia z eksploatacji*. Wyd. WSIInż., Koszalin 1995



## 4. ELEMENTY TEORII I TECHNIKI NIEZAWODNOŚCI

Teoria niezawodności jest dyscypliną, której język oparty jest na dwóch dziedzinach matematyki: teorii prawdopodobieństwa i statystyce matematycznej. Powstała na przełomie lat 1940 - 1950 w celu oceny sprzętu elektronicznego i od tego czasu zainteresowanie nią obejmuje szersze kręgi specjalności. Konieczność stosowania takich metod wynika z samej istoty rozpatrywanego zagadnienia. Długości czasów pracy obiektów technicznych do ich uszkodzeń wykazują bowiem znaczny rozrzut. Nie ma możliwości dokładnego przewidzenia czasu pracy do uszkodzenia konkretnego obiektu. Można natomiast dla zbiorowości takich obiektów podać wystarczająco dokładne dane o udziale obiektów, które będą pracować bez uszkodzeń przez zadany przedział czasu.

### 4. 1. Miara jakości cech użytkowych

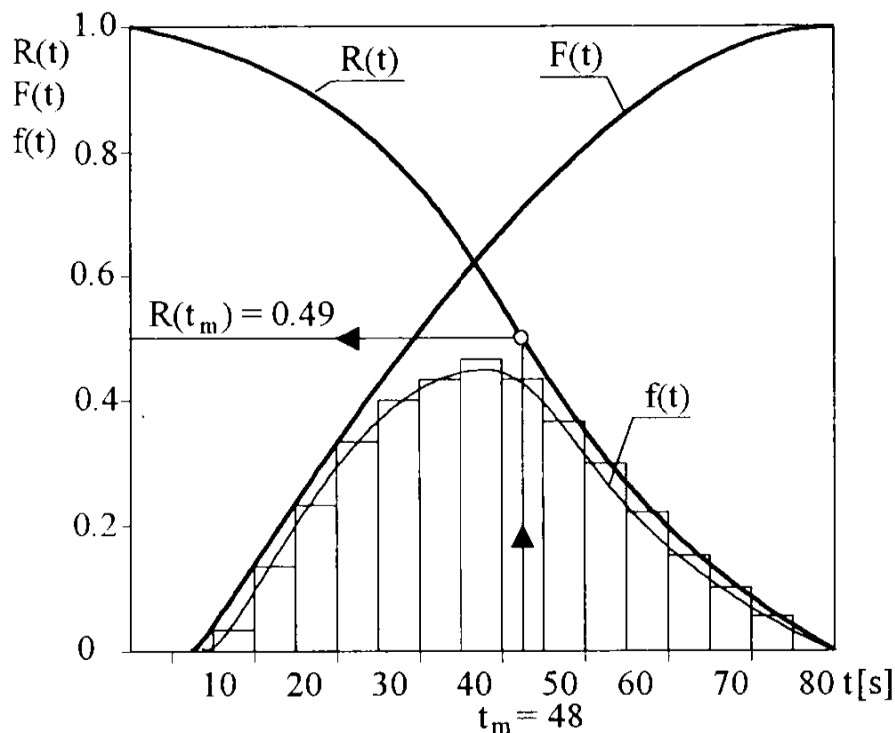
Wśród cech użytkowych najważniejszą jest **niezawodność**, podająca dla danej zbiorowości obiektów przewidywaną liczbę egzemplarzy, które będą pracować bez uszkodzeń przez zadany przedział czasu. Innymi słowy: niezawodność jest to szansa, że obiekt będzie działał sprawnie przez określony czas, lub czas bezawaryjnej pracy obiektu przy określonym prawdopodobieństwie.

**Miarą niezawodności** jest zatem prawdopodobieństwo bezusterkowej pracy określonego obiektu, w przyjętych warunkach eksploatacji i w danym czasie użytkowania, np. w okresie gwarancji.

Definicja niezawodności implikuje, że przy jej planowaniu muszą być spełnione poniższe wymagania:

1. Ilościowe określenie zawodności w postaci prawdopodobieństwa.
2. Wyraźne określenie, co rozumie się przez sprawne działanie obiektu.
3. Określenie warunków środowiskowych, w których ma nastąpić sprawne działanie obiektu.
4. Określenie wymaganego czasu sprawnego działania między uszkodzeniami (bez tego wyznaczona liczbowa wartość niezawodności traci sens w odniesieniu do obiektów przeznaczonych do dłuższej pracy)

Niezawodność jest więc funkcją  $R(x, t)$ , zależną od tzw. czynników wymuszających warunki eksploatacji  $x$  (np. parametry obróbki) i od czasu  $t$  użytkowania. Funkcja ta przybiera wartości nieujemne od zera do jedności - rys. 22.



Rys. 22. Przykładowy wykres przebiegu funkcji niezawodności  $R(t)$ , trwałości  $F(t)$ , gęstości prawdopodobieństwa  $f(t)$  dla ściernic ceramicznych należących do jednej partii

Powyższy rysunek obrazuje, ile w danej partii narzędzi jest takich, których trwałość jest większa od czasu  $t_m$  i takich, których trwałość jest mniejsza od  $t_m$ . Rozkład czasu pracy badanych ściernic w operacji szlifowania otworów może być opisany określonym typem rozkładu teoretycznego (w tym przypadku gamma), a niezawodność tej partii narzędzi wynosi 0.49. Oznacza to, iż można oczekiwać, że na 100 ściernic z tej partii 49 będzie miało okres trwałości dłuższy niż czas maszynowy tej operacji  $t_m = 48$  s.

Niezawodność może być wyznaczona dla elementów znajdujących się na różnym poziomie złożoności: części, podzespołów, zespołów, mechanizmów, układów lub całych urządzeń. Na każdym z tych poziomów mogą być stosowane te same charakterystyki niezawodności, powiązane ze sobą w określonych zależnościach.

Niech  $T$ , jako zmienna losowa, oznacza czas pracy bezawaryjnej elementu (jego okres trwałości). Rozkład tej zmiennej opisywany jest przez skumulowaną funkcję gęstości prawdopodobieństwa  $f(t)$  czyli dystrybuantę trwałości  $F(t)$ , jako prawdopodobieństwo powstania uszkodzenia do chwili  $t$ :

$$F(t) = P \{ T \leq t \} \quad (12)$$

Pochodna dystrybuanty  $F(t)$  jest funkcją gęstości zmiennej losowej  $T$ , czyli  $f(t)$ .

W praktyce częściej jednak korzysta się z dopełnienia do jedności dystrybuanty  $F(t)$ , która nazywana jest funkcją niezawodności  $R(t)$ ,

$$R(t) = 1 - F(t), \quad (13)$$

czyli:

$$R(t) = P \{T > t\}. \quad (13a)$$

Funkcja niezawodności opisuje prawdopodobieństwo  $P$  bezawaryjnej pracy elementu w okresie czasu  $t$ , tj. przypadek gdy  $T > t$ .

Prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektu w przedziale czasu  $(0, t)$  nazywane jest intensywnością uszkodzeń. Zależność intensywności uszkodzeń od czasu nazwano funkcją intensywności uszkodzeń  $\lambda(t)$ .

Można ją wyznaczyć ze stosunku poznanych już funkcji  $f(t)$  i  $R(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (14)$$

Funkcja  $\lambda(t)$  jest więc warunkowym prawdopodobieństwem powstania uszkodzenia w chwili  $t$  pod warunkiem, że do tej chwili element pracował bezawaryjnie.

Związek pomiędzy niezawodnością  $R(t)$  a intensywnością uszkodzeń  $\lambda$  jest następujący:

$$R(t) = R(t_0) \cdot \exp \left[ - \int_{t_0}^t \lambda(t) dt \right] \quad (15)$$

Interesujący jest tu przypadek, gdy  $\lambda(t) = \lambda = const.$ , wówczas związek ten wyrazi się wzorem:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (16)$$

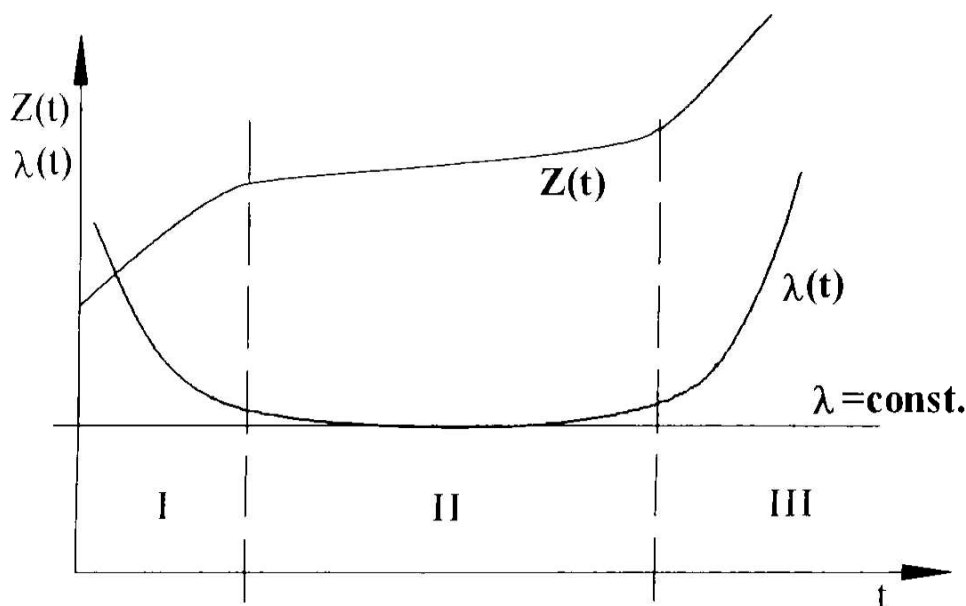
**Zależność ta opisuje wykładnicze prawo niezawodności - jedno z podstawowych praw w eksploatacji.**

Intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  i gęstość prawdopodobieństwa  $f(t)$  są do siebie bardzo zbliżone (podają bowiem informacje z przedziału  $dt$ ). Różnica pomiędzy intensywnością uszkodzeń  $\lambda(t)$  i gęstością rozkładu  $f(t)$  jest następująca: iloczyn

$f(t) \cdot dt$  charakteryzuje prawdopodobieństwo uszkodzenia po czasie  $(t; t+dt)$ , przy czym nie wiadomo, czy na początku tego przedziału obiekt badań był zdalny do eksploatacji, czy też nie.

Iloczyn  $\lambda(t) \cdot dt$  określa również prawdopodobieństwo uszkodzenia po czasie  $(t; t+dt)$ , ale przy założeniu, że na początku tego przedziału obiekt badań był zdalny do pracy. W ten sposób  $\lambda(t) \cdot dt$  przedstawia sobą wartość warunkowego prawdopodobieństwa uszkodzenia obiektu badań.

Funkcja intensywności uszkodzeń  $\lambda(t)$  może mieć różny przebieg w zależności od charakteru uszkodzeń. Najczęściej jednak ma tzw. postać krzywej „wannowej” - rys. 23.



Rys. 23. Przykładowy przebieg funkcji intensywności uszkodzeń

Można wyróżnić na niej trzy okresy, związane z określonymi postaciami uszkodzeń  $Z(t)$ . W pierwszym okresie (I) dominują uszkodzenia powstałe w wyniku wad produkcyjnych i niewłaściwej kontroli jakości a więc  $Z(t) \nearrow$  ale intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  maleje. Po pewnym czasie wady te zostają usunięte.

Z upływem czasu intensywność uszkodzeń maleje, aby w normalnym okresie użytkowania (II), przybrać wartość niemal stałą,  $Z(t) \approx const$ . W tym okresie uszkodzenia powstają przeważnie na skutek trudnych do przewidzenia czynników przypadkowych i noszą nazwę uszkodzeń nieoczekiwanych. Uszkodzenia nieoczekiwane podlegają zwykle wykładniczemu rozkładowi prawdopodobieństwa, którego charakterystycznym parametrem jest stała intensywność uszkodzenia ( $\lambda = const$ ).

W okresie końcowym (III) liczba uszkodzeń wydatnie wzrasta na skutek stopniowego zużywania się i starzenia elementów, tj.  $Z(t) \nearrow$  i tym samym intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  wyraźnie zwiększa się. Powstałe z tych przyczyn

uszkodzenia noszą nazwę uszkodzeń postępowych i są charakterystyczne dla obiektów o wysokiej jakości, jako naturalna konsekwencja procesów starzenia się.

Istotne dla danych rozważań jest to, że w przypadku przyjęcia stałości funkcji intensywności uszkodzeń,  $\lambda$  jest odwrotnością średniego czasu  $u$  między uszkodzeniami.

$$\lambda = \frac{1}{u}. \quad (17)$$

Kiedy iloczyn  $\lambda t \ll 1$  możemy przyjąć, że

$$R(t) = e^{-\lambda t} \cong 1 - \lambda t, \quad (18)$$

skąd

$$\lambda = \frac{1 - R(t)}{t}. \quad (19)$$

co ułatwia obliczenie  $\lambda$  gdy dane jest  $R(t)$  i odwrotnie. Z wzoru tego wynika również, że korzystnie jest gdy wartość  $\lambda$  jest mała, bo wówczas oznacza to, że przy stałym  $R(t)$  duży jest czas pracy  $t$ . W praktyce na ogół można posługiwać się tymi wzorami gdy wartość  $\lambda t \leq 0.1$ . Gdy więc np.  $t = 1000$  godz. wzory te można stosować przy wartości  $\lambda \leq 0.001$ .

Wartość  $\lambda$  określa jaka część obiektów sprawnych stanie się niesprawna w następnym jednostkowym okresie zmiennej  $t$ . Najczęściej  $\lambda$  podaje się w następujących jednostkach:

$$1/\text{godz.}, 1/10^6 \text{ godz.}, \%/1000 \text{ godz.}$$

przy czym

$$(1/10^6 \text{ godz.}) = 10^6(1/\text{godz.}) = 10(\%/1000 \text{ godz.})$$

W tabelicy 9 podano, dla orientacji, wartości  $\lambda$  elementów średniej i wysokiej jakości stosowane w normalnym sprzęcie profesjonalnym [6]. Największe wartości  $\lambda$  podane w tej tabelicy odnoszą się do nominalnych obciążeń elementów średniej klasy niezawodności oraz warunków pracy w klimatyzowanym pomieszczeniu o wilgotności względnej  $w = 40 \div 60\%$ , przy braku wstrząsów i wibracji. Wartości najmniejsze  $\lambda$  odnoszą się do produkowanych masowo elementów najwyższej klasy niezawodności, eksploatowanych w warunkach laboratoryjnych przy obciążeniach mniejszych od nominalnych, możliwie najkorzystniejszych ze względu na niezawodność.

Tabl. 9. Najmniejsze i średnie wartości  $\lambda$  niektórych elementów z produkcji masowej

Nazwa elementu	$\lambda$ (%/1000 godz.)
Lampy elektronowe odbiorcze	0.02 - 3
Lampy elektronowe nadawcze	0.3 - 6
Tranzystory germanowe	0.002 - 0.1
Tranzystory krzemowe	0.0006 - 0.04
Diody germanowe	0.0002 - 0.03
Diody krzemowe	0.0002 - 0.02
Oporniki węglowe objętościowe	0.0002 - 0.02
Oporniki warstwowe	0.004 - 0.2
Oporniki drutowe	0.002 - 0.2
Kondensatory ceramiczne	0.0002 - 0.006
Kondensatory tantalowe	0.0002 - 0.03
Kondensatory mikowe	0.0002 - 0.04
Kondensatory papierowe	0.0006 - 0.01
Kondensatory elektrolityczne aluminiowe	0.001 - 0.5
Cewki	0.0003 - 0.03
Dławiki	0.005 - 0.03
Transformatory	0.005 - 0.03
Potencjometry drutowe	0.05 - 0.2
Potencjometry węglowe	0.01 - 0.1
Podstawki lampowe	0.002 - 0.03 ( na 1 kontakt )
Złącza stykowe współosiowe	0.0001 - 0.0003
Gniazda wtykowe	0.0002 - 0.001 ( na 1 kontakt )
Zaciski	0.00003 - 0.00005
Przełączniki	0.001 - 0.5
Przełączniki wciskowe	0.005 - 0.05
Zestyki ruchome	0.02 - 0.05
Przekładniki	0.03 - 0.1
Połączenia lutowane	0.0002 - 0.004
Połączenia okrętkowe	0.0002 - 0.004
Przewody montażowe	0.0008 - 0.0015
Izolatory	0.003 - 0.005
Podkładki	0.00005 - 0.0001
Podkładki gumowe	0.001 - 0.002
Sprężyny	0.0004 - 0.01
Przekładnie zębate	0.0001 - 0.0002
Akumulatory	0.035 - 0.7
Baterie	0.5 - 3
Wentylatory	0.02 - 0.2
Silniki asynchroniczne	0.1 - 1
Żarówki	0.01 - 0.06
Lampy jarzeniowe	0.002 - 0.01

Średni czas użytkowania  $u$  jest zwykle wskaźnikiem trwałości. Jest on wartością oczekiwaną prawdopodobieństwa uszkodzeń, którą dla zmiennych losowych ciągłych określa wzór:

$$u = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt, \quad (20)$$

gdyż w czasie  $dt$  udział bezusterkowego czasu użytkowania obiektu wynosi  $dt$ .

Dla zmiennych losowych skokowych  $u$  jest po prostu średnią arytmetyczną wyników z próbki. W przypadku, gdy intensywność uszkodzeń jest stała, średnia  $u$  jest odwrotnością  $\lambda$ :

$$u = \frac{1}{\lambda}. \quad (21)$$

Dla obiektów podlegających regeneracji, np. narzędzia, średni czas użytkowania jest parametrem niewystarczającym do opisu tych obiektów, gdyż nie uwzględnia możliwości przywrócenia zdolności dalszego ich użytkowania. Cechą charakteryzującą tę możliwość jest **odnawialność** lub **naprawialność**, którą wraz z niezawodnością nazywa się **gotowością** obiektu do użytkowania. Gotowość  $G$  jest więc także miarą jakości cech użytkowych obiektu. Określenie gotowości obiektu wymaga znajomości średniego czasu przestoju  $v$  (czasu związanego z oczekiwaniem na naprawę), który wyraża się wzorem:

$$v = \frac{1}{m} = \sum_{i=1}^m v_i, \quad (22)$$

gdzie:

$m$  - liczba przestoju w dostatecznie długim czasie użytkowania,

$v_i$  - czas przestoju po  $i$ -tym uszkodzeniu.

Gotowość obiektu zwykle określa się za pomocą **wskaźnika gotowości**, który wyraża się wzorem:

$$G = \frac{u}{u+v}. \quad (23)$$

W przypadku obiektów nienaprawialnych,  $G$  przyjmuje wartość 1. Inną jeszcze z miar jakości użytkowania obiektu jest dogodność użytkowania. Dogodność użytkowania jest cechą, którą zajmuje się ergonomia. Miarą dogodności użytkowania może być umowny wskaźnik  $D_u$ , w zależności od stopnia spełnienia wymagań ergonomii, przy czym  $D_u = 1$  określa stan normalny i zadowalający.

Kolejną, inną jeszcze miarą jakości cech użytkowych obiektu jest bezpieczeństwo użytkowania. Bezpieczeństwo użytkowania i ochrona środowiska

człowieka są cechami krytycznymi, zatem niedotrzymanie wymagań dotyczących tych cech jest z zasady niedopuszczalne i od razu dyskwalifikuje obiekt pod względem jakości.

Ogólną miarę jakości cech użytkowych można zatem wyrazić wzorem:

$$A = \frac{1}{3}[R(t) + G + D_u], \quad (24)$$

gdzie:

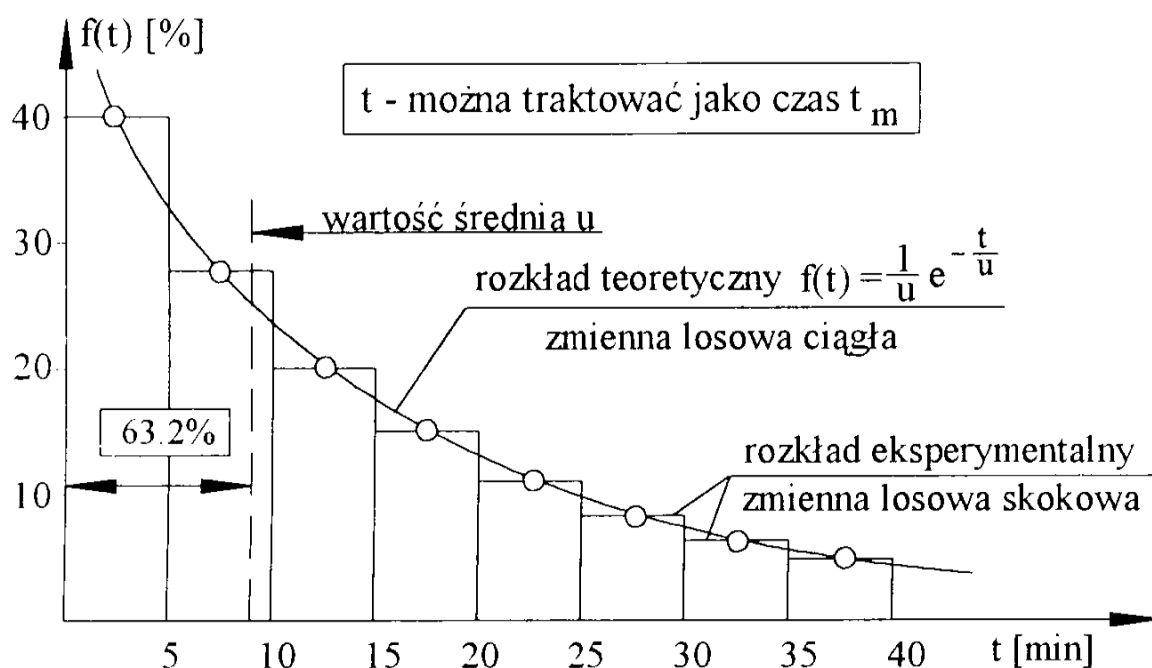
$R(t)$  - niezawodność obiektu w warunkach  $x$  eksploatacji,

$G$  - wskaźnik gotowości,

$D_u$  - wskaźnik dogodności użytkowania.

## 4. 2. Wykładnicze prawo niezawodności

Jeżeli dla rozpatrywanych obiektów można przyjąć, iż funkcja intensywności uszkodzeń przyjmuje stałą wartość i nie zależy od czasu  $t$  w całym przedziale  $(0, t)$ , tj., że  $\lambda(t) = \lambda = const.$ , to czas pracy obiektu między uszkodzeniami ma **rozkład wykładniczy** - rys. 23.



Rys. 23. Wykres przebiegu funkcji niezawodności dla rozkładu wykładniczego

Do obliczenia charakterystyk niezawodności wg rozkładu wykładniczego wystarczy tylko znajomość średniego czasu  $u$  między uszkodzeniami. Zgodnie bowiem ze wzorem (21), intensywność uszkodzeń  $\lambda$  jest odwrotnością średniego czasu między uszkodzeniami. Ponieważ nie jest to rozkład symetryczny, pomiędzy zerem a wartością średnią  $u$  znajduje się dominująca część zdarzeń (63.2%). Mniej zatem niż 40% zdarzeń jest w zakresie czasu  $t$  większego od wartości średniej  $u$ .



Dystrybuanta  $F(t)$  czasu ( $T$ ) poprawnej pracy obiektu w przedziale  $(0, t)$  liczona jest z zależności:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (25)$$

natomiast funkcja  $f(t)$  gęstość rozkładu dla  $t \geq 0$  liczona jest z zależności

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (26)$$

gdzie:  $\lambda$  - parametr rozkładu (intensywność uszkodzeń).

Korzystając z tego, że dystrybuanta  $F(t)$  jest dopełnieniem do jedności, to funkcja niezawodności  $R(t)$  wyraża się zależnością:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}. \quad (27)$$

Charakterystyczną cechą rozkładu wykładniczego jest więc to, że średni czas eksploatacji  $u$  grupy obiektów, określa czas, w którym 63% obiektów zostanie uszkodzonych, natomiast 37% będzie pracowało bez uszkodzeń.

**Przykład** wykorzystania rozkładu wykładniczego.

Dotychczasowe doświadczenia wykazują, że średni czas między uszkodzeniami telewizorów Neptun wynosi 36 miesięcy. Zakładając, że częstość uszkodzeń jest stała, można obliczyć, jaka jest szansa działania telewizora tej marki bez uszkodzenia w okresie gwarancyjnym - jednego roku:

$$R_{12} = e^{-t/u} = e^{-12/36} = 0.7165.$$

Tak więc szansa, że telewizor tej marki będzie działał bez uszkodzeń w okresie jednego roku, wynosi około 70%.

Chcąc zatem obliczyć niezawodność według prawa wykładniczego należałoby mieć dane liczbowe dotyczące intensywności uszkodzeń danych obiektów lub ich elementów (tabl. 5). Na przykład, wartość  $\lambda$  dla elementów elektronicznych, uzyskane w najkorzystniejszych warunkach eksploatacji wynoszą:

- lampy radiowe  $\lambda = 1\%$  na 1000 h,
- układy scalone  $\lambda = 0.01\%$  na 1000 h
- tranzystory . . .  $\lambda = 0.03\%$  na 1000 h

Intensywności uszkodzeń tych elementów, stosowanych w urządzeniach powszechnego użytku, są dziesiątki a nawet setki razy większe (tym większe,

im bardziej ciężkie są warunki ich użytkowania). W zależności od warunków eksploatacji,  $\lambda$  zwiększa się  $k$  razy czyli:

$$R(t) = \exp(-tk\lambda) \quad (28)$$

przy czym:

- w laboratorium klimatyzowanym  $k = 1$ ,
- w urządzeniach naziemnych  $k = 10$ ,
- na statku  $k = 20$ ,
- w samochodzie  $k = 30$ ,
- w pociągu  $k = 40$ ,
- w hali produkcyjnej  $k = 50$ ,
- w samolocie  $k = 100$ ,
- w rakiecie  $k = 1000$ .

Na przykład: dla lampy radiowej, pracującej w laboratorium klimatyzowanym ( $k = 1$ ) o intensywności uszkodzeń  $\lambda = 0.01\%$ , działającej przez  $t = 10$  tys. h, szansa działania bez uszkodzenia (jej niezawodność) wynosi:

$$R_t = e^{-\frac{0,0001 \cdot 1 \cdot 10000}{1000}} = 0.999,$$

a tej samej lampy użytkowanej w hali produkcyjnej ( $k = 50$ ):

$$R_t = e^{-\frac{0,0001}{1000} \cdot 50 \cdot 10000} = 0.95.$$

### 4. 3. Metodyka wyznaczania niezawodności

W życiu codziennym wszyscy uważamy, że obiekt techniczny (maszyna, urządzenie, narzędzie itp.) winien służyć przez dostatecznie długi czas. Potencjalny użytkownik określonego obiektu przed jego zakupem upewnia się, drogą wywiadu u różnych źródeł (zwykle posiadczy takich obiektów), jak zachowują się one w eksploatacji (jaki jest ich okres poprawnej pracy, czyli okres trwałości  $T$ ). Przed zakupem dokonuje więc pewnego szacowania, (przewidywania, prognozy) dotyczącego niezawodnego okresu pracy tego obiektu.

Nie ma chyba bardziej ryzykownego zajęcia niż formułowanie prognoz w różnych dziedzinach życia mimo, że właśnie prognozy są podstawą prawie całej celowej działalności człowieka. Od zarania bowiem dziejów próbowano przewidzieć, co się zdarzy w przyszłości. Wykorzystywano do tego celu układy gwiazd, wnętrzości zwierząt, fusy od kawy czy też stosy liczb statystycznych.

Przewidywanie mające podstawy naukowe może być jedynie oparte na tej ostatniej przesłance i to właśnie stanowi punkt wyjścia do dalszych naszych rozważań. Wynik określonego badania statystycznego jest więc podstawą postawienia określonej hipotezy dotyczącej prawdopodobieństwa zaistnienia pewnej prawidłowości zjawiska masowego. Prawidłowość statystyczna - to jednak nie 100% pewność, że tak się zdarzy na pewno. Wyznaczone bowiem prawo jest prawem II rodzaju, tzn. obarczone jest określonym ryzykiem popełnienia błędu (określonym, ale nie przypadkowym!). W technice ryzyko to przyjmuje się najczęściej na poziomie  $\alpha = 0,01$  lub  $0,05$ ).

Prognozowanie zatem w każdym przypadku obarczone jest ryzykiem popełnienia błędu. Ryzyko to wynika z tego, że formułuje się hipotezy dotyczące zachowań się obiektu w przyszłości, na podstawie określonych założeń (przesłanek) np. istnienia zapotrzebowania na obiekty o danych cechach. Zmieni się założenie i zmianie ulegnie to co zostało na nim zbudowane. Pewność prognozy jest jednak tym większa im krótsza jest perspektywa czasowa ( $t_m$ ), której dotyczy prognoza.

W działalności przemysłowej aby posiadać pewne informacje pozwalające postawić założenie dotyczące zachowania się obiektów w przyszłości przeprowadza się więc określone badania statystyczne. Diagnozuje się grupę obiektów danego typu (próbkę o licznosci  $n$ ) i na podstawie uzyskanych wyników przewiduje okres trwałości całej populacji tych obiektów. Należy tu zaznaczyć, że taki sposób działania ma swoje reguły myślenia i odpowiednie **techniki postępowania**.

Każde badanie niezawodności musi być poprzedzone specjalnie do niego zbudowanym programem, ściśle związanym z celem badaniem. Program taki określa optymalny zakres badań i trafność wyników.

Mimo, że każdy program badań jest inny, wszystkie przechodzą przez pewną stałą ścieżkę podzieloną na odcinki, które odzwierciedlają sekwencje działań. Początek ścieżki - to **sformułowanie problemu i określenie celu badania**, co wbrew pozorom nie jest najłatwiejsze. Naturalne podejście, jakie przyjmujemy wobec badania jakiegokolwiek zjawiska, wynika z zakładanego - świadomie lub nieświadomie - celu badania. Innymi słowy, to do czego chcemy wykorzystać wnioski, determinuje jakie wybieramy podejście. Kiedy tego dokonamy, jesteśmy gotowi przewidywać prawdopodobne rozwiązanie, czyli **sformułować hipotezy badawcze**. Przewidując rozwój obserwowanego zjawiska i najważniejsze związki między jego elementami, stwarzamy przesłanki **wyboru źródeł informacji** i określenia sposobu ich gromadzenia.

Kolejnym etapem, zmusnym i odpowiedzialnym jest **przetwarzanie danych**. Dzisiaj stosujemy do tego celu elektroniczną technikę obliczeniową.

Szczególną uwagą przy tym należy zwrócić na poprawność programów komputerowych i prawidłowość wczytywania danych.

Kiedy już dysponujemy odpowiednim zestawem danych, często wymaga on **porządkowania i redukcji**. Zwykle bowiem, z punktu widzenia naszych potrzeb, część informacji jest nieistotna. Możemy teraz dokonać **analizy danych** (jakościowej lub ilościowej, albo jednej lub drugiej). W tym celu stosujemy zwykle odpowiednie metody analizy statystycznej.

Informacje te wymagają **interpretacji**. Aby była ona poprawna, korzystamy z dodatkowych metod, mianowicie: posługujemy się analogią, stosujemy syntezę i dalszą analizę, a także dedukcje i indukcje. Pozostaje jeszcze tylko **prezentacja** wyników badania. Formy prezentacji wyników badań są zwykle bogate, przybierają postać graficzną i tabelaryczną - tylko wspomaganą opisem słownym. Dobrane właściwie formy prezentacji mogą się przyczynić do wyeksponowania użyteczności wyników badań, do zjednania przychylności decydentów, dla prezentowania wniosków, uzasadnienia kosztów ponoszonych na badania oraz do wdrożenia uzyskanych wyników.

Punktem wyjściowym do badań niezawodności jest zwykle niezgodność rzeczywistego okresu trwałości  $T$  obiektu z założonym dla niego czasem oczekiwanej pracy  $t$ , przy czym często akcent przesuwają się z poznania tego, jaką trwałość ma dany obiekt na to, jaki obiekt ma daną trwałość.

Ogólnie rzecz biorąc mogą zaistnieć trzy przypadki:

1. Kiedy okres trwałości  $T$  jest większy od założonego czasu  $t_m$  ( $T > t_m$ ).
2. Kiedy okres trwałości  $T$  odpowiada dokładnie tej wartości ( $T = t_m$ ).
3. Kiedy okres trwałości jest mniejszy od założonego czasu  $T_m$  ( $T < t_m$ ).

Przypadek 3 jest niedopuszczalny. Obiekt pracował krócej niż przewidywano, a więc zawiódł nas. Taki przypadek wskazuje na potrzebę dalszej pracy nad udoskonaleniem obiektu lub użytkowaniem go w bardziej złagodzonych warunkach obciążeniowych.

Przypadek 1 jest pożądanym stanem obiektu, chociaż ze względów komercyjnych prowadzi do pewnego regresu produkcyjnego (zmniejszenia globalnego zapotrzebowania na dany obiekt).

Najkorzystniejszym jest przypadek 2. Obiekt był przydatny dokładnie tyle ile miał być, tj. okres trwałości  $T$  ma wartość optymalną  $T = T_o$ . Z uwagi jednak na nieuniknioną losowość warunków pracy, celowe jest rozpatrywanie łączne punktu 1. oraz 2., czyli nierówności  $T \geq t_m$ .

Wyczerpującą charakterystyką prawidłowości statystycznej zmiennej losowej  $T$  jest jej rozkład teoretyczny (model zjawiska masowego), który ustala

związek między możliwymi wartościami tej zmiennej i odpowiadającymi im prawdopodobieństwami  $P$ .

Prawidłowość ta może być dana w postaci funkcji rozkładu, nazwanej dystrybuantą zmiennej losowej, która przedstawia skumulowane wartości prawdopodobieństwa zdarzenia polegającego na tym, że okres trwałości  $T$  przyjmuje wartość mniejszą od oczekiwanej (prognozowanej) wartości  $t_m$ ,  $F(t_m) = P(T \leq t_m)$ . Innymi słowami, jeżeli kolejno przyjmie się dowolne wartości  $t_m$ , to zdarzenie  $T \leq t_m$  oznacza uszkodzenie obiektu w czasie krótszym od prognozowanego czasu  $t_m$ . Im dłuższy jest ten czas, tym większe jest prawdopodobieństwo wystąpienia takiego uszkodzenia, a więc dystrybuanta opisująca zawodność badanych obiektów jest funkcją niemalejącą. Dla początkowego okresu pracy obiektu ( $t = 0$ ), wartość  $F(t_m)$  jest równa zero, a dla  $t_m \rightarrow \infty$ , dystrybuanta ta dąży do jedności.

Ponieważ niezawodność  $R(t)$  jest alternatywnym zdarzeniem w stosunku do zawodności opisywanej dystrybuantą  $F(t)$ ,  $F(t) + R(t) = 1$ , to może być ona wyliczona z powyższego równania, a funkcja ta jest monotonicznie malejąca od wartości 1 dla czasu  $t = 0$ , do wartości 0 dla nieskończoności.

Trwałość i niezawodność - są to jedne z najważniejszych kryteriów jakości użytkowej obiektu, odgrywające istotną rolę w jego eksploatacji. Trwałość obiektu jest jego zdolnością (całego elementu i poszczególnych jego elementów) do zachowania w czasie wymaganych właściwości, umożliwiających jego prawidłowe użytkowanie w określonych warunkach. Definicję powyższą opieramy na założeniu, że pewne właściwości tego obiektu ulegają w miarę upływu czasu  $t$  określonym zmianom o zdeterminowanym, zwykle monotonicznym charakterze i po pewnym czasie mogą osiągnąć założoną wcześniej graniczną (dopuszczalną) wartość zużycia.

Czas odpowiadający osiągnięciu określonej wartości tego zużycia (uszkodzenia) nazywamy okresem trwałości użytkowej obiektu lub krótko: trwałością  $T$  obiektu.

Znając okresy trwałości  $T$  (czasy do momentu osiągnięcia zdefiniowanego wcześniej uszkodzenia) pewnej liczby obiektów możemy wyznaczyć funkcję gęstości prawdopodobieństwa tych uszkodzeń - rozkład trwałości  $f(T)$ . Kumulując wartości prawdopodobieństw z poszczególnych przedziałów tego rozkładu, możemy otrzymać skumulowany rozkład uszkodzeń, czyli dystrybuantę trwałości  $F(T)$  tych obiektów. Otrzymana krzywa jest monotoniczną krzywą rosnącą w funkcji czasu  $t$ , i (zgodnie z założeniem o operowaniu prawdopodobieństwami) mieści się w zakresie od 0 do 1. Oznacza to, że wszystkie obiekty (niezależnie od tego, jakie by to były) mają skończoną

trwałość, a więc zawsze nadejdzie taki moment, w którym wszystkie ulegną uszkodzeniu - nastąpi ich „śmierć” techniczna. Zatem dystrybuanta trwałości jest niczym innym, jak tylko obrazem tych momentów „śmierci” technicznej obiektów, czyli jest obrazem chwil, w których przestaną one spełniać nałożone nań funkcje - zawiodą nas. Dystrybuanta trwałości  $F(T)$  jest więc dystrybuantą zawodności. Równocześnie funkcja niezawodności  $R$  i funkcja zawodności  $F$  ujmują całość wszystkich możliwych (alternatywnych) zdarzeń („A” lub „B”) obiektu, czyli:

$$R(T) + F(T) = 1 \quad (28)$$

Stąd możemy wyznaczyć wartość  $R$  - (jako jednej z alternatyw):

$$R(T) = 1 - F(T) \quad (29)$$

Chcąc mieć szacunek prawdopodobieństwa czasu „życia” obiektów należy znać przebiegi następujących funkcji, będących miarami niezawodności:  $f(t)$ ,  $F(t)$ ,  $R(t)$ , gdzie: przy czym:  $t$  - oznacza czas bieżący „życia” obiektów.

$$f(t) = \frac{\text{liczba obiektów uszkodzonych w jednostce czasu w czasie } t}{\text{liczba obiektów w czasie } t=0}$$

$$F(t) = \frac{\text{skumulowana liczba uszkodzeń do czasu } t}{\text{liczba obiektów w czasie } t=0}$$

$$R(t) = \frac{\text{liczba obiektów funkcjonujących w czasie } t}{\text{liczba obiektów w czasie } t=0}$$

Często, jako miarę niezawodności, stosuje się również funkcję  $\lambda=f(t)$ :

$$\lambda(t) = \frac{\text{liczba obiektów uszkodzonych w jednostce czasu w czasie } t}{\text{liczba obiektów funkcjonujących w czasie } t}$$

Aby więc określić niezawodność obiektu należy:

1. Wybrać próbkę losową z pewnej populacji obiektów.
2. Przeprowadzić badanie trwałości obiektów z tej próbki.
3. Przeszacować wyniki z próbki na populację.
4. Wyznaczyć funkcję gęstości prawdopodobieństwa  $f(T)$ .
5. Wyznaczyć dystrybuantę trwałości  $F(T)$ .
6. Obliczyć niezawodność  $R(T)$  badanych obiektów.

Rozumowanie oparte na metodach probabilistycznych (statystycznych) przyjmujemy nie jako dowodowe, lecz jako wiarygodne (prawdopodobne).

Opiera się bowiem ono na obserwacji ograniczonej liczby doświadczeń i dlatego jest wprawdzie genialnym (skrótom pozyskiwania informacji), ale tylko domysłem [1]. Do dokonania oceny wymaga więc badania nie jednego obiektu ale pewnej większej ich ilości - próbki. Nie umożliwia tym samym wydania sądu dotyczącego pewności działania jednego konkretnego obiektu ale jedynie wyznaczenie pewnego szacunku, dotyczącego trendu zachowania się w czasie wszystkich obiektów tego typu (populacji). W zagadnieniach niezawodności stosujemy więc rachunek prawdopodobieństwa, który bada zjawiska przypadkowe o charakterze masowym, odznaczające się stabilnością statyczną. Oznacza to, że dany eksperyment może być powtórzony wielokrotnie i występuje w nim równowaga statystyczna, która odzwierciedla prawidłowości zjawisk masowych.

Takie postępowanie wymaga techniki i umiejętności przeprowadzenia badania statystycznego określonej liczby obiektów (próbki), opracowania wyników takiego badania i przeszacowania (estymowania) tych wyników na populację, jako prawdopodobieństwa zachowania się wszystkich obiektów należących do danego zbioru. Uzyskuje się w ten sposób pewną wiarygodność danych, na podstawie której można wyznaczyć prognozę trwałości takich obiektów. Prognoza ta, jak zresztą każda prognoza, jest obciążona pewnym ryzykiem. Jest to jednak ryzyko skalkulowane. W działaniach inżynierskich zakładamy maksymalne ryzyko (niepewność wyniku) na poziomie  $\alpha = 0,01$  lub  $0,05$ .

W celu zilustrowania kilku z popularniejszych sposobów mierzenia niezawodności w tabelicy 10 zawarto dane o tym, ile ze zbadanych 150 wyłączników prądowych nadal funkcjonuje w kolejnych 30 jednostkach czasu. Warto podkreślić, że w rzeczywistości zbadano większą liczbę wyrobów, żeby otrzymać bardziej wiarygodne rezultaty [9].

Wszystkie pomiary niezawodności są zależne od czasu  $t$  (w tabl. 10 czas ten obrazuje kolumna 1), przy czym może być on analizowany w różnych jednostkach (s, min, h, tygodnie, itp.). Załóżmy, że interesują nas miary opisujące niezawodność badanych obiektów w czasie  $t = 11$ . W tabelicy 10 można sprawdzić, że w przedziale czasu  $10 \div 11$  na początku funkcjonowało 60 obiektów, a na końcu przedziału 57.

Tabl. 10. Przedziały funkcjonowania dla 150 wyłączników

Przedział czasu (jednostki czasu)	Liczba funkcjonujących wyłączników na początku danego przedziału czasu (sztuki)
0 - 1	150
1 - 2	123
2 - 3	109
3 - 4	99
4 - 5	91
5 - 6	84
6 - 7	78
7 - 8	74
8 - 9	69
9 - 10	65
10 - 11	60
11 - 12	57
12 - 13	54
13 - 14	51
14 - 15	49
15 - 16	47
16 - 17	44
17 - 18	42
18 - 19	40
19 - 20	38
20 - 21	35
21 - 22	32
22 - 23	29
23 - 24	26
24 - 25	24
25 - 26	22
26 - 27	20
27 - 28	17
28 - 29	15
29 - 30	13



Liczba obiektów funkcjonujących w czasie $t=0$	$Q_0 = 150.$
Liczba obiektów funkcjonujących w czasie $t=10$	$Q_{t-1} = 60.$
Liczba obiektów funkcjonujących w czasie $t=11$	$Q_t = 57.$
Liczba uszkodzeń w czasie $t=11$	$Q_{t-1} - Q_t = 3.$
Skumulowana liczba uszkodzeń w czasie $t=11$	$Q_0 - Q_t = 93,$

stąd w czasie  $t$  (zgodnie z przedstawionymi wcześniej zależnościami):

– funkcja niezawodności

$$R(11) = \frac{Q_t}{Q_0} = \frac{57}{150} = 0.38$$

– skumulowany rozkład uszkodzeń (funkcja zawodności)

$$F(11) = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0} = \frac{150 - 57}{150} = \frac{93}{150} = 0.620$$

lub  $F(11) = 1 - 0,380 = 0,620$

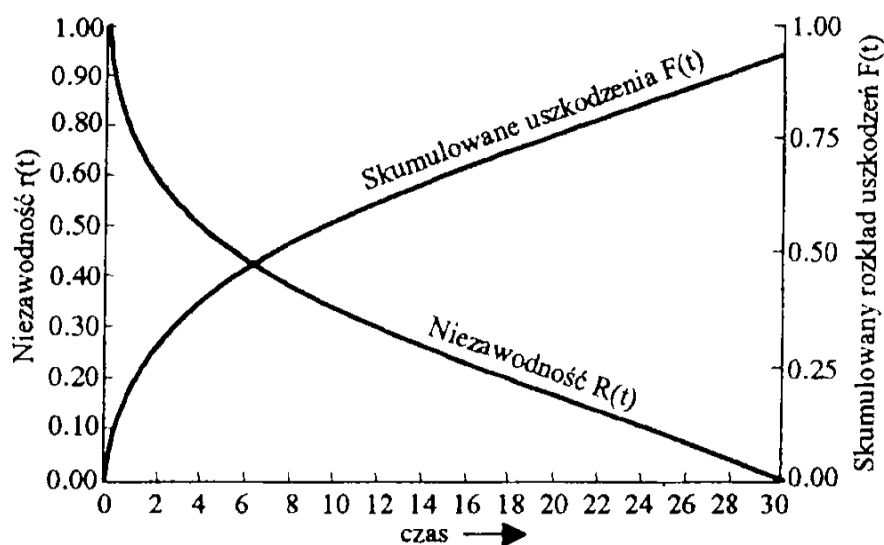
– gęstość prawdopodobieństwa uszkodzeń

$$f(11) = \frac{Q_{t-1} - Q_t}{Q_0} = \frac{60 - 57}{150} = \frac{3}{150} = 0.02$$

– intensywność uszkodzeń

$$\lambda(11) = \frac{Q_{t-1} - Q_t}{Q_t} = \frac{60 - 57}{57} = \frac{3}{57} = 0.053$$

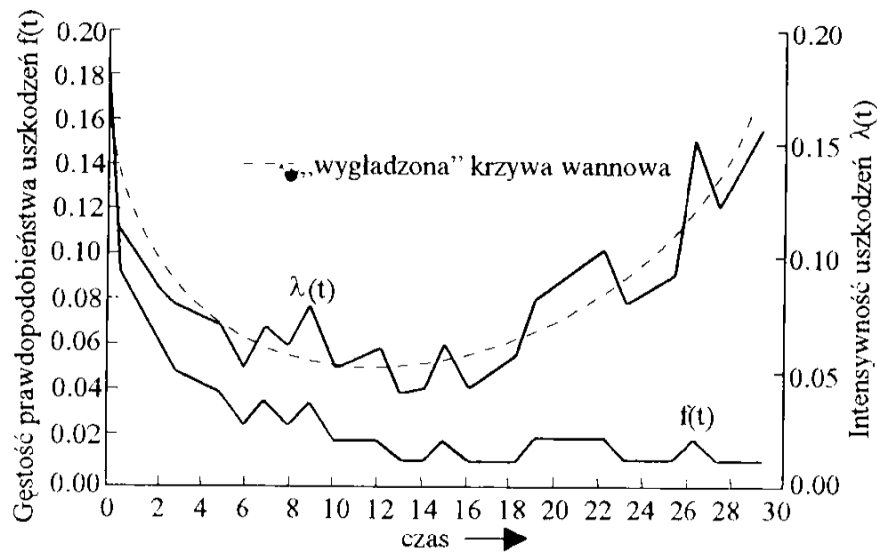
Wartości te dla poszczególnych okresów czasu zestawiono w tabl. 11, na podstawie której opracowano graficzne obrazy tych funkcji - rys. 24 oraz rys. 25.



Rys. 24. Wykresy niezawodności  $R(t)$  oraz trwałości  $F(t)$

Tabl. 11. Wyniki obliczeń miar niezawodności dla 150 wyłączników

Czas, który upłynął od rozpoczęcia funkcjonowania wyłączników	Liczba wyłączników funkcjonujących w czasie t	Liczba wyłącz. pomiędzy przedziałem (t, t+1)	Niezawodność $R(t)$	Skumulowany rozkład uszkodzeń $F(t)$	Gęstość prawdopodobieństwa uszkodzenia $f(t)$	Intensywność uszkodzeń $\lambda(t)$
0	150	27	1.000	0.000	0.180	0.180
1	123	14	0.820	0.180	0.093	0.114
2	109	10	0.727	0.273	0.067	0.092
3	99	8	0.660	0.340	0.053	0.081
4	91	7	0.607	0.393	0.047	0.077
5	84	6	0.560	0.440	0.040	0.071
6	78	4	0.520	0.480	0.027	0.051
7	74	5	0.493	0.507	0.033	0.068
8	69	4	0.460	0.640	0.027	0.058
9	65	5	0.733	0.567	0.033	0.077
10	60	3	0.400	0.600	0.020	0.050
11	57	3	0.380	0.620	0.020	0.053
12	54	3	0.360	0.640	0.020	0.056
13	51	2	0.340	0.660	0.020	0.039
14	49	2	0.327	0.673	0.013	0.041
15	47	3	0.313	0.687	0.013	0.064
16	44	2	0.293	0.707	0.020	0.045
17	42	2	0.280	0.720	0.013	0.048
18	40	2	0.267	0.733	0.013	0.050
19	38	3	0.253	0.747	0.013	0.079
20	35	3	0.233	0.767	0.020	0.086
21	32	3	0.213	0.787	0.020	0.094
22	29	3	0.193	0.807	0.020	0.103
23	26	2	0.173	0.827	0.013	0.083
24	24	2	0.160	0.840	0.013	0.083
25	22	2	0.147	0.853	0.013	0.091
26	20	2	0.133	0.867	0.013	0.150
27	17	2	0.113	0.887	0.020	0.118
28	15	2	0.100	0.900	0.013	0.133
29	13	2	0.087	0.913	0.013	0.154
30	11	-	0.073	0.927	-	-



Rys. 25. Wykresy gęstości prawdopodobieństwa  $f(t)$  i intensywności uszkodzeń  $\lambda(t)$

#### 4. 4. Niezawodność a struktura obiektu

W dotychczasowych rozważaniach obiekt był umownie traktowany jako całość. Jeżeli interesują nas jednak związki pomiędzy niezawodnością obiektu a niezawodnością jego elementów składowych, to należy dokonać analizy niezawodności struktury obiektu. Celem takiej analizy jest uzyskanie jednoznacznego odwzorowania, umożliwiającego ocenę wpływu każdego węzła konstrukcyjnego (układu, zespołu elementu) na możliwości realizacji zadania przez obiekt.

Wymaga to między innymi:

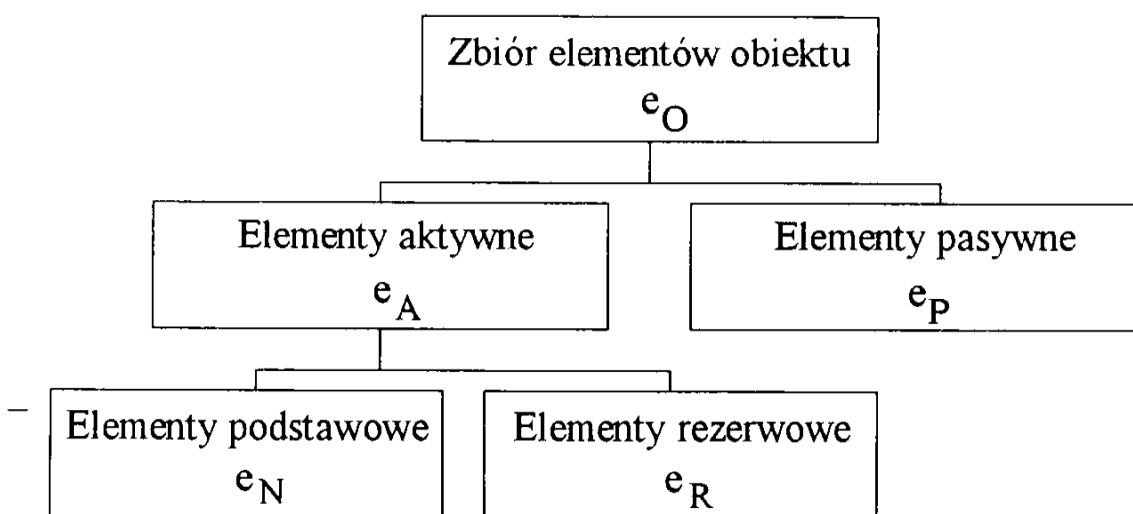
- określenia elementów składowych obiektu,
- oceny realizacji zachodzących między elementami,
- opracowania zasad odwzorowania struktury obiektu.

Wyodrębnienie elementów w obiekcie dokonuje się w procesie dekompozycji. W celu rozpatrzenia określonego obiektu, np. samochodu, rozpatruje się kolejno poszczególne jego części takie jak: silnik, układ jezdny itp., które przy analizie całego obiektu traktuje się jako elementy niepodzielne i dla nich określa się niezawodność (p. tabl. 8). Na szczeblu szczególności badania o jeden stopień wyższy, traktuje się te elementy jako określone obiekty, które z kolei dzieli się na prostsze elementy rozpatrywane jako niepodzielne elementy i tak dalej, aż do takiego poziomu szczególności, który zadawała odbierającego wyniki badania. Zgodnie z rygiem funkcjonalności, przynależność elementu do obiektu uwarunkowana jest jego działaniem w spełnianiu funkcji w tym obiekcie.

Z punktu widzenia celu badania, istotne jest rozróżnienie następujących rodzajów funkcji:

- podstawowe,
- rezerwowe,
- podrzędne (pasywne).

Rozróżnianie tych funkcji wprowadza podział zbioru elementów na określone grupy - rys 26.



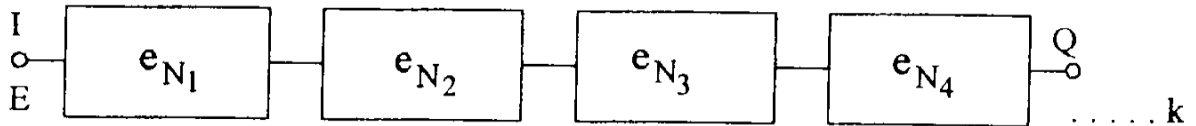
Rys. 26. Podział zbioru elementów układu

Wyróżnienie takich elementów stwarza potrzebę szczegółowej analizy logicznej obiektu pod kątem wpływu rozpatrywanego elementu na możliwość realizacji zadania przez obiekt. Analizę taką przeprowadza się w oparciu o informacje zawarte w dokumentacji technicznej.

Przed ustaleniem reguł odwzorowania należy zauważyć, że w złożonych obiektach mechanicznych występują układy, zespoły, podzespoły, elementy powtarzalne (np. w silniku: tłoki, korbowody, łożyska, śruby, nakrętki itp.) Są to elementy równoważne strukturalnie - wykonane wg tej samej dokumentacji technicznej. Można przyjąć, że zbiór elementów strukturalnie równoważnych, realizujących to samo zadanie, stanowi jeden rodzaj elementu. Graficznymi obrazami takich elementów są zależności koniunkcyjno - równoległe.

- W celu uproszczenia zapisu graficznego struktury obiektu dogodnie jest przyjąć następujące założenia:
- każdy element obiektu (wał korbowy, łożysko itp.) przedstawia się w postaci pojedynczego bloku (prostokąta),

- elementom powtarzalnym - równoważnym np. (łożyska, wałki, śruby itp.) przyporządkowuje się również jeden blok, nie uwzględniając ich wielokrotnego występowania w obiekcie. Elementy, które spełniają funkcję podstawową przy realizacji danego zadania, przedstawia się w postaci sprzężenia szeregowego - rys. 27.



Rys. 27. Poglądowy schemat szeregowej struktury obiektu

Niezawodność obiektu o strukturze szeregowej wyraża się iloczynem  $k$  elementów, z których składa się ten obiekt, czyli:

$$R(t_e) = R_1(t_{e1}) \cdot R_2(t_{e2}) \cdot R_3(t_{e3}) \cdot \dots \cdot R_k(t_{ek}). \quad (30)$$

Jest to **prawo iloczynu** - opisujące niezawodność obiektu składającego się z elementów tworzących jedną linię działania.

To twierdzenie o mnożeniu niezawodności opiera się na założeniu, że:

1. uszkodzenie dowolnego elementu powoduje uszkodzenie całego obiektu,
2. niezawodności poszczególnych elementów są od siebie niezależne.

Ilustracją takiej szeregowej struktury obiektu może być np. komplet lampek choinkowych, składający się z  $n$  jednakowych elementów. Niezawodność takiego układu wynosi

$$R = R_e^n. \quad (30a)$$

**Przykład:** poszczególne zespoły pewnego układu radiokomunikacyjnego, pracujące w czasie  $t = 4$  godz. miały niezawodności:

- odbiornik  $R(4) = 0.970$ ,
- układ sterowania  $R(4) = 0.989$ ,
- układ zasilania  $R(4) = 0.995$ ,
- antena  $R(4) = 0.996$ .

Szansa, że układ będzie prawidłowo działał w ciągu 4 godz. wynosi

$$R(4) = 0.970 \cdot 0.989 \cdot 0.995 \cdot 0.996 = 0.951$$

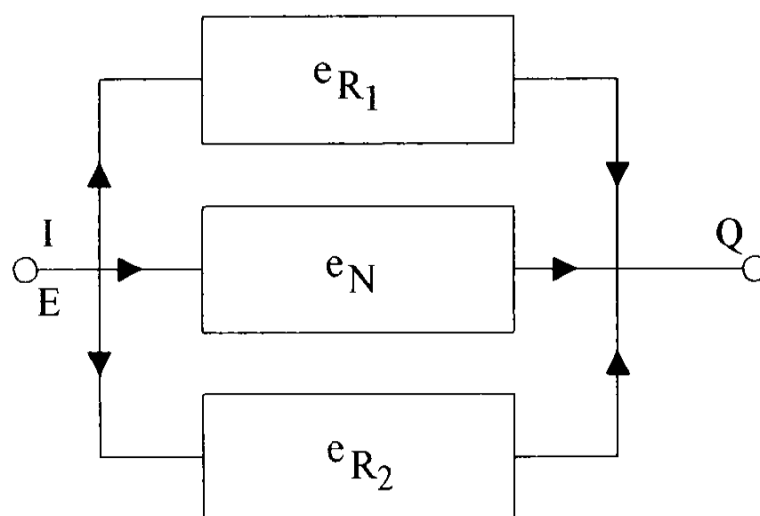
W przypadku, gdy czas pracy jest jednakowy dla wszystkich zespołów, zależność (30) można napisać w postaci:

$$R_k(t) = e^{-t \sum \lambda \cdot k}. \quad (31)$$

Wobec powyższego, jeśli intensywność uszkodzeń elementów podstawowych jest stała, to można postawić prognozę niezawodności dla całego obiektu, wykorzystując wykładniczy rozkład niezawodności.

Oprócz elementów obiektu tworzących jedną linię działania (szereg), znajdują się w nim inne elementy, zabezpieczające pracę elementów podstawowych. Są to elementy rezerwowe.

Elementy rezerwowe, nie biorące bezpośrednio udziału w realizacji danego zadania, przedstawia się w postaci **sprzężenia równoległego** - rys. 28.



Rys. 28. Poglądowy schemat struktury równoległej obiektu

Sprzężenie równoległe (alternatywne) charakteryzuje się tym, że w celu realizacji zadania przez obiekt, np. samolot, konieczne jest prawidłowe działanie tylko jednego elementu (jednego silnika  $e_N$ ). Pozostałe elementy (silniki:  $e_{R1}$ ,  $e_{R2}$ ) stanowią rezerwę obiektu i wchodzi do pracy w przypadku uszkodzenia elementu podstawowego. Obiekt przestanie działać, jeśli zawiodą wszystkie jego elementy składowe ( $e_N$ ,  $e_{R1}$ ,  $e_{R2}$ ).

Niezawodność obiektu z elementami w układzie równoległym wyrazi się zależnością:

$$R_k(t) = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_k), \quad (31)$$

bądź dla przypadku identycznych elementów:

$$R_k(t) = 1 - (1 - R_1)^k, \quad (31a)$$

gdzie:  $k$  - liczba elementów obiektu

Jest to **prawo rezerwy**. Niezawodność takiego obiektu zwiększa się, gdy liczba elementów  $k$  zwiększa się, np. Gdy zamiast jednego elementu

o niezawodności 0.99, zastosujemy trzy wzajemnie zastępujące siebie elementy, niezawodność obiektu zwiększy się do wartości:

$$R_3 = 1 - (1 - 0.99)^3 = 0.999999.$$

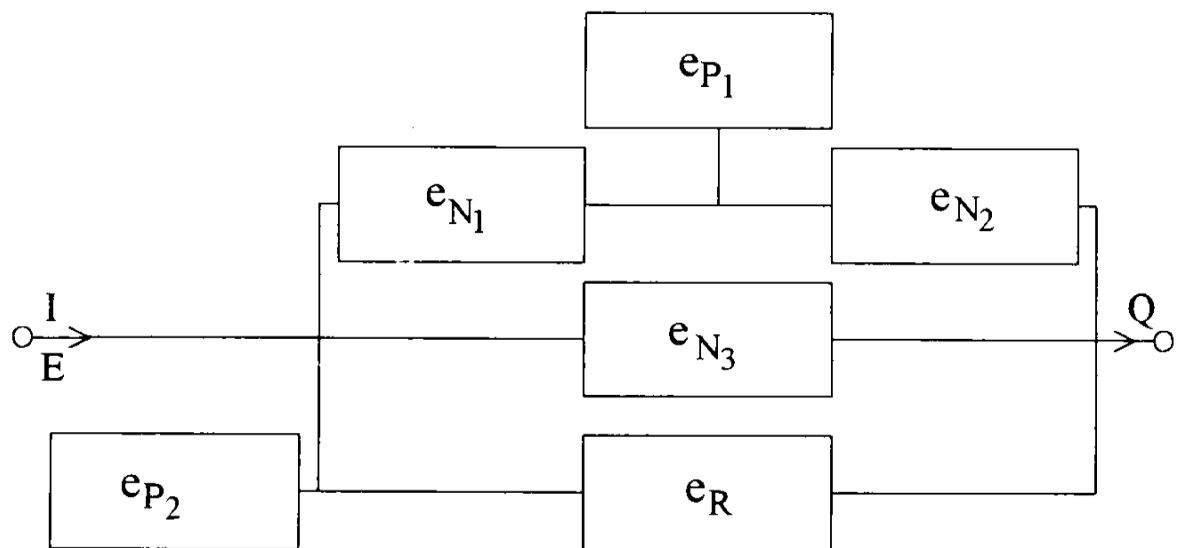
Jeżeli zatem elementy o niezawodności  $R_e = 0.99$  zawodzą, wykonując swoje zadanie w stosunku 1 na 100, to obiekt w postaci trzech wzajemnie zastępujących się elementów o niezawodności  $R_e = 0.99$ , wykonując to samo zadanie zawiedzie prawdopodobnie w stosunku jeden na milion.

Elementy, które spełniają funkcję podrzędną (pasywną) przy realizacji rozpatrywanego zadania obiektu przedstawia się w odwzorowaniu graficznym w postaci połączeń tzw. pośrednich. Połączenie pośrednie charakteryzuje się tym, że dla osiągnięcia i utrzymania wymaganego poziomu takich cech określających jakość użytkową, jak:

- dogodność użytkowania,
- dogodność obsługiwanie,
- walory estetyczne,

konieczne jest prawidłowe działanie elementów w tym powiązaniu.

Element zalicza się do zbioru elementów pasywnych, jeśli jego uszkodzenie (lub jeśli brak takiego elementu) nie uniemożliwia realizacji rozpatrywanego zadania obiektu. Model blokowy obiektu zawierający elementy podstawowe, rezerwowe i pasywne pokazano przykładowo na rys. 29.



Rys. 29. Poglądowy schemat pełnej struktury obiektu (rozwińnięcie)

Ponieważ elementy pasywne nie mają wpływu na obniżenie technicznej efektywności obiektu, można je wyeliminować z dalszych rozważań (pominąć na schematach graficznych).

#### 4. 5. Wpływ struktury obiektu na niezawodność

Opisane modele wpływu struktury obiektu na jego niezawodność są bardzo pożyteczne do analizy niezawodnościowej, zwłaszcza w przypadku słabego oddziaływania uszkodzenia jednego elementu na uszkodzenie innego (założenie niezależności zdarzeń).

Z prawa iloczynu wynikają interesujące trzy wnioski do analizy niezawodnościowej obiektu [7]:

##### A

**Niezawodność obiektu może niespodziewanie szybko maleć gdy zwiększa się ilość elementów w obiekcie.**

Załóżmy, że mamy do czynienia z obiektem, w którym wszystkie elementy mają jednakową niezawodność  $R_e = 0.99$ . Oznacza to, że na 100 takich elementów tylko 1 ma prawo stać się niesprawny. Niezawodność obiektu złożonego z  $n$  takich elementów wynosi  $R = 0.98^n$ . Jak wpływa ilość  $n$  tych elementów na niezawodność obiektu  $R$  pokazano w tabelicy 17.

Tabl. 17. Niezawodność  $R$  obiektu o strukturze szerekowej złożonego z  $n$  elementów o jednakowej niezawodności  $R_e = 0.99$

$R_e$	0.99						
$n$	1	10	50	100	200	300	400
$R$	0.99	0.90	0.60	0.37	0.13	0.05	0.02

Jak widać z tej tabelicy, jeżeli elementy zawodzą 1 na 100, to obiekty zbudowany z 10 takich elementów zawodzą 1 na 10. W obiekcie złożonym z 250 elementów 4 na 10, ze 100 elementów 2 na 3, a złożonym z 400 elementów zawodzą w 98 przypadkach na 100. A przecież spotykane w życiu codziennym maszyny czy urządzenia, zwłaszcza elektroniczne, składają się raczej z setki niż dziesiątek elementów. Im więcej elementów w obiekcie, tym większe muszą być ich niezawodności, żeby niezawodność obiektu była dostatecznie duża. Nie może (przykładowo) dla celów wojskowych tak być, aby rakiety, które złożone są ze znacznie większej liczby elementów niż 400, tylko 2 na 100 były sprawne po określonym czasie. Dlatego też wymagania niezawodnościowe elementów według standardów wojskowych są znacznie wyższe niż w innych obszarach wykonania obiektów technicznych [3].

Bardzo mało jest danych o największych osiągalnych obecnie niezawodnościach elementów. Mamy jedynie wiarygodne dane o niezawodności



niektórych elementów elektronicznych-patrz tablica 9. Niezawodność najbardziej niezawodnych elementów elektronicznych, określana jako prawdopodobieństwo poprawnego pełnienia przez nie funkcji w ciągu 1000 godzin z reguły nie przekracza 0.999999. Przyjmuje się to obecnie jako barierę niezawodnościową. Oznacza to, że w ciągu 1000 godzin 1 na milion obiektów staje się niesprawny.

Obiekt o żądanej niezawodności i strukturze szeregowej, niezawodnościowo nie może składać się z większej liczby elementów niż określona przez barierę niezawodnościową. W tablicy 13 podano liczby elementów o strukturze tego rodzaju odpowiadające różnym niezawodnościom  $R$  obiektu przy barierze niezawodnościowej  $R_e = 0.999999$ .

*Tabl. 13. Liczby  $n$  elementów o niezawodności  $R_e = 0.999999$  przy której niezawodność obiektu o strukturze szeregowej wynosi  $R$*

R	n
0.5	500 000
0.6	400 000
0.4	300 000
0.8	200 000
0.9	100 000
0.99	10 000
0.999	1 000

Obecnie jeszcze zatem nie można zbudować np. komputera o strukturze szeregowej niezawodnościowo złożonej z 100000 elementów i posiadającego niezawodność większą od 0.9.

## B

**O szansie na poprawną pracę obiektu decydują nie najmniej pewne, najbardziej zawodne elementy obiektu, lecz najbardziej pewne, najbardziej niezawodne, jeśli jest ich dużo.**

Okazuje się więc, że w pewnych sytuacjach głównym źródłem niesprawności mogą być nie najmniej zawodne lecz właśnie najbardziej niezawodne elementy obiektu o strukturze szeregowej niezawodnościowo.

Przypuśćmy, że obiekt składa się z 101 elementów, w tym 100 elementów ma jednakowe niezawodności równe 0.99, niezawodność zaś sto pierwszego jest mniejsza i wynosi 0.9, tak iż ten element jest najmniej niezawodny, najmniej pewny. Niezawodność takiego obiektu wynosi

$$R = 0.99^{100} \cdot 0.9 \cong 0.33.$$

Na 100 takich obiektów poddanych próbie niezawodnościowej prawdopodobnie 33 obiekty przetrwają próbę pomyślnie, w 67 obiektach zaś powstaną niesprawności. Jeśli najmniej pewny element poprawimy, przypuśćmy

tak, żeby jego niezawodność zwiększyła się z 0.9 do 1, to niezawodność obiektu zwiększy się

$$R = 0.99^{100} \cdot 1 \approx 0.37.$$

A więc liczba sprawnych po próbie obiektów zwiększy się o 4 a niesprawnych zmaleje o 4. Z tego wynika, że element najmniej pewny był źródłem jedynie czterech niesprawności, podczas gdy elementy najbardziej niezawodne były powodem aż 63 niesprawności. Jeżeli zatem mamy polepszyć niezawodność obiektu, musimy zwrócić uwagę przede wszystkim na najbardziej niezawodne elementy, jeśli ich jest dużo, nie zaś na ten jeden najmniej pewny. Wystarczy zwiększyć niezawodność każdego ze 100 elementów 0.99 na 0.995, tj. tylko o drobnostkę, o 0.005, żeby niezawodność obiektu zwiększyła się prawie dwukrotnie.

Stan taki, że obiekt jest złożony z wielu elementów o niezawodności dużej lub bardziej dużej, oraz z nielicznych nieco słabszych, jest jednym z typowych, do którego z reguły dochodzi się ze stanu poprzedzającego, w którym obiekt zawiera pewną ilość elementów o szczególnie małej niezawodności, a więc normalnie łatwo wykrywalnych i łatwo dających się ulepszyć. Oczywiście jeżeli obiekt złożony zawiera bardzo mało pewnych elementów lub dość wielką liczbę elementów mało pewnych, to największe efekty w polepszaniu niezawodności obiektu daje polepszenie tych najmniej pewnych elementów. Jest to tzw. szukanie i poprawa „słabych ogniw”. Z wyżej przytoczonego rozważania wynika jednak, że konieczność operowania pojęciem szukania najsłabszego ogniwa, powstaje w warunkach wczesnego, słabego rozeznania problemu i świadczy o tym, że twórcy obiektu nie dojrżeli jeszcze w pełni do rozwiązania postawionego im zadania.

### C

**Jeżeli niezawodność pewnej liczby elementów jest mierna, to nie ma znaczenia nawet bardzo duża niezawodność pozostałych elementów.**

W masie miernoty największe nawet osiągnięcia nie mają praktycznego znaczenia. Waga ich jest tym większa, im wyższy jest średni poziom pozostałych elementów. Ostatecznie bowiem prawidłowość wyznacza wartość średnia. Elementy doskonale są tyle warte ile służą podniesieniu poziomu średniego. Praktycznie cały wysiłek powinien być skoncentrowany na podniesieniu poziomu średniego.

Załóżmy, że obiekt składa się z 9 elementów, każdy o niezawodności 0.8 i jednego o niezawodności 0.999 lub 0.9999, lub (przypuśćmy) o niezawodności równej jedności, to niezawodność obiektu, praktycznie rzecz biorąc, we wszystkich tych trzech przypadkach jest równa 0.136

$$R = 0.8^9 \cdot 0.999 = 0.8^9 \cdot 0.9999 \cdot 0.8^9 \cdot 1 \approx 0.136$$

Widać więc, że w pewnych przypadkach doskonalenie niezawodności (dobroci) wybranych tylko elementów nie przyniesie praktycznie żadnych efektów w niezawodności całego obiektu. Liczy się bowiem poziom średni.

Przekroczenie tych różnych barier niezawodnościowych jest możliwe przy wprowadzeniu do struktury obiektu elementów pracujących równolegle z podstawowymi (tj. elementów rezerwowych). Przejmują one na siebie zadanie elementów podstawowych gdy te stają się niesprawne. Przy czym mogą być to elementy:

- pracujące na zmianę z podstawowymi - i jest to wówczas rezerwa gorąca,
- będące w bliskim obwodzie - tworzą rezerwę ciepłą,
- znajdujące się w magazynach - jako rezerwa zimna.

Największą moc (pewność wykorzystania dobroci) znajduje się w rezerwie zimnej, mniejsza w rezerwie ciepłej a najmniejsza w rezerwie gorącej. Ona już bowiem jest wykorzystywana i rezerwy jej mocy są z tego tytułu najmniejsze.

Każda rezerwa jednak kosztuje. Może podwoić, potroić itp. koszt obiektu. Wzrost kosztów powinien być skompensowany zyskiem otrzymanym wskutek zwiększenia niezawodności. Należy więc zwrócić uwagę na fakt, że największy przyrost niezawodności ( $\Delta R_{1,1}$ ) uzyskuje się przez podwojenie elementu, tj. wtedy gdy  $n=2$ . Następny krok rezerwowania, gdy zwiększymy liczbę elementów do trzech, daje mniejszy przyrost niezawodności ( $\Delta R_{2,3}$ ), a następny jeszcze mniej - tablica 14.

Tabl. 14. Efektywność stosowania różnej ilości  $n$  elementów rezerwowych (o określonej niezawodności  $R_e$ ) na niezawodność całego obiektu

$R_e \backslash n$	2	3	4
0.5	0.75	0.87	0.94
0.8	0.69	0.99	0.998
0.9	0.99	0.999	0.999
0.95	0.998	0.9999	0.999994
0.99	0.9999	0.999999	-

Przyroda już dawno o tym wiedziała, dając najdoskonalszemu ze swoich obiektów (człowiekowi), 2 nogi, 2 oczu, 2 uszu i rąk także dwoje. Mniejmy jednak to na uwadze, że są one z rezerwy gorącej i ich moc jest ograniczona, ale za to włączenie do pracy jest natychmiastowe. Oby było dla wszystkich takie.

## Literatura podstawowa do rozdziału 4

1. Adamkiewicz W. i inni : *Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym.* WKiŁ, Warszawa 1983
2. Bojarski W. : *Wprowadzenie do oceny niezawodności działania obiektów technicznych.* PWN, Warszawa 1967
3. Fokin J. D. : *Niezawodność eksploatacyjna urządzeń technicznych.* MON, Warszawa 1973
4. Gołąbek A. : *Eksploatacja i niezawodność maszyn.* Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988
5. Hebda M., Janicki D. : *Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji* WKiŁ, Warszawa 1977
6. Kiliński A. : *Jakość.* WNT, Warszawa 1979
7. Kiliński A. : *Podstawy teorii procesów realizacji.* Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1972
8. Kopociński B. : *Zarys teorii odnowy i niezawodności.* PWN, Warszawa 1973
9. Muhlemann A.P., Oakland J.S., Lockyer K.G.: *Zarządzanie: produkcja i usługi.* PWN, Warszawa 1995

## 5. METODOLOGIA BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

### 5. 1. Rozwiązywanie problemów w nauce i technice

Badania całych obiektów technicznych w naturalnych warunkach ich eksploatacji są dość popularne w różnych dziedzinach techniki. Dają one dużo informacji projektantom i technologom, ale jednocześnie są bardzo pracochłonne i kosztowne. Organizować należy je więc tak, aby można było uzyskać z nich możliwie dużo rozmaitych informacji. Badania eksploatacyjne mogą być też badaniami ankietowymi z odpowiednim statystycznym przetworzeniem zgromadzonych informacji pierwotnych, tak, aby uzyskane wyniki miały charakter badania naukowego.

**Badanie naukowe** tym się różni od innych działań, że spełnia pewne specjalne wymagania, jak np. posługiwanie się pojęciami dobrze zdefiniowanymi, uzasadnienie głoszonych twierdzeń, stosowanie metod dających się zapisać i wielokrotnie powtarzać.

**W działaniu technicznym** w odróżnieniu od działania naukowego:

- w sposób bardziej konkretny formułuje się cel działania ,
- bardziej rygorystycznie egzekwuje się cel działania ,
- czas badań jest krótszy i precyzyjnie oznaczony terminem zakończenia.

Działalnością naukową w naukach technicznych jest poznawanie praw rządzących w świecie techniki. Natomiast nie można zaliczyć do działalności naukowej opisywania reguł postępowania technicznego.

W działalności badawczej powinny być zachowane co najmniej następujące fazy działania:

- gromadzenie faktów,
- porządkowanie i klasyfikacja zgromadzonych faktów,
- odnajdywanie zasady (reguły), pozwalającej zrozumieć poznane fakty i przewidywać nieznane.

Proces poznania naukowego obejmuje dwa poziomy :

- empiryczny, polegający na zbieraniu i opracowywaniu danych doświadczalnych,
- teoretyczny, polegający na budowaniu teorii.

W związku z tym, występują dwa różne działania naukowe:

1. interpretacja teorii,
2. interpretacja danych doświadczalnych.

Istotą **teorii empirycznych** (doświadczalnych) nie jest dowodzenie dedukcyjne, lecz wnioskowanie na zasadzie indukcji. Istotnym elementem procesu badawczego z dowodzeniem indukcyjnym jest pozyskiwanie informacji doświadczalnych.

Ogólnie rzecz biorąc, wyróżnia się dwie podstawowe sytuacje, w których przeprowadzane są eksperymenty:

- człowiek nie ingeruje w badany proces (eksperyment bierny),
- badane procesy są sterowane przez człowieka (eksperyment czynny).

Istotą każdego doświadczenia jest pomiar wielkości charakteryzujących badane zjawisko. Pomiar w badaniach eksploatacyjnych polega głównie na ilościowej lub jakościowej rejestracji obserwacji. Jeżeli jest to możliwe, należy dążyć do ilościowego zapisu obserwowanych faktów.

## 5. 2. Programowanie i realizowanie badań eksploatacyjnych

Rozpoznanie niezawodności rzeczywistych obiektów technicznych może być dokonane w wyniku badań eksploatacyjnych. Celem tych badań jest dostarczenie informacji producentowi lub użytkownikowi:

1. Celem badań eksploatacyjnych dla **producenta** może być:
  - ocena jakości eksploatacyjnej obiektów na różnych etapach ich życia,
  - porównanie jakości obiektów różnych typów,
  - określenie prognoz czasowych bezawaryjnej pracy obiektów,
  - programowanie produkcji części zamiennych.
2. Celem badań eksploatacyjnych dla **użytkownika** może być:
  - wyznaczenie strategii eksploatacyjnej grupy obiektów,
  - organizacja zaplecza technicznego,
  - prognozowanie odnowy obiektów poprzez naprawy planowane.

Zaistnienie sytuacji badawczej do realizacji powyższych celów możliwe jest po udzieleniu odpowiedzi na pytania:

Kto stawia problem badawczy (zleca badania)? Co ma być badane? Kto ma badać? Gdzie mogą być wyniki badań wykorzystane?

Jako istotne elementy badań eksploatacyjnych należy więc wymienić:

- system kierowania badaniami,
- system realizacji badań.

Elementy te tworzą zintegrowaną całość ze względu na realizację celu badań eksploatacyjnych.

**Program badań** eksploatacyjnych powinien zawierać:

1. Zbiór stałych danych programu, tzn:

- cel badań eksploatacyjnych,
- zasady badań eksploatacyjnych,
- wskaźniki eksploatacyjne,
- próbkę eksploatacyjną.

2. Zbiór metod programu, tj.:

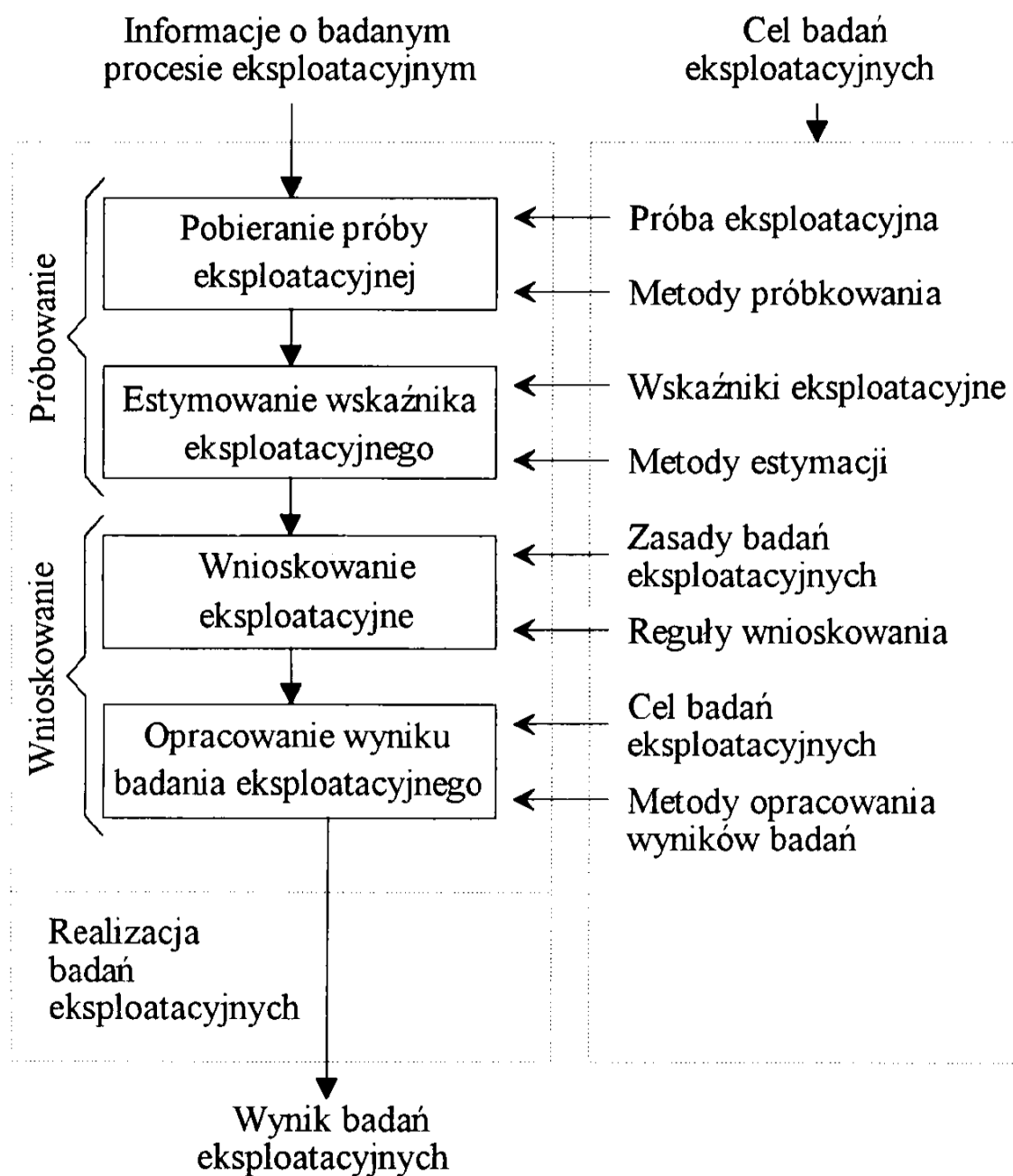
- metody próbkowania eksploatacyjnego,
- metody estymacji wskaźników eksploatacyjnych,
- reguły wnioskowania statystycznego,
- metody opracowania wyników badań eksploatacyjnych.

Realizacja badań polega na pobieraniu informacji pierwotnych, zapisie tych informacji na nośniku informacji wg zadanego kodu oraz na wstępnym weryfikowaniu pobranych informacji pierwotnych. Ogólny schemat realizacji i programowania badań eksploatacyjnych pokazano na rys. 30.

Badanie eksploatacyjne polega w swojej istocie na „próbowaniu” przedmiotu badań i wnioskowaniu o tym przedmiocie. W praktyce próbowanie realizuje się poprzez pobieranie tzw. **próby eksploatacyjnej**, której wyniki są podstawą estymowania (szacowania) właściwości eksploatacyjnych całej populacji badanych obiektów.

Z formalnego punktu widzenia, przez próbę eksploatacyjną rozumie się pewien drobny wycinek populacji generalnej obiektów, w którym dane są:

- liczba badanych obiektów,
- czas badania eksploatacyjnego,
- typ badanego obiektu,
- warunki użytkowania,
- warunki obsługiwania,
- badany parametr.



Rys 30 Ogólny schemat realizacji i programowania badań eksploatacyjnych

Realizacja badania eksploatacyjnego niezawodności jest zatem określona, gdy znane są dla próbowania: struktura próbki i reguły próbowania, a dla wnioskowania: zbiór metod i testów statystycznych oraz reguły wnioskowania.

Cele badań inspirowaną określoną sytuacją badawczą oraz potrzebę stosowania każdorazowo odpowiedniej metody badań.

Ogólnie dostępne **metody badań** niezawodności dają się podzielić na:

- grupę metod badań analitycznych,
- grupę metod badań eksperymentalnych.



Dostępne metody badań eksperymentalnych niezawodności obiektów technicznych, poklasyfikowane z różnego punktu widzenia, zestawiono w tabelicy 15.

*Tabl. 15. Metody badań eksploatacyjnych*

Kryterium podziału	Typy (rodzaje) badań eksploatacyjnych
Typ eksploatacyjnej sytuacji badawczej	Badania eksploatacyjne pojedyncze Badania eksploatacyjne podwójne Badania eksploatacyjne potrójne Badania eksploatacyjne anonimowe
Użytkownik wyników badań	Badania eksploatacyjne dla eksploatatora Badania eksploatacyjne dla wytwórcy Badania eksploatacyjne dla projektanta
Bezpośredniość badań i oddziaływania kierującego	Badania eksploatacyjne i oddziaływanie kierujące pośrednie Badania eksploatacyjne bezpośrednie i oddziaływanie kierujące pośrednie Badania eksploatacyjne pośrednie i oddziaływanie kierujące bezpośrednie Badania eksploatacyjne bezpośrednie i oddziaływanie kierujące bezpośrednie
Stopień zakłócenia systemu matki ( systemu badanego ) przez system badawczy	Badania eksploatacyjne naturalne Badania eksploatacyjne eksperymentalne
Przedmiot badania	Badania eksploatacyjne pojedynczego urządzenia ze względu na wyróżnioną własność (np. niezawodność) Badania eksploatacyjne grupy urządzeń ze względu na wyróżnioną własność Badania systemu eksploatacji urządzenia i jego elementów
Faza badania	Badania eksploatacyjne wstępne (pilotowe) Badania eksploatacyjne pełne (właściwe)
Metoda badania	Badania eksploatacyjne jednowarstwowe Badania eksploatacyjne wielowarstwowe
Czas badania	Badania eksploatacyjne przyspieszone Badania eksploatacyjne ciągłe (długotrwałe)

Wybór najkorzystniejszej z podanych metod badań niezawodności każdorazowo zależy od tego, jaki jest obiekt badań: (prosty, złożony, nienaprawialny, naprawialny, tani, drogi itp.) oraz od tego, jaki jest wpływ metody na zachowanie się obiektu w eksploatacji oraz poprawność jego działania i intensywność zmian czynników eksploatacyjnych. Najbardziej efektywne są te metody badań, które pozwalają na odwzorowanie zachowywania się obiektu w rzeczywistych warunkach eksploatacji oraz ujawnienie jego słabych ogniw i postaci uszkodzeń. W tabl. 15 wyróżniono: badania eksploatacyjne naturalne i badania eksploatacyjne eksperymentalne. Różnica między jednymi i drugimi polega na tym, czy „system matka” (naturalne warunki pracy obiektów) jest zakłócany przez eksperymentatora, czy nie. W badaniach naturalnych system ten nie jest zakłócany przez eksperyment, natomiast w badaniach eksperymentalnych system jest specjalnie przystosowany do badań.

### 5.3. Badanie niezawodności w naturalnych warunkach eksploatacji

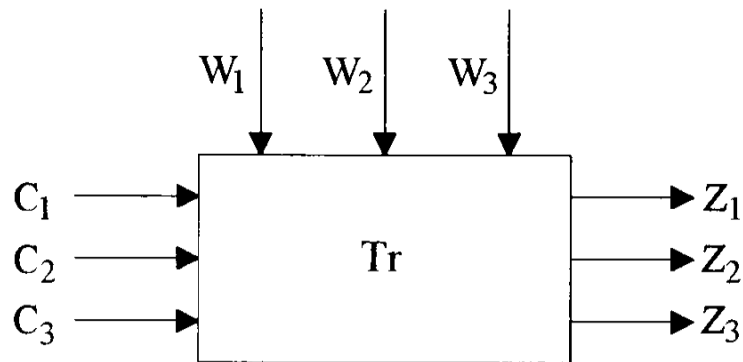
Najbardziej miarodajną ocenę przydatności obiektu do wykonywania przypisanych mu zadań, można uzyskać w wyniku badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Badania te, zwane **eksperymentem naturalnym**, są bardzo pracochłonne i kosztowne, a sposoby ich realizacji, uzyskiwane wyniki oraz ich ewentualna interpretacja są chyba najbardziej kontrowersyjnymi ze wszystkich znanych aktualnie w działalności naukowej.

U podstaw tej kontrowersyjności leżą następujące przyczyny:

- złożoność warunków środowiska obiektów,
- złożoność badanych obiektów,
- brak ogólnie uznanych zasad realizacji podobnych eksperymentów.

Złożoność warunków środowiska obiektu można ominąć poprzez abstrahowanie od wielości przyczyn i koncentrowanie się wyłącznie na ogólnych skutkach i prawidłowościach. Taką możliwość dają metody oparte na teorii prawdopodobieństwa i statystycznego opracowania wyników pomiarów.

Ominięcie złożoności obiektu technicznego można uzyskać natomiast poprzez traktowanie obiektu jako **czarnej skrzynki** o pewnych parametrach (cechach) na wejściu i pewnych parametrach (osiągach) na wyjściu - rys. 31. W obiekcie następuje transformacja ( $Tr$ ) parametrów wejściowych ( zasilen  $C$  ) w parametry wyjściowe (osiągi  $Z$ ) przy występowaniu zakłóceń  $W$ .



Rys. 39. Cybernetyczny modelu obiektu technicznego „czarna skrzynka”:

$C_1 - C_k$  - parametry (cechy) wejściowe obiektu

$Z_1 - Z_k$  - parametry (osiągi) wyjściowe obiektu

$W_1 - W_k$  - parametry (warunki) środowiskowe

Pozostaje jeszcze trzecia grupa trudności - brak ogólnie uznanych zasad takich eksperymentów. Pierwsze dwie trudności można było pokonać poprzez stosowanie do obiektu podejścia cybernetycznego i metod statystyki matematycznej. Jednakże praktyczną znajomością tych narzędzi może wykazać się wąskie grono osób zajmujących się w Polsce badaniami obiektów mechanicznych. Podobnie jest ze znajomością tej problematyki wśród praktyków. Nie ma zatem możliwości porozumienia się na gruncie metodologii. W istocie rzeczy pozostaje więc następująca droga: uzyskiwanie wyników eksperymentów (jeżeli ktoś na jego zorganizowanie wyrazi zgodę), empiryczne dowodzenie ich adekwatności oraz przedstawienie rezultatów w „żargonie technicznym” zrozumiałym dla większej liczby osób.

#### 5. 4. Zastosowanie teorii niezawodności do oceny obiektów mechanicznych

Zastosowanie teorii niezawodności w jej obecnym stadium do potrzeb mechaniki nie jest jeszcze szerokie. Ograniczenia wynikają z:

1. definicji uszkodzenia elementu - przyjęcie dla każdego elementu mechanicznego tylko dwóch stanów (zdatności i niezdatności) jednoznacznie dla układów elektronicznych, nie jest zawsze tak oczywisty w przypadku układów mechanicznych,
2. struktury niezawodnościowej obiektu; podział elementów obiektu mechanicznego na połączone ze sobą równoległe lub szeregowo elementy, nie jest w każdym przypadku jednoznaczny,

3. liczebności próbek - teoria niezawodności wywodzi swój rodowód z prawa wielkich liczb, wiadomo natomiast, że złożone obiekty mechaniczne (jednorodne) występują w dużo mniejszych ilościach,
4. reprezentatywności próbki; obiekty mechaniczne odznaczają się względnie wysoką niezawodnością, tzn., że poszczególne ich elementy ulegają uszkodzeniom stosunkowo rzadko, a ponadto uszkodzeniom ulega niewielka liczba elementów. Zatem aby uzyskać informację o uszkodzeniach, konieczne jest prowadzenie badania w ciągu długiego okresu „życia” obiektu.

Jednocześnie jednak wiadomo, że nie istnieje inna dyscyplina formalna, która by potrafiła ujmować tę klasę zagadnień co teoria niezawodności. Jeśli ograniczymy badania niezawodności do wybranych elementów obiektu mechanicznego lub jeśli składa się on z niewielkiej liczby elementów, to wtedy wymienionych trudności można w ogóle nie zauważyć.

Zasadne jest na ogół prowadzenie badań niezawodnościowych w odniesieniu do nowo produkowanych obiektów, które traktuje się rozwojowo, tzn. zamierza się je produkować nadal i ulepszać w trakcie następnych serii i typów. Należy podkreślić, że wiele znanych firm światowych traktuje takie badania jako jeden z zasadniczych kierunków podnoszenia jakości swoich wyrobów.

Pamiętać należy jednak o tym, że niezawodność jest tylko jedną z cech wyrobu i nie można się spodziewać, że badania niezawodności uzdrowią, np. niesumienną kontrolę. Jeśli natomiast potrafimy udzielić odpowiedzi na pytania:

- w jakim konkretnie celu chcemy badać niezawodność?,
- które elementy badanych obiektów decydują o ich niezawodności i w jakim (liczbowo) stopniu?,
- czy podniesienie niezawodności badanych obiektów i w jakiej (liczbowo) wysokości jest sensowne ekonomicznie?,

to wówczas uzyskane wyniki badań można wykorzystać dość wszechstronnie. I jeszcze jedna uwaga: badanie niezawodności polega na wykorzystaniu teorii prawdopodobieństwa do analizy zjawisk, zachodzących w czasie eksploatacji badanych obiektów. Głównym problemem w tym względzie jest wiarygodność gromadzonych danych (celowe jest np. stosowanie testów na oczyszczenie otrzymanych wyników, np. testu Grebbs'a lub Dixona) oraz ich wartość informacyjna.

Powaznego wzrostu wiarygodności wyników nie należy oczekiwać jednak nawet przy zastosowaniu najbardziej wymyślnych nośników informacji, sposobów jej

przepływu i gromadzenia (np. stosowanie najlepszych komputerów), jeśli informacja jest skażona u źródła np. na skutek nieodpowiednich czujników pomiarowych. Zgromadzone informacje muszą w sposób dokładny opisywać badane zjawiska, a otrzymane dane winny być w prawidłowy sposób obróbrane. **Byle jaka statystyczna obróbka byle jakich danych, zebranych przypadkowo, bądź to na żądanie technologa, bądź to na żądanie konstruktora, nie są żadnym badaniem niezawodności.** Można to nazwać co najwyżej cząstkowym badaniem statystycznym niektórych uszkodzeń wybranych elementów badanych obiektów.

W badaniach niezawodności konieczne jest na początku bardzo dokładne określenie celu badań. Nie może to być sformułowanie ogólnikowe, które będzie później uściślane w toku pracy. Konieczność ta wynika z dużej pracowitości badań.

Opierając się na wytyczonym celu, należy precyzyjnie określić definicję uszkodzenia, która powinna być pilnie przestrzegana w ciągu całego badania: przy gromadzeniu i przetwarzaniu danych, a także przy interpretacji wyników. Od właściwego przyjęcia tej definicji w dużej mierze zależy powodzenie badań, a w szczególności przydatność wyników do konkretnych zastosowań.

Mając ustalony cel oraz przyjętą definicję uszkodzenia, można przystąpić do opracowania modelu badania  $y=f(x)$  np. związku napięcia zasilania żarówki ( $x$ ) i jej trwałości ( $y$ ).

Następnie przystępujemy do gromadzenia informacji o uszkodzeniach wraz z informacjami dotyczącymi okoliczności, przyczyn, skutków itp. Pamiętać należy o tym, żeby gromadzone informacje umożliwiły zrealizowanie przyjętego celu badań i odpowiadały przyjętej definicji uszkodzenia - w przeciwnym bowiem razie żadna, najbardziej wymyślna, obróbka danych nie zapewni przydatności wyników. Organizacyjnie jest to najbardziej trudna i najkosztowniejsza część badań.

Aby badania niezawodności mogły przynieść oczekiwane rezultaty należy:

- opracować właściwy program badań, uzgodniony z odbiorcami wyników,
- przeszkolić odpowiednio personel, dostatecznie liczny, aby mógł zrealizować zamierzone cele w odpowiednim czasie,
- zorganizować właściwy bank danych o eksploatacji badanych obiektów.

Wszystkie zebrane powyżej uwagi prowadzą do dwóch ogólnych wniosków:

1. Badania eksploatacyjne kompletnych obiektów mechanicznych, w ich naturalnych warunkach działania są przedsięwzięciami skomplikowanymi i kosztownymi. Należy je zatem organizować kompleksowo, w grupach badawczych, złożonych ze specjalistów z różnych dyscyplin, stawiając możliwie wiele celów cząstkowych w badaniu. Jedynie na tej drodze można mówić o efektywnym wykorzystaniu nakładów i wysiłków poniesionych na badania.
2. Badania eksploatacyjne, prowadzone w omawianej skali, w poważnym stopniu ingerują w mechanizm przedsiębiorstwa eksploatującego badane obiekty. Dlatego też badania te należy łączyć, wykorzystując poniesione nakłady z pracami nad projektowaniem, modyfikacją lub rekonstrukcją systemu sterowania eksploatacją lub chociażby jego fragmentów.

I drobna na pozór, ale niesłychanie istotna uwaga: wyniki badań, zastosowane wskaźniki ocenowe i prognostyczne oraz ich interpretacja powinny być czytelne i zrozumiałe dla służb technicznych i ekonomicznych zainteresowanych przedsiębiorstw, bez konieczności głębszego studiowania teorii niezawodności, teorii prawdopodobieństwa itp.

## 5. 5. Plany badań niezawodnościowych

Do podstawowych problemów decyzyjnych na etapie organizowania badań niezawodnościowych należą:

- wybór planu badań,
- losowanie próbki obiektów.

**Wybór planu** zależy od wielu czynników, a szczególnie od:

1. Poziomu złożoności obiektu (części, zespół, urządzenie).
2. Właściwości eksploatacyjno - niezawodnościowych obiektu i charakteryzujących je wielkości.
3. Celu badań oraz oczekiwanych wyników, którym mają służyć zbierane informacje.

W tablicy 16 podano klasyfikację planów badań dla liczby  $N$  obiektów w próbce. W podanej klasyfikacji założono, że obserwacja uszkodzeń będzie prowadzona ciągle.

Tabl. 16. Plany badań niezawodnościowych obiektów technicznych

Lp.	Okres badań	Umowne oznaczenie planu	
		z wymianą uszkodzonych obiektów	bez wymiany uszkodzonych obiektów
		Bz	B
1.	Badania do $r$ -tego uszkodzenia	$(N, Z, r)$	$(N, B, r)$
2.	Badania do wykonania przebiegu $L$	$(N, Z, L)$	$(N, B, L)$
3.	Plan mieszany, jeśli $L_r < L$ - do $r$ -tego uszkodzenia lub $L_r \leq L$ , to do momentu $L(r, L)$	$[N, Z, (r, L)]$	$[N, B, (r, L)]$
4.	Badania do momentu zawczasu ustalonego sumarycznego przebiegu $(HS_o)$	$(N, Z, HS_o)$	-
5.	Badania do momentu pojawienia się jednego z następujących zdarzeń - $X$ $S(L) = S_o d(I') < r$ $I' = I_r, HOS(I') < S_o$	$[N, Z, (r, HS_o)]$	-
$S(I')$ - sumaryczny przebieg do momentu $I'$ $d(I')$ - liczba uszkodzeń, które zaprojektowano do momentu $I'$ ,			

Przykład zapisu:  $[N, Z, (r, L)]$ , należy czytać następująco:

Do badań pobrano próbkę  $N$  - elementową określonego obiektu, w toku badań obiekty wymieniane są na nowe, badania są prowadzone według planu mieszanego do  $r$ -tego uszkodzenia, jeśli  $L_r < L$ , lub do chwili uzyskania przebiegu  $L$ , jeżeli  $L_r \geq L$ .

Przy realizacji badań niezawodnościowych zaleca się, aby eksperyment w warunkach naturalnej eksploatacji był prowadzony według planu mieszanego nr 3, z tym jednak, że:

- dla obiektów i elementów odnawialnych badania były prowadzone według planu  $[N, B, (r, L)]$ ,
- dla obiektów nieodnawialnych, pracujących do pierwszej wymiany, badania były prowadzone według planu  $[N, Z, (r, L)]$ .

Jeżeli celem badania jest np. wyznaczenie charakterystyki trwałości dowolnego elementu, pracującego do pierwszego uszkodzenia i badana jest jakość elementu, to zaleca się stosować plan  $(N, B, r)$ , tzn. próbka  $N$  - elementowa, bez wymiany do  $r$  - tego uszkodzenia. Stosowane mogą być przy tym określone plany badań wyrywkowych. Przyjęte w planach badań symbole oznaczają:

- $N$  - liczba obiektów w próbce na początku badań,  $N = N(O)$ ,
- $Z$  - z wymianą, każdy uszkodzony element w próbce wymieniany jest na nowy (zdatny),
- $B$  - bez odnowy - wymiany, żaden uszkodzony w  $N$  - elementowej próbce elementu nie jest wymieniany na nowy,
- $L$  - ze skończonym przebiegiem ( $T$  - czasem), obserwacje obiektów prowadzi w z góry ustalonym czasie pracy (przebiegu km),
- $r$  - do  $r$  - tego zdarzenia (uszkodzenia), jeżeli określona jest na początku badań wymagana liczba zdarzeń,
- $I'$  - przebieg do  $r$  - tego zdarzenia (uszkodzenia), kiedy obok liczby zdarzeń rejestrowane są również długości przedziałów między kolejnymi zdarzeniami,
- $HS_0$  - sumaryczny, z góry ustalony przedział czasu (przebiegu) badań próbki obiektów..

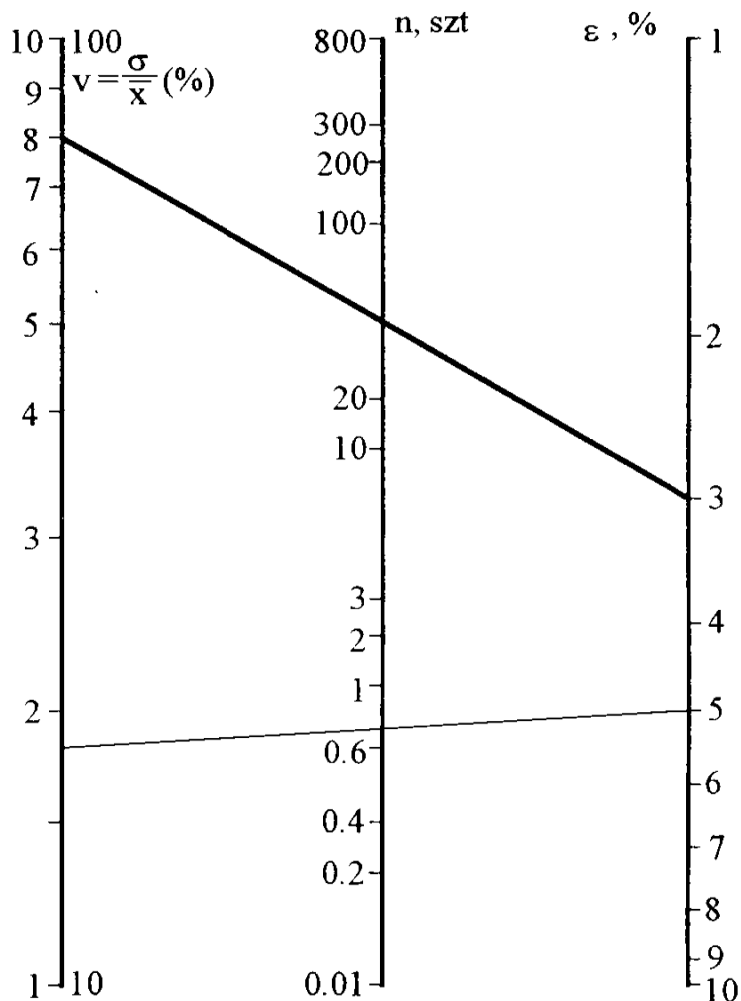
## 5. 7. Liczność i losowość próbki do badań

Próbka wyrywkowa do badań eksploatacyjnych niezawodności jest tylko pewnym fragmentem populacji generalnej obiektów. W procesie obserwacji dowolnej cechy istotne jest to, żeby próbka dobrze odzwierciedlała badaną cechę w populacji generalnej. Uzyska się to najlepiej, gdy zostanie dobrana odpowiednia liczność próbki i obiekty wybierane będą w sposób jak najbardziej przypadkowy (losowy). Należy przy tym pamiętać, że do badań statystycznych losujemy próbkę obiektów rzeczywistych, lecz w wyniku badań interesują nas nie obiekty, ale realizacje określonego parametru w badanej próbce, tzn. nie liczba obiektów, lecz liczba realizacji tego parametru.

**Liczność próbki** należy wyznaczyć tak, aby prawdopodobne odchylenie nieznanego wyniku od grupowania się pozostałych wyników w próbce nie przewyższało dopuszczalnego błędu  $\varepsilon$ . Liczność próbki jest obiektywnie zależna od poszukiwanej wartości średniej  $\bar{x}$  oraz rozrzutu  $\sigma$  wartości rzeczywistych badanej zmiennej losowej od tej średniej. Im większy jest rozrzut tych wartości, tym większa jest minimalna liczność próbki. Wyznaczenie wartości  $n_m$  wymaga często zebrania wstępnych informacji o charakterze zmian wartości rzeczywistych. Jeżeli znany jest współczynnik zmienności  $V = \frac{\sigma}{\bar{x}}$  i błąd  $\varepsilon$



(wadliwość pomiaru), to liczność próbki  $n$  przy dopuszczalnym błędzie  $\varepsilon$  można wyznaczyć według nomogramu zamieszczonego na rys. 32.



Rys. 32. Nomogram wyboru liczności próbki  $n$  (przy wiarygodności oceny  $B = 0.99$ )

Zastosowano w nim wiarygodność oceny prawdopodobieństwa zdarzeń  $B = 0.99$ .

Jeżeli współczynnik zmienności  $v \leq 10\%$ , to liczność próbki należy wyznaczyć bezpośrednio z nomogramu np. dla  $v = 8\%$  i  $\varepsilon = 3\%$ ,  $n = 47$  (linia ciągła). Jeżeli  $v > 10\%$ , to liczbę  $n$  ze skali środkowej nomogramu, należy przemnożyć przez 100, np. przy  $v = 16\%$  i  $\varepsilon = 5\%$ ,  $n = 0.67 \times 100 = 67$  sztuk (linia cienka).

Powiększając liczbę próbek  $n$ , można dowolnie zmniejszyć błąd  $\varepsilon$ .

W praktyce wiarygodność oceny  $B$  i błąd  $\varepsilon$  to liczby dane. Zaleca się aby dla odpowiedzialnych elementów, dopuszczalny błąd  $\varepsilon$  (dokładność oceny) przyjmować mniejszy od 5% oraz wiarygodność oceny  $B = 95 \div 99\%$ , natomiast dla pozostałych części produkcji seryjnej i masowej można przyjmować wiarygodność oceny w zakresie  $0.80 \leq B \leq 0.95$ , przy czym dla części i węzłów

winna być ona najwyższa, mniejsza dla zespołów i jeszcze mniejsza dla całych maszyn.

Im wartość  $B$  jest bliższa jedności, tym bardziej pewne jest, że częstość wystąpienia w próbkę mało różni się od częstości wystąpienia w populacji generalnej.

Aparatem służącym do pobierania prób losowych są **tablice liczb przypadkowych**. Przykład takiej tablicy pokazano w tabl. 17. Tablice takie są zbiorami liczb, ustalonych na zasadzie zupełnej ich przypadkowości. Użycie tablicy liczb przypadkowych pomaga w uzyskaniu reprezentatywności próbki. Do losowania za pomocą tablicy 15, potrzebne jest uprzednie ponumerowanie elementów w populacji. Wszystkie numery winny mieć tę samą liczbę cyfr. Losowanie służy do ustalania numerów tych elementów w populacji, które mają być zaliczone do próbki. Numery te odczytuje się z tablicy od miejsca zwanego początkiem odczytywania. Początek odczytywania ustala się przez dowolne zaznaczenie kolumny i wiersza „na ślepo”. Liczby z tablicy odczytuje się w wierszach od strony lewej do prawej, wiersz po wierszu tak jak pismo łańskie.

Jeśli w toku losowania otrzyma się numer, który był już raz wylosowany, to uwzględnia się go ponownie, natomiast elementów o tym numerze nie bada się, lecz uwzględnia się wynik pierwszego badania.

Z przedstawionych w tablicy czwórek cyfr, mogą być wykorzystywane np. pierwsze dwie - jeżeli wybierzemy próbkę o licznosci mniejszej od 100, lub pierwsze trzy - jeżeli wybierzemy próbkę o licznosci mniejszej od 1000. Aby przyspieszyć losowanie, można brać reszty z dzielenia, np. przez 20.

*Tabl. 17. Tablica liczb przypadkowych*

6274	0636	1267	8237	9248	1470	2023	8473	1228	0682
3276	7600	8694	6824	6421	0037	6818	2929	3352	4592
2354	5655	0475	0466	0793	4626	8273	5471	4251	6036
6496	9291	8666	1907	2726	7701	5839	2583	7332	9123
8253	2552	1697	1873	9378	3530	7131	0256	7868	8484
8895	4856	4996	8510	0737	1587	2126	0210	6499	2772
7087	5935	1898	6719	8483	2443	0944	1677	9650	9490
1343	5580	1415	0839	2446	6491	9090	6947	1788	0560
5442	4161	3619	7246	5572	9437	1353	3131	9182	7104
7960	7742	3652	6072	6093	0644	6557	4232	4955	1561
5881	6907	4180	3081	2952	5940	1158	8471	6173	6814
5216	3571	6901	1236	9498	4010	7320	5526	9791	3220
8643	6661	1054	5116	5683	3722	9936	4951	4394	1436
4780	2604	8117	4401	2553	3601	9078	3393	5714	8184
5548	8656	6124	2710	9688	3171	4013	6507	1571	6638
7212	1500	9187	5412	8701	7405	5009	9360	5859	8524
1786	8421	2715	3988	5909	4477	1339	7054	7215	6992
3518	1307	2321	7222	3249	5892	7632	7583	8443	6677
3617	8460	9908	6486	0555	3790	2783	9186	4331	8106
1862	0114	5631	5983	0794	1805	2675	7039	3187	2460
3545	2790	4450	7494	9490	2315	0581	0059	6404	4848
9081	3520	3730	1109	2169	0609	6181	9959	0016	1982
3830	6131	6236	4009	2052	0313	1662	3633	9562	2321
1405	5235	9139	5195	4903	7368	6104	7607	4239	0135
2225	0040	8006	6746	7613	3178	7761	2061	9823	8306
1310	9664	3774	6768	5590	0479	8404	2324	9653	8714
3675	8608	8330	1630	7810	1378	2399	1600	8720	4283
8856	9399	2764	6519	8495	6061	3636	3053	7810	0412
3541	0465	6891	6562	7422	3058	0227	7257	9793	2151
5973	6890	9252	2060	2211	9958	5743	5556	5340	5835
3323	3888	4510	3337	4083	6844	5981	4232	9458	1207
5175	1577	3313	0441	6389	3994	7087	1168	9488	1313
4666	4811	5141	3314	5843	5234	1870	7498	3234	8597
2008	7758	7312	6771	0187	3487	3663	2082	6858	3852
0804	5048	4031	7902	3420	6642	3803	6538	5662	9918

**Przykład:** Należy wybrać próbkę 5-elementową z populacji o liczności  $N = 13$ .

Niech kolejno wybranymi z tablicy liczbami będą (wiersz 6, kolumna 3):

4996, 8510, 0737, 1587, 2126, 0210, 6499,  
2772, 7087, 5935, 1898, 6719, 8483.

Biorąc reszty z dzielenia przez 20 otrzymamy:

8, 5, 85, 35, 3, 5, 95, 6, 35, 75, 9, 95, 15.

Wykreślamy liczby większe od 13 i z otrzymanego ciągu bierzemy pierwszych pięć kolejnych liczb:

8, 5, 3, 5, 6.

W otrzymanym ciągu dwukrotnie wystąpiła cyfra 5. Bierzemy zatem do analizy dwukrotnie realizację badanego obiektu oznaczonego tą cyfrą - zgodnie z zasadą, że interesują nas realizacje a nie obiekty, które akurat zostały wytypowane do badań.

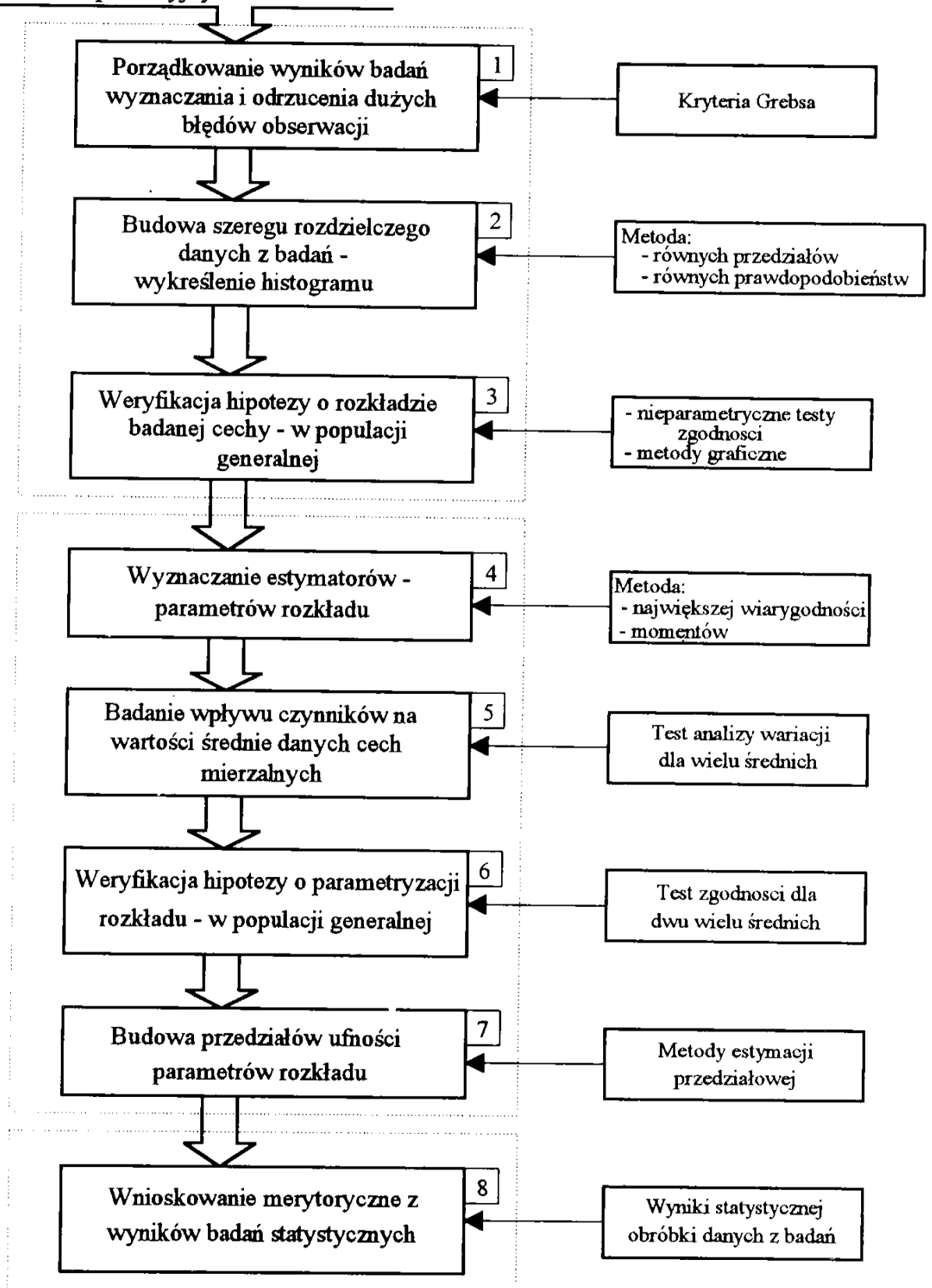
Jeżeli obiekty w populacji generalnej zostały ułożone w sposób zupełnie przypadkowy, np. łożyska w skrzyni, do wyboru próbki z tej populacji można zastosować pobieranie „na ślepo”. Istotę tej metody dostatecznie wyjaśnia jej nazwa. Poszczególne elementy należy pobierać do badań niezależnie od tego, czy eksperymentator przypuszcza lub przewiduje, że dane elementy okażą się dobre lub niedobre. Metodę pobierania „na ślepo” można stosować, gdy numerowanie elementów do losowania za pomocą tablicy liczb przypadkowych jest technicznie utrudnione lub ekonomicznie nieuzasadnione.

## Literatura podstawowa do rozdziału 5

1. Gniedenko B. W. i inni: *Metody matematyczne w teorii niezawodności*. WNT, Warszawa 1968 r.
2. Gołąbek A.: *Eksploatacja i niezawodność maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988 r.
3. Hebda M., Janicki D.: *Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji WKiŁ*, Warszawa 1977 r.
4. Juran J. M., Frank M., Gryna J. R.: *Jakość - projektowanie, analiza*. WNT, Warszawa 1978 r.
5. Mańczak K.: *Technika planowania eksperymentu*. WNT, Warszawa 1976 r.
6. Oktaba W.: *Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalna*. PWN, Warszawa 1983 r.
7. Polański Z.: *Współczesne metody badań doświadczalnych*. Biblioteka Wiedzy Współczesnej, Omega, Warszawa 1978 r.

## 6. TECHNIKA OBRÓBK I WNIOSKOWANIA STATYSTYCZNEGO

Dana z badań eksploatacyjnych



Rys. 33. Schemat blokowy analizy z wyników eksploatacyjnych badań niezawodności

Zebrane podczas badań informacje muszą być wstępnie obrobione, aby następnie można było przeprowadzić odpowiednie wnioskowanie statystyczne i merytoryczne. Schemat blokowy analizy wyników z badań eksploatacyjnych pokazano na rys. 33. Do poszczególnych bloków przypisano hasłowo odpowiedni aparat techniki statystycznych obliczeń.

## 6. 1. Wstępne opracowanie wyników

Wstępne opracowanie wyników badań eksploatacyjnych ma na celu uporządkowanie w szereg statystyczny realizacji badanej zmiennej, a następnie wyznaczenie i odrzucenie z tego szeregu danych wskazujących na duży błąd pomiaru. Wynikiem wstępnego opracowania jest zestawienie danych w postaci tablicy uporządkowanych wartości liczbowych, które mogą być następnie pokazane graficznie w postaci histogramu.

**Histogram** przedstawia empiryczny rozkład badanej zmiennej w próbkę. Jest on podstawą do wnioskowania o postaci rozkładu teoretycznego, który opisuje rozkład badanej zmiennej w populacji generalnej obiektów.

W celu scharakteryzowania zmiennej losowej  $T_k$ , którą może być dowolna badana przez nas funkcja, należy podać jej rozkład (co w praktyce jest niewygodne), albo należy podać parametry tego rozkładu. Parametrami rozkładu nazywamy pewne wielkości liczbowe, obliczone dla teoretycznego prawa rozkładu zmiennej losowej.

Parametry rozkładu teoretycznego, np normalnego, wykładniczego itp. ocenia się na podstawie parametrów rozkładu empirycznego (z próbki).

Parametrami rozkładu empirycznego nazywamy wielkości liczbowe, obliczone na podstawie obserwacji  $t$ , zmiennej losowej  $T_k$  uzyskanych z prób. Charakteryzują one rozkład empiryczny.

W celu pewnego scharakteryzowania analizowanego zbioru (jako pewnego pola) należy podać:

- liczebność zbioru ( $n$ ),
- miarę położenia ( $\bar{T}_k$ ) - wymiar pionowy tego pola,
- miarę rozproszenia ( $\sigma$ ) - wymiar poziomy tego pola.

Informacja o liczebności zbioru jest niezbędna do obliczeń pozostałych wielkości.

**Miara położenia** określa punkt grupowania się wartości zmiennej losowej. Takim punktem jest wartość średnia z próby:

$$\bar{T}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_{ik} \quad (32)$$

**Miara rozproszenia** charakteryzuje rozrzut wartości  $t_i$  względem miary położenia  $\bar{T}_k$ . Stosowane jest tu najczęściej tzw. odchylenie standardowe  $\sigma$ .

– przy ocenie rozrzutu wyników w badanej próbie o ilości  $n$ :

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (t_{ik} - \bar{T}_k)^2}{n}}, \quad (33)$$

– przy ocenie rozrzutu wyników w całej populacji:

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (t_{ik} - \bar{T}_k)^2}{n-1}}, \quad (34)$$

gdzie:  $T_{ik}$  - wartość doświadczalna zmiennej  $T_k$ ,  
 $n$  - liczba wykonanych prób eksploatacyjnych.

Uwaga praktyczna:

Wartość przeciętna  $\bar{T}_k$  i odchylenie standardowe  $\sigma_n$  lub  $\sigma_{n-1}$  mogą być wyznaczone bezpośrednio za pomocą kalkulatorów z funkcjami statystycznymi.

Na podstawie parametru  $\bar{T}_k$  oraz  $\sigma_n$  z próbki są estymowane (szacowane): wartość oczekiwana i odchylenie standardowe  $\sigma_{n-1}$  zmiennej losowej  $T_k$  dla całej badanej populacji. **Estymator wartości oczekiwanej** zmiennej  $T_k$  równy jest średniej wartości

$$\bar{T}_k = u = \bar{T}.$$

Jest to zasadne na podstawie twierdzenia Chinczyzna, które głosi, że ciąg zmiennych losowych dąży stochastycznie do wartości przeciętnej w populacji generalnej. Otrzymuje się więc teoretyczną podstawę do tego, aby średnią arytmetyczną próbki móc w przybliżeniu przyjąć jako wartość przeciętną populacji. Należy tu mieć jednak na uwadze fakt, że twierdzenie jest graniczne, a zbieżność stochastyczna. Stąd okazuje się potrzeba oceny poziomu pewności i przedziału ufności takiego postępowania w zależności od liczby pomiarów  $n$ . Odchylenie standardowe wartości średniej  $\bar{T}$  w próbce opisuje wzór:

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{\sigma_n}{\sqrt{n}}, \quad (35)$$

a zatem przedział ufności  $\bar{T}$  wynosi  $\pm 2\sigma_{\bar{T}}$  (przy 95% poziomie ufności) lub  $\pm 3\sigma_{\bar{T}}$  (przy 99% poziomie ufności).

**Estymator odchylenia standardowego** zmiennej  $T_k$  w populacji, obliczany jest według wzoru (34), przy czym: pomiędzy wartością odchylenia standardowego dla próbki  $\sigma_n$ , a wartością  $\sigma_{n-1}$  dla populacji zachodzi związek:

$$\sigma_{n-1} = \sigma_n \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (36)$$

Jest to estymator nieobciążony odchylenia standardowego zmiennej  $T_k$  w populacji.

Na podstawie analizy rozkładu empirycznego zmiennej  $T_k$ , odbieramy jeden z najbardziej pasujących rozkładów teoretycznych. Analizę rozpoczynamy zazwyczaj od sprawdzenia czy można zastosować rozkład normalny  $N(\bar{T}, \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}})$ . Jest to możliwe, jeżeli stosunek odchylenia standardowego do średniej  $\bar{T}$  jest mniejszy lub równy od 0.33:

$$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{T}} \leq 0.33 \quad (37)$$

Bez dysponowania materiałem doświadczalnym trudno jest ustalić, jaki jest model rozkładu innego niż normalny. Trudność tę napotyka się nawet wtedy, jeśli dysponujemy niezbyt dużą liczbą danych. Dobór właściwego modelu wymaga bowiem pewnego doświadczenia inżynierskiego.

Postępowanie ułatwić mogą szkice rozkładów wykonane na siatkach rozkładów. Do korzystania z takich siatek dane doświadczalne powinny być zebrane w odpowiedniej tablicy. Przykład takiej tablicy podano poniżej-tabl. 18.

Tabl. 18. Tablica danych do obliczenia ryzyka uszkodzenia prądnic (fragment)  
do korzystania z siatki rozkładu Weibulla

Nr kolejny	Nr odwrotny	czas pracy prądnic	intensywność uszkodzeń	skumulowana intensywność uszkodzeń
$i_k$	$K$	$t_i$ [godz.]	$\lambda$ [%]	$H$ [%]
1	2	3	4	5
1	70	4.500 +	1.43	1.43
2	69	4.600		
3	68	11.500 +	1.47	2.90
4	67	11.500 +	1.49	4.39
5	66	15.600		
6	65	16.000	1.54	5.93
.	.	.		
.	.	.		
.	.	.		
70	1	115.000		

Przedstawiono w niej fragment tablicy danych, będącej podstawą do korzystania z siatki rozkładu Weibulla, dla 70 prądnic objętych badaniami



czasu pracy do uszkodzenia (12 prądnic uszkodzonych oznaczonych +), oraz czasu pracy bieżącej 58 prądnic, w których nie wystąpiły uszkodzenia.

Przy opracowaniu tablicy danych należy spełnić następujące - niezbędne do dalszego przetwarzania - warunki:

1. Dane winny być uszeregowane pod względem długości czasu pracy, od najmniejszego do największego, niezależnie od tego, czy wystąpiło uszkodzenie czy też nie. Dane te ujmuje kolumna 3 tablicy.
2. W czwartej kolumnie podano wartości współczynnika intensywności uszkodzeń  $\lambda$ . Wartość tego parametru uzyskuje się jako iloraz 100 przez liczbę  $K$  - będącą odwrotnym numerem prądnicy w uporządkowanym szeregu danych doświadczalnych, tj. obiektów pozostających w badaniach, dla których czasy do uszkodzenia lub czasy pracy bieżącej są większe (kolumna druga). Tak np. dla szóstej prądnicy o czasie do uszkodzenia 16000 godzin, wartość  $K = 65$ , a zatem wartość intensywności uszkodzeń  $\lambda = 100/65 = 1.54\%$ .
3. Kolumna piąta ujmuje skumulowaną intensywność uszkodzeń  $H$ . Podane w poszczególnych wierszach wartości  $H$  stanowią sumę wartości intensywności uszkodzenia  $\lambda$  z poprzednich wierszy. Tak np. dla szóstej prądnicy wartość  $H$  wynosi:

$$1.43 + 1.47 + 1.49 + 1.54 = 5.93.$$

**Uwaga:** Przy takiej konstrukcji tablicy danych wartości  $H$  mogą być większe od 100%.

Otrzymane wartości skumulowanej intensywności uszkodzeń  $H$  przenosi się na siatkę założonego rozkładu teoretycznego i sprawdza, czy układają się one liniowo. Jeżeli możliwe jest aproksymowanie punktów doświadczalnych linią prostą, uznajemy wybrany rozkład teoretyczny za dostatecznie pasujący. Jeśli daje się zauważyć krzywiznę rozkładu punktów, należy wybrać inny rozkład (inną siatkę).

Zacznijmy jednak od początku.

Aby móc określić postać rozkładu empirycznego, wyniki badań muszą być wcześniej odpowiednio uporządkowane. Zazwyczaj bowiem wyniki tych badań otrzymuje się w kolejności ich pozyskiwania. Dane uporządkowane w kolejności rosnących wartości czasu  $t$  tworzą szereg uporządkowany. Jeżeli zauważa się, że wyniki skrajne wyraźnie różnią się od pozostałych, można domniemywać, że zaistniał błąd obserwacji, bądź też wynik ten jest błędny ze względu na niedotrzymanie warunków badań. Należy zatem zastosować weryfikację tych wyników odpowiednim testem (Grebbs'a lub Dixona). Przykład posługiwania się testem Grebbs'a pokazano dalej (w p. 6. 2.).

W celu zbudowania histogramu, dane grupuje się w pewnych przedziałach liczbowych (klasach). Liczbę tych klas określa się z góry. Otrzymuje się w ten sposób **szereg rozdzielczy** wyników badań eksploatacyjnych. W szeregu rozdzielczym ważną rolę odgrywa wybór prawidłowej długości klasy, tj. długości przedziału czasowego  $t$ .

Do  $i$ -tej klasy szeregu rozdzielczego są zaliczane wartości zmiennej  $T$ , które mieszczą się w przedziałach obustronnie otwartych, określonych granicami tej klasy ( $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ). W przypadku, gdy pewna liczba  $l$  wartości zmiennej  $T$  jest równa granicy dwu sąsiednich klas, postępowanie jest następujące:

- dla  $l$  będącej liczbą parzystą,  $\frac{1}{2}$  tych wartości zaliczanych jest do klasy wyższej i  $\frac{1}{2}$  do klasy niższej,
- dla  $l$  będącej liczbą nieparzystą,  $\frac{l+1}{2}$  tych wartości zaliczanych jest do klasy wyższej i  $\frac{l-1}{2}$  do klasy niższej.

Liczba klas i ich granice powinny być tak dobrane, aby:

1. Liczba klas szeregu rozdzielczego była nie mniejsza od 5,
2. Liczba wartości zmiennej  $T$ , należących do poszczególnych klas, (z wyjątkiem klasy pierwszej i ostatniej) była co najmniej równa 5 - 7,
3. Rozpiętość klas (z wyjątkiem skrajnych) była równa.

Dokładność późniejszych obliczeń jest tym większa, im większa jest liczba i mniejsza rozpiętość klas szeregu rozdzielczego.

W ręcznej obróbce wyników badań, metodą wyznaczania szeregu rozdzielczego jest **metoda równych przedziałów klasowych**, dla której długości przedziałów są sobie równe. Według tej metody realizacje  $T_i$ , uporządkowane w szereg statystyczny niemalejących wartości od najmniejszej do największej, dzielimy na  $K$  przedziałów klasowych o jednakowej długości  $= \Delta t$ . Przybliżoną wartość  $K$  można wyznaczyć z następującej zależności empirycznej:

$$K \cong 1 + 3.32 \cdot \lg n \quad (37)$$

gdzie:  $n$  - oznacza liczbę realizacji badanej zmiennej,

$\lg$  - logarytm dziesiętny liczby  $n$

Wobec powyższego, długość przedziału klasowego  $\Delta t$  może być wyznaczona z zależności:

$$\Delta t = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{K} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{1 + 3.32 \cdot \lg n} \quad (38)$$

W praktycznym zastosowaniu metoda równych przedziałów klasowych stwarza określone trudności, bowiem histogramy budowane tą metodą w istotny sposób zależą od liczby  $K$  i są mało czułe na skupianie się realizacji badanej cechy w poszczególnych przedziałach klasowych. Stanowi to przyczynę ograniczonych możliwości zastosowania rezultatów badań, a wynik końcowy budowy histogramu w obróbce „ręcznej” w dużym stopniu zależy od intuicji i doświadczenia badacza.

W przetwarzaniu maszynowym stosowana jest **metoda równych prawdopodobieństw**. Istota tej metody polega na tym, że stałe są tu: przyjęta w przedziałach liczba zdarzeń, częstość empiryczna, gęstość prawdopodobieństwa oraz liczba przedziałów klasowych  $K$ , natomiast nieustalona jest długość tych przedziałów klasowych. Oznacza to, że częstość trafienia do każdego z  $K$  przedziałów określonej liczby zdarzeń jest jednakowa. Metoda równych prawdopodobieństw ma większą czułość od metody równych przedziałów, co pozwala na dokładniejsze określenie charakterystycznych własności rozkładu empirycznego. Opis metody równych prawdopodobieństw wraz z algorytmem budowy szeregu rozdzielczego podano w pracy Hebdy i Janickiego [5].

**Przykład** działań przy metodzie równych przedziałów klasowych. Zbadano trwałość noży tokarskich  $T$  [min], wykorzystując do tego celu próbkę o licznosci  $n = 40$  i otrzymano następujące wyniki:  $T = 46.6; 48; 48.5; 51.5; 52; 52.5; 51.5; 52; 52.5; 54; 55; 56.6; 57; 58; 58.5; 59; 59.5; 60; 61; 63; 63; 63.5; 64; 64; 64.5; 65; 65; 65; 65.5; 67; 67; 69; 69; 72; 72.5; 74; 75; 75; 79$  oraz 160 - który został odrzucony z dalszych analiz po weryfikacji wg testu Grebbs'a.

Wobec powyższego:  $T_{min} = 46.5$  min,  $T_{max} = 79$  min,  $K = 1 + 3.32 \cdot \lg 40 = 6.4$ ; przyjęto 7 klas,  $\Delta t = \frac{79 - 46.5}{7} = 4.6$  przyjęto  $\Delta t = 5$  min (należy zaokrąglić do wartości dogodnych dla rysowania histogramu).

**Środkiem klasy**  $t_i$  w metodzie równych przedziałów klasowych jest średnia arytmetyczna granic klasy (tabl. 19).

**Liczebność klasy**  $n_i$  jest określana liczbą wartości zmiennej  $T$  mieszczących się w klasie.

**Liczebność skumulowana klasy**  $N_i$  jest obliczana jako suma liczebności klasy rozpatrywanej i klas ją poprzedzających.

Tabl. 19. Przykład tablicy szeregu rozdzielczego

Nr kl.	Granice klasy	Środek klasy	Liczebność klasy	Liczebność skumulowana	Częstość klasy Gęstość prawdop.	Częstość skumulowana klasy (dystrybuanta)	Niezawodność
	$t_{min-max}$	$\bar{t}_i$	$n_i$	$N_i$	$f(T)$	$F(T)$	$R(T)$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	45-50	47.5	3	3	0.075	0.075	0.925
2	50-55	52.5	5	8	0.125	0.200	0.800
3	55-60	57.5	7	15	0.175	0.375	0.625
4	60-65	62.5	10	25	0.250	0.625	0.375
5	65-70	67.5	8	33	0.200	0.825	0.175
6	70-75	72.5	5	38	0.125	0.950	0.050
7	75-80	77.5	2	40	0.050	1.000	0.000
		$\bar{T} = 62.52$	$\sigma_n = 8.03$	$\sigma_{n-1} = 8.13$			

Częstością klasy  $f(T)$  nazywany jest iloraz liczebności rozpatrywanej klasy i liczebności wszystkich klas szeregu rozdzielczego. Charakteryzuje ona gęstość prawdopodobieństwa rozkładu empirycznego zmiennej losowej  $T$ .

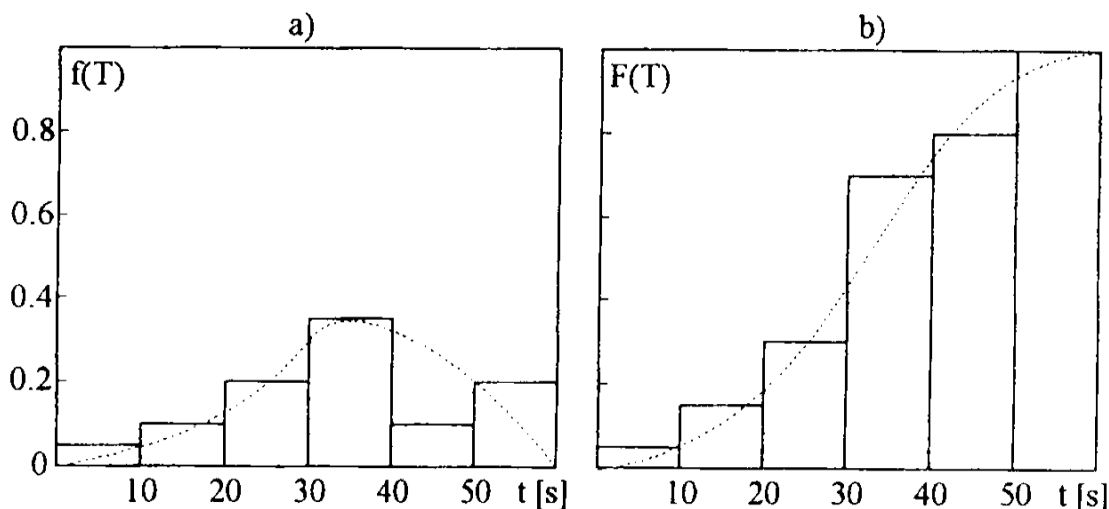
Częstość skumulowana klasy  $F(T)$  obliczana jest jako suma częstości rozpatrywanej klasy i klas ją poprzedzających. Częstość ta charakteryzuje dystrybuantę badanego rozkładu trwałości. Z niej możemy wyznaczyć funkcję niezawodności  $R(T)$ , korzystając z podanej wcześniej zależności, że  $R(t) = 1 - F(t)$ .

W tabl. 19 zamieszczono również wartości średniej trwałości  $\bar{T}$  oraz odchylenia standardowe:  $\sigma_n$  i  $\sigma_{n-1}$ . Gdy dysponujemy danymi zestawionymi w postaci rozkładu częstości  $f(T)$ , kolumna 6, to do znalezienia wartości średniej i odchylenia standardowego wystarczy krótkie obliczenie: mnożąc kolejne wartości z kolumny 5 z odpowiednimi wartościami z kolumny 6 i sumując je zgodnie z wzorami (32, 33, 34)

W oparciu o tak zestawione dane, wykonuje się histogram szeregu rozdzielczego i wykres dystrybuanty empirycznej.

**Histogramem** nazywa się wykreślne przedstawienie szeregu rozdzielczego, wykonane w następujący sposób: na osi poziomej odkłada się odpowiednie przedziały klasowe (czasowe), zaś na osi pionowej rzędne odłożone tak, aby pola odpowiednich prostokątów były proporcjonalne do liczebności danych klas - rys. 34a. Dystrybuanta powstaje przez skumulowanie kolejnych słupków z histogramu. Na osi poziomej odkłada się dolne granice klasy, na osi pionowej

zaś wartości dystrybuanty empirycznej. Wykresem dystrybuanty empirycznej jest krzywa schodkowa. Punkty skoku odpowiadają granicom przedziałów - rys. 34b.



Rys. 34. a) Histogram szeregu rozdzielczego i b) jego dystrybuanta empiryczna

Jeśli chcemy przedstawić dane w postaci **diagramu**, to łączymy linią łamaną punkty środkowe wierzchołków poszczególnych słupków (nie pokazując już samych słupków).

Histogram i diagram ułatwiają wybór rozkładu teoretycznego (cienka linia), pozwalającego uogólnić wyniki otrzymane dla próbki na całą populację, a tym samym dokonać prognozowania niezawodności wszystkich wyrobów danego typu.

## 6. 2. Wyrównywanie wyników pomiarów

Nawet przy prawidłowym przeprowadzeniu badań doświadczalnych wyniki mogą różnić się między sobą dość istotnie. Zasadne jest zatem pytanie: jak istotnie? - aby można było je przyjąć jako reprezentatywne dla danego badania. Badanie jest tym **precyzyjniejsze**, im więcej wyników grupuje się wokół wartości średniej, a więc im mniejsza jest wartość odchylenia standardowego  $\sigma_{\bar{T}}$ .

Wartość średnia uzależniona jest zatem od rozrzutu otrzymanych wyników. Przypadkowy wynik, leżący w znacznej odległości od pozostałych, może bowiem mocno przesunąć położenie wartości średniej od miejsca największego grupowania się wyników badań. Wartość średnia z badań jest zatem także wartością losową wyznaczoną z pewnym prawdopodobieństwem (wzór 35). Przyjmuje się, że rozrzut wartości średniej  $\bar{T}$  opisywany jest odchyleniem standardowym  $\sigma_{\bar{T}}$ , powiązany z odchyleniem standardowym w populacji  $\sigma_{n-1}$  oraz licznnością próby  $n$ , wg zależności:

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (39)$$

Wzór powyższy ujmuje związek pomiędzy błędem pomiaru a liczbą pomiarów. Chcąc np. zmniejszyć do połowy błąd pomiaru, wymagane jest czterokrotne (a nie dwukrotne) powiększenie liczby pomiarów.

Zakładając rozkład normalny rozrzutu wartości średniej  $\bar{T}$ , oraz 1% błąd pomiaru, otrzymuje się przedział ufności wartości średniej równy  $\pm 3\sigma_{\bar{T}}$ . Jeżeli założymy natomiast 5% błąd pomiaru, to przedział ufności wartości średniej  $\bar{T}$  wynosi wówczas  $\pm 2\sigma_{\bar{T}}$ . W przedziale tym winny się zatem znaleźć średnie wartości uzyskiwane z różnych prób, pobranych z tej samej populacji.

Najprostszym i najczęściej stosowanym sposobem podniesienia precyzji badań jest eliminacja z dalszych analiz wyników znacznie odbiegających od pozostałych. Do oszacowania tych wyraźnie różniących się wartości  $t_i$  ze zbioru otrzymanych wyników, stosuje się zazwyczaj kryterium Grebbs'a. Kolejność postępowania przy posługiwaniu się kryterium Grebbs'a jest następująca:

1. Z pełnego zbioru otrzymanych danych oblicza się wartość średnią  $\bar{T}$  i odchylenie standardowe  $\sigma_n$
2. Wyznacza się wartość  $\eta$  dla wyników  $T_i$ , które uważać można, że są odbiegające od pozostałych (skrajne w uporządkowanym szeregu statystycznym)

$$\eta = \left| \frac{T_i - \bar{T}}{\sigma_n} \right| \quad (40)$$

3. Odszukuje się w tablicy (tabl. 20) wartości kryterium Grebbs'a, przyjmując z góry ryzyko  $q$  popełnienia błędu (błąd dopuszczalny).

Jeżeli odzuczana w tablicy wartość  $\eta_q$  będzie spełniała relację  $\eta_q \leq \eta$ , to wyróżniającą się wartość  $T_i$  należy odrzucić. Jeżeli zachodzi relacja odwrotna, tzn  $\eta_q > \eta$ , można pozostawić do dalszych analiz.

**Przykład.** W tablicy 19 podano wartości: średniej  $\bar{T} = 62.52$  oraz  $\sigma_n = 8.03$ , dotyczące czasów do uszkodzeń noży tokarskich. W szeregu rozdzielczym tych wyników wyróżniał się czas  $T_i = 160$ . Wyznaczono dla niego wartość  $\eta$ :

$$\eta = \left| \frac{160 - 62.52}{8.03} \right| = 12.13$$

Kryterium Grebbs'a dla 40 pomiarów, przy największym dopuszczalnym błędzie  $q = 5\%$  wynosi  $\eta_q = 2.048$ . Wobec tego, zachodzi relacja  $\eta_q \leq \eta$ , wartość  $T_i = 160$  min należy odrzucić z szeregu rozdzielczego.

Oczyszczony szereg rozdzielczy (i powstały z niego histogram) jest podstawą wnioskowania statystycznego. Ma ono na celu poznanie rozkładu badanej cechy w populacji generalnej, zbadanie ewentualnego wpływu zmiany czynników na wartości średnie badanych cech mierzalnych, względnie też wyznaczenie przedziałów ufności wartości średnich tych cech.

Tabl. 20. Wartości krytyczne Grebbs'a dla odrzucenia wyraźnie wyróżniających się wartości ze zbioru wyników badań

N	q = 0.05	q = 0.02	q = 0.01	q = 0.001
2	$T_{iq} = 15.561$	68.973	77.964	779.696
3	4.969	8.042	11.460	36.484
4	3.558	5.077	6.530	14.468
5	3.041	4.105	5.043	9.432
6	2.777	3.635	4.355	7.409
7	2.616	3.360	3.963	6.370
8	2.508	3.180	3.711	5.773
9	2.431	3.058	3.536	5.314
10	2.372	2.959	3.409	5.014
11	2.327	2.887	3.310	4.791
12	2.291	2.829	3.233	4.618
13	2.261	2.782	3.170	4.481
14	2.236	2.743	3.118	4.369
15	2.215	2.710	3.075	4.276
16	2.197	2.693	3.038	4.198
17	2.181	2.658	3.006	4.131
18	2.168	2.637	2.997	4.074
19	2.156	2.618	2.953	4.024
20	2.145	2.602	2.932	3.979
21	2.135	2.587	2.912	3.941
22	2.127	2.575	2.895	3.905
23	2.119	2.562	2.880	3.874
24	2.112	2.552	2.865	3.845
25	2.105	2.541	2.852	3.819
26	2.099	2.532	2.840	3.769
27	2.094	2.524	2.830	3.775
28	2.088	2.517	2.820	3.755
29	2.083	2.509	2.810	3.737
30	2.079	2.503	2.802	3.719
40	2.048	2.456	2.742	3.602
60	2.018	2.411	2.683	3.492
120	1.960	2.562	2.576	3.291

### 6. 3. Prognozowanie na podstawie rozkładu normalnego

Rozkład wielu cech obiektów technicznych (zwłaszcza cech jakościowych) może być uważany w przybliżeniu za rozkład normalny, opisany wzorem:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (41)$$

gdzie:  $u$  - wartość średnia,

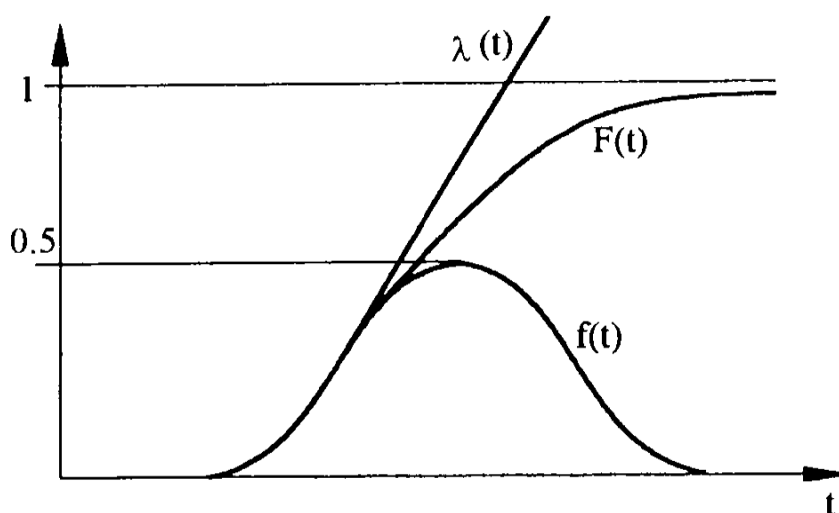
$t$  - wartość bieżąca czasu,

$\sigma$  - odchylenie standardowe (w populacji  $=\sigma_{n-1}$ ).

Do prognozy prawdopodobieństwa poprawnej pracy obiektu, wzór ten wymaga oszacowania jedynie średniej ( $u$ ) i odchylenia standardowego  $\sigma_{n-1}$  w tej populacji oraz skorzystania z tablic lub programu komputerowego (tabl. 21).

Można przyjąć, że wyniki badań mają rozkład normalny, jeżeli współczynnik zmienności  $v$  (iloraz odchylenia standardowego do średniej) jest mniejszy niż 0.33 ( $\frac{\sigma}{u} \leq 0.33$ )

Rozkład normalny jest stosowany jako aproksymacja rozkładu trwałości obiektów nienaprawialnych oraz apraksymacja trwałości obiektów będących na etapie docierania. Przebieg podstawowych funkcji dla tego typu rozkładu pokazano na rys. 35.



Rys. 35. Schemat przebiegu funkcji rozkładu normalnego

Krzywa rozkładu normalnego ma bliski związek z rozkładem częstości i jego histogramem. W miarę jak liczność próbki wzrasta, a szerokość każdego przedziału zmniejsza się, górna skokowa linia histogramu zbliża się do krzywej rozkładu teoretycznego. Tak więc kształt histogramu próbki daje pewną

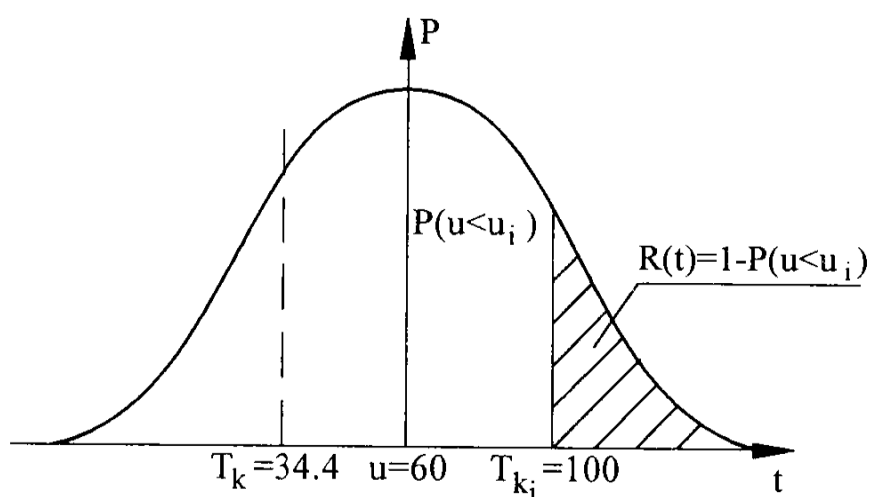


wskazówkę, dotyczącą typu rozkładu, który występuje w populacji badanych obiektów.

Narzędziem umożliwiającym ilościową ocenę wszelkich założeń dotyczących rozkładu są odpowiednie testy zgodności (najczęściej test chi-kwadrat). Test ten umożliwia sprawdzenie zgodności rozkładu empirycznego z różnymi typami rozkładów teoretycznych. Przy dzisiejszym rozwoju oprogramowania komputerowego test ten należy do jednego ze standardowych programów statystycznych i nie jest tu szerzej omawiany.

Metodykę postępowania w tym względzie można znaleźć np. w pracy [1].

**Przykład:** zbadano, że rozkład trwałości żarówek jest rozkładem normalnym, bowiem przy badaniu próbki składającej się z 50 żarówek, średnia trwałość wynosiła 60 dni a odchylenie standardowe 20 dni. Jaki procent żarówek w populacji będzie przypuszczalnie wymagał wymiany po 100 dniach świecenia. Na rys. 36 pokazano ten problem za pomocą wykresu. Środek krzywej leży nad punktem oznaczającym 60 dni. Zadanie polega na znalezieniu pola powierzchni pod krzywą poza punktem oznaczającym 100 dni.



Rys. 36. Rozkład długości życia żarówek

Powierzchnia poza punktem 100 wyznacza prawdopodobieństwo tego, że trwałość dowolnej żarówki będzie większa niż 100 dni.

W celu znalezienia dowolnego punktu na krzywej  $f(t)$  należy obliczyć wartość zmiennej unormowanej  $u_i$ :

$$u_i = \frac{T_{ik} - u}{\sigma_{n-1}} \quad (42)$$

gdzie:  $T_{ik}$  - wartość poszukiwanej zmiennej losowej  $t$  (danego punktu),

$u$  - wartość przeciętna (średnia z badań),

$\sigma_{n-1}$  - odchylenie standardowe dla populacji.

Tabl. 21. Dystrybuanta  $F(T)$  rozkładu normalnego

$u$	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
-3	0.0014	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
-2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
-2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.002	0.0019
-2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
-2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
-2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
-2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0061
-2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
-2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0126	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
-2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
-2	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
-1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
-1.8	0.0359	0.0352	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
-1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
-1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
-1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
-1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0722	0.0708	0.0694	0.0681
-1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
-1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
-1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
-1	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
-0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
-0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2025	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
-0.7	0.2420	0.2389	0.2389	0.2327	0.2297	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
-0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2613	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2454
-0.5	0.3085	0.305	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
-0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
-0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3591	0.3557	0.3520	0.3483
-0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
-0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0	0.5000	0.5040	0.508	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5339
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5861	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7703	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9235	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9430	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9485	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9575	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9700	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9762	0.9767
2	0.9773	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9865	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9933	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9958	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9983	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990

W danym przypadku  $u_i = \frac{100-60}{20} = 2$ . W tabl. 21 odszukujemy, że dla tej wartości  $u$ , wartość dystrybuanty trwałości  $F(T)$  rozkładu normalnego wynosi  $P(u < u_i) = 0.9773$ . Zatem niezawodność  $R(t)$  dla żarówek należących do tej populacji wynosi:  $R(t) = 1 - 0.9773 = 0.0227$ . Oznacza to, że 2.27% żarówek z badanej populacji będzie świeciło dłużej niż 100 dni.

Można też postawić inne pytanie: jaki będzie czas świecenia tych żarówek, aby ich niezawodność była większa niż 0.9 (przy czym dane jak wyżej, tj.  $u = 60$  oraz  $\sigma_{n-1} = 20$ ).

Wymagana trwałość żarówek wynosi wobec tego:

$$F(T) = 1 - 0.9 = 0.1$$

Dla tej wartości dystrybuanty trwałości rozkładu normalnego, wartość zmiennej unormowanej wynosi  $u = -1.28$  (wartość odczytana z tabl. 21).

Z przekształconego wzoru ( 42 ):

$$T_{ik} = u_i \cdot \sigma_{n-1} + u = 1.28 \cdot 20 + 60 = 34.4 \text{ dni.}$$

Zatem przy żądanej niezawodności 0.9, czas niezawodnej pracy żarówek z badanej populacji wynosi 34.4 dni (rys. 36).

## 6. 4. Prognozowanie na podstawie rozkładu wykładniczego

Funkcję opisującą rozkład wykładniczy oraz przykład wyznaczania niezawodności według tego rozkładu podano w rozdziale 4. 3. Do postawienia prognoz odnoszących się do populacji o rozkładzie wykładniczym, wystarczy oszacowanie tylko średniej  $u$  z tej populacji. W tym celu mierzy się np. czas między kolejnymi uszkodzeniami pewnej populacji obiektów i buduje się histogram. Otrzymanie hisogramu zbliżonego do krzywej wykładniczej daje podstawę przyjęcia rozkładu wykładniczego.

W tabl. 22 podano pola pod krzywą wykładniczą. Jeżeli dla żadanego czasu  $t$  i znanej średniej  $u$  obliczamy stosunek  $\frac{t}{u}$ , to oczekiwaną niezawodnością  $R(t)$  możemy odczytać bezpośrednio z tabl. 22.

Podane w tabl. 22 wartości są frakcjami całkowitej powierzchni (1.000) pod krzywą wykładniczą, na prawo od wartości  $t$ , tzn. są to wartości  $R(t)$  Jeżeli np. stosunek  $\frac{t}{u}$  wynosi 0.45, to prawdopodobieństwo zajścia zdarzeń dla większej wartości tego stosunku wynosi 0.6376. Zatem prawdopodobieństwo poprawnego wykonania przez obiekt powierzonych mu zadań (jego niezawodność) wynosi  $R(t) = 0.6376$  (jeżeli niezawodność ta jest zadana, to czas poprawnej pracy tego obiektu można wyliczyć według metodyki podanej przy rozkładzie normalnym).

Tabl. 22. Rozkład wykładniczy: wartość wyrażenia  $e^{-\frac{t}{u}}$ 

$\frac{t}{u}$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	1.0000	0.9900	0.9802	0.9704	0.9608	0.9512	0.9418	0.9324	0.9231	0.9139
0.1	0.9048	0.8958	0.8860	0.8781	0.8694	0.8607	0.8521	0.8437	0.8353	0.8270
0.2	0.8187	0.8106	0.8025	0.7945	0.7866	0.7788	0.7711	0.7634	0.7558	0.7483
0.3	0.7408	0.7334	0.7261	0.7189	0.7118	0.7047	0.6977	0.6907	0.6839	0.6771
0.4	0.6703	0.6637	0.6570	0.6505	0.6440	0.6376	0.6313	0.6250	0.6188	0.6126
0.5	0.6065	0.6005	0.5945	0.5886	0.5827	0.5769	0.5712	0.5655	0.5599	0.5513
0.6	0.5488	0.5434	0.5379	0.5326	0.5273	0.5220	0.5169	0.5117	0.5066	0.5016
0.7	0.4966	0.4916	0.4868	0.4819	0.4771	0.4724	0.4677	0.4630	0.4584	0.4538
0.8	0.4493	0.4449	0.4404	0.4360	0.4317	0.4274	0.4332	0.4190	0.4148	0.4107
0.9	0.4066	0.4025	0.3985	0.3946	0.3906	0.3867	0.3829	0.3791	0.3753	0.3716
$\frac{t}{u}$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
1.0	0.3679	0.3329	0.3012	0.2725	0.2466	0.2231	0.2019	0.1827	0.1653	0.1496
2.0	0.1353	0.1225	0.1108	0.1003	0.0907	0.0821	0.0743	0.0672	0.0608	0.0550
3.0	0.0498	0.0450	0.0408	0.0369	0.0334	0.0302	0.0273	0.0247	0.0224	0.0202
4.0	0.0183	0.0166	0.0150	0.0130	0.0123	0.0111	0.0101	0.0091	0.0082	0.0074
5.0	0.0067	0.0061	0.0055	0.0050	0.0045	0.0041	0.0037	0.0033	0.0030	0.0027
6.0	0.0025	0.0022	0.0020	0.0018	0.0017	0.0015	0.0014	0.0012	0.0011	0.0010

## 6. 5. Prognozowanie na podstawie rozkładu gamma

Rozkład gamma jest rozkładem bardziej uniwersalnym niż rozkład normalny i wykładniczy. Rozkład ten opisywany jest dwoma parametrami:

$\lambda$  - średnia intensywność wystąpienia uszkodzeń,

$\varphi$  - liczba uszkodzeń koniecznych do powstania niezdatności.

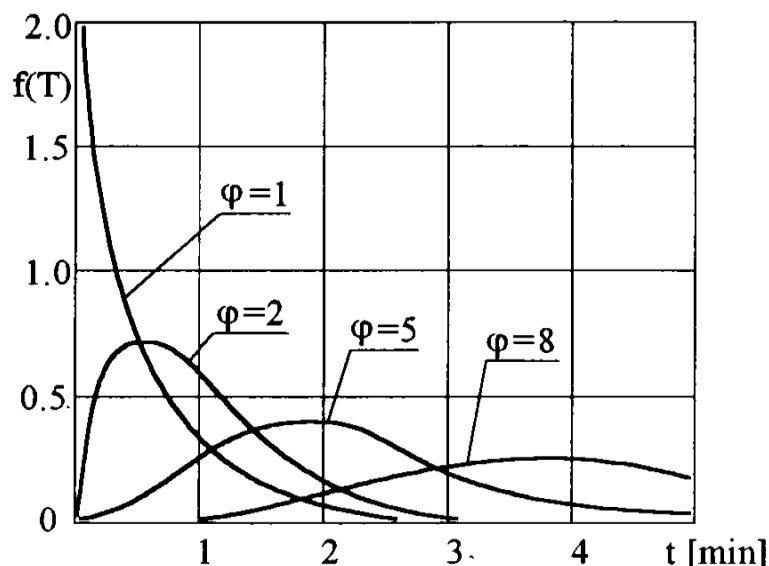
$$\lambda = \frac{\bar{T}}{\sigma_{n-1}^2} \quad (43)$$

$$\varphi = \left( \frac{\bar{T}_k}{\sigma_{n-1}} \right)^2 \quad (44)$$

gdzie:  $\bar{T}$  - wartość średnia badanego parametru

$\sigma_{n-1}$  - odchylenia standardowe w populacji.

W zależności od wartości parametrów  $\lambda$  i  $\varphi$ , funkcja gęstości prawdopodobieństwa ma różny przebieg - rys. 37.



Rys. 37. Rozkład gamma - kształt funkcji  $f(T)$  dla  $\lambda = 2$  i różnych wartości parametru  $\varphi$

Szczególnymi przypadkami rozkładu gamma są:

- rozkład wykładniczy,      gdy  $\varphi = 1$ ,
- rozkład normalny,      gdy  $\varphi > 12$ ,
- rozkład Erlanga,      gdy  $\varphi$  jest liczbą całkowitą.

Wartość dystrybuanty trwałości według rozkładu gamma można wyznaczyć na podstawie dystrybuanty rozkładu chi-kwadrat ( $\chi^2$ ) - tabl. 23. Jeżeli bowiem zmienna losowa  $T$  ma rozkład gamma o parametrami  $\lambda$  oraz  $\varphi$ , to zmienna losowa:

$$\chi = 2\lambda T_k \quad (44)$$

$$r = 2\varphi \quad (45)$$

ma rozkład chi - kwadrat o  $r = 2\varphi$  stopniach swobody.

**Przykład:** Badania trwałości ściernic ceramicznych stosowanych do szlifowania pierścieni łożysk tocznych ze stali ŁH 15 wykazały, że średnia trwałość tych narzędzi wynosi  $\bar{T} = 35.4$  s, a odchylenie standardowe  $\sigma_{n-1} = 19.5$  s.

Przeprowadzona analiza testem zgodności wykazała, że rozkład empiryczny trwałości tych ściernic może być opisany rozkładem gamma. Należy obliczyć prawdopodobieństwo niezawodnej pracy tych narzędzi w operacji, której czas maszynowy wynosi  $t_m = 48$  s ( $T_k = 48$  s).

**Sposób postępowania:** obliczono parametry rozkładu gamma:

$$\lambda = \frac{\bar{T}}{\sigma_{n-1}^2} = \frac{35.4}{19.5^2} = 0.093,$$

$$\varphi = \left( \frac{\bar{T}}{\sigma_{n-1}} \right)^2 = \left( \frac{35.4}{19.5} \right)^2 = 3.29.$$

Wartość nowej zmiennej  $X$ :

$$\chi = 2\lambda T_k = 2 \cdot 0.093 \cdot 48 = 8.9.$$

Dla rozkładu chi - kwadrat jest ona statystyką tego rozkładu, tj. ( $\chi \equiv \chi_\alpha^2$ ).

Ilość stopni swobody w rozkładzie chi - kwadrat:

$$r = 2\varphi = 2 \cdot 3.29 = 6.58$$

Z tablicy 23 odczytano prawdopodobieństwo  $P(\chi^2 < \chi_\alpha^2)$  dla wartości  $\chi_\alpha^2 \cong 9.0$  i  $r = 6.58$  (po interpolacji liniowej między najbliższymi liczbami całkowitymi dla  $r$ ). Wynosi ono:  $P = 0.793$  - co oznacza, że trwałość  $F(T) = 0.793$ . Prawdopodobieństwo niezawodnej pracy  $R(T)$  w czasie  $t_m = 48$  s wynosi  $R(T) = 1 - P = 1 - 0.793 = 0.207$ . Zatem można oczekiwać, że na 100 sztuk ściemnic z tej partii, użytych do operacji o czasie maszynowym  $t_m = 48$  s, 20 z nich wykona prawidłowo zadanie obróbcze.

Można też postawić zadanie odwrotnie: jaki może być czas maszynowy operacji szlifowania, aby prawdopodobieństwo niezawodnej pracy partii zakupionych ściemnic wynosiło 95%?

$$P = 1 - R(T) = 1 - 0.95 = 0.05,$$

$$\text{dla } r = 6.58 \text{ i } P = 0.05: \quad \chi_\alpha^2 = 2.$$

Z przekształcenia wzoru (44):

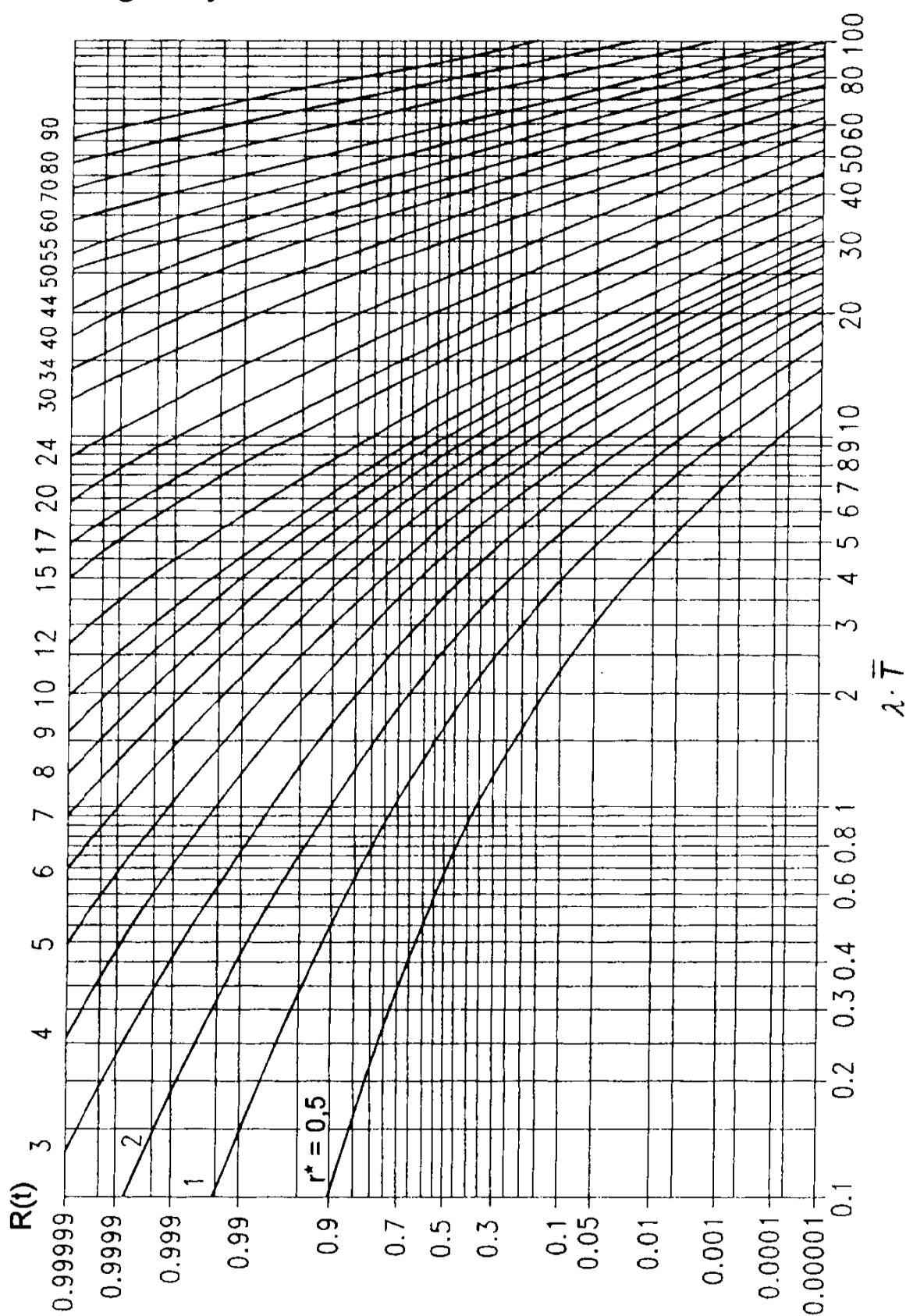
$$T_{0.95} = \frac{x}{2\lambda} = \frac{2}{2 \cdot 0.093} = 10.7 \text{ s}$$

Zatem dla takiej założonej niezawodności ściemnic, czas maszynowy operacji szlifowania nie mógłby być większy niż 10.7 s.

Tabl. 23. Dystrybuanta rozkładu chi-kwadrat; wartości prawdopodobieństwa  
 $P(\chi^2 < \chi_a^2)$

$\chi_a^2 \backslash r$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1	0.248	0.049	0.008	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	0.345	0.095	0.022	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.3	0.416	0.139	0.040	0.010	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.4	0.473	0.181	0.060	0.018	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	0.520	0.221	0.081	0.026	0.008	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.6	0.561	0.259	0.104	0.037	0.012	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
0.7	0.597	0.295	0.127	0.049	0.017	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000
0.8	0.629	0.330	0.151	0.062	0.023	0.008	0.003	0.001	0.000	0.000
0.9	0.657	0.362	0.175	0.075	0.030	0.011	0.004	0.001	0.000	0.000
1.0	0.683	0.393	0.199	0.090	0.037	0.014	0.005	0.002	0.001	0.000
1.1	0.706	0.432	0.223	0.106	0.046	0.018	0.007	0.002	0.001	0.000
1.2	0.727	0.451	0.247	0.122	0.055	0.023	0.009	0.003	0.001	0.000
1.3	0.746	0.478	0.271	0.139	0.065	0.028	0.012	0.004	0.002	0.001
1.4	0.763	0.503	0.294	0.156	0.076	0.034	0.014	0.006	0.002	0.001
1.5	0.779	0.528	0.318	0.173	0.087	0.041	0.018	0.007	0.003	0.001
1.6	0.794	0.551	0.341	0.191	0.099	0.047	0.021	0.009	0.004	0.001
1.7	0.808	0.575	0.363	0.209	0.111	0.055	0.025	0.011	0.005	0.002
1.8	0.820	0.593	0.385	0.228	0.124	0.063	0.030	0.013	0.006	0.002
1.9	0.832	0.613	0.407	0.246	0.137	0.071	0.035	0.016	0.007	0.003
2.0	0.843	0.632	0.428	0.264	0.151	0.080	0.040	0.019	0.009	0.004
3.0	0.917	0.777	0.608	0.442	0.300	0.191	0.115	0.066	0.036	0.019
4.0	0.954	0.865	0.739	0.594	0.451	0.323	0.220	0.143	0.089	0.053
5.0	0.975	0.918	0.828	0.713	0.584	0.456	0.340	0.242	0.166	0.109
6.0	0.986	0.950	0.888	0.801	0.964	0.577	0.460	0.353	0.260	0.185
7.0	0.992	0.970	0.928	0.864	0.779	0.679	0.571	0.463	0.363	0.275
8.0	0.995	0.982	0.954	0.908	0.844	0.762	0.667	0.567	0.466	0.371
9.0	0.997	0.989	0.971	0.939	0.891	0.826	0.747	0.658	0.563	0.468
10.0	0.998	0.993	0.981	0.960	0.925	0.875	0.811	0.735	0.650	0.560
11.0	0.999	0.996	0.988	0.973	0.949	0.912	0.861	0.798	0.724	0.642
12.0	0.999	0.998	0.993	0.983	0.965	0.938	0.899	0.849	0.787	0.715
13.0	1.000	0.995	0.995	0.989	0.977	0.957	0.928	0.888	0.837	0.776
14.0	1.000	0.999	0.997	0.993	0.984	0.970	0.949	0.918	0.878	0.827
15.0	1.000	1.000	0.998	0.995	0.990	0.980	0.964	0.941	0.909	0.868
16.0	1.000	1.000	0.999	0.997	0.993	0.986	0.975	0.958	0.933	0.900
17.0	1.000	1.000	0.999	0.998	0.995	0.991	0.983	0.970	0.951	0.926
18.0	1.000	1.000	1.000	0.999	0.997	0.994	0.988	0.979	0.965	0.945
19.0	1.000	1.000	1.000	0.999	0.998	0.996	0.992	0.985	0.975	0.960
20.0	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.997	0.994	0.990	0.982	0.971
$\chi_a^2 \backslash r$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
5.0	0.069	0.042	0.025	0.014	0.008	0.004	0.002	0.001	0.001	0.000
6.0	0.127	0.084	0.054	0.034	0.020	0.012	0.007	0.004	0.002	0.001
7.0	0.201	0.142	0.098	0.065	0.042	0.027	0.016	0.010	0.006	0.003
8.0	0.287	0.215	0.156	0.111	0.076	0.051	0.033	0.021	0.013	0.008
9.0	0.378	0.297	0.227	0.169	0.122	0.087	0.060	0.040	0.027	0.017

Nieco mniej dokładnie, ale za to znacznie szybciej, można przeprowadzić prognozowanie dla rozkładu gamma metodą graficzną, korzystając z wykresu przedstawionego na rys. 38.



Rys. 38. Nomogram do określenia niezawodności przy rozkładzie gamma



Na osi pionowej odłożone są prawdopodobieństwa niezawodnej pracy  $R(T)$  odpowiadające okresowi trwałości  $T$ , tj.:

$$R(T_k > T) = 1 - F(T)$$

Na osi odciętych odłożona jest wartość  $\lambda\bar{T}$ . Każda krzywa nomogramu odpowiada wartości  $r^* = \varphi - 1$ .

**Przykład:** wyznaczyć prawdopodobieństwo niezawodnej pracy noży tokarskich, jeżeli w trakcie prób wykazano, że rozkład trwałości noży jest rozkładem gamma. Średni okres trwałości  $\bar{T} = 245$  (trwałość noży podana jest w ilościach sztuk obrobionych wałków), a odchylenie standardowe  $\sigma_{n-1} = 71.68$ .

$$\lambda = \frac{\bar{T}}{\sigma_{n-1}^2} = \frac{245}{71.68^2} = 0.05;$$

$$\varphi = \left( \frac{\bar{T}}{\sigma_{n-1}} \right)^2 = \left( \frac{245}{71.68} \right)^2 = 11.7.$$

W przypadku badanych noży iloczyn:  $\lambda\bar{T} = 0.05 \cdot 245 = 12.25$  oraz  $r^* = 11.7 - 1 = 10.7$ . Na osi poziomej wykresu znajduje się  $\lambda\bar{T} = 12.25$ . Z tak określonego punktu prowadzi się prostą pionową do przecięcia się z linią  $r^* = 10.7$  (którą znajduje się stosując liniową interpolację między wartościami 10 a 12). Punkt przecięcia rzutuje się na oś pionową i znajduje się wartość  $R(T) = 0.45$ .

Można też postawić pytanie odwrotne: wyznaczyć czas niezawodnej pracy noży tokarskich z prawdopodobieństwem 0.99 dla danych:  $\lambda = 0,05$  i  $\varphi = 11,7$ .

Od punktu  $R = 0.99$  na osi pionowej prowadzi się linię do przecięcia z krzywą  $r^* = 10.7$ . Z punktu przecięcia opuszcza się prostopadłą na oś poziomą i odczytuje się wartość  $\lambda\bar{T} = 0.5$ . Wobec powyższego  $\bar{T}_{0.99} = \frac{5}{0.05} = 100$  min. Czas niezawodnej pracy tych narzędzi  $T_{0.99}$  wynosi zatem 100 min.

We wszystkich dotychczasowych przykładach zakładano, że badane narzędzia lub inne obiekty charakteryzowały się dobrą jakością początkową (tzn. po ich wyprodukowaniu), a zatem można było przyjąć, że niezawodność początkowa tych obiektów była równa jedności,  $R(0) = 1$ . Podobnie też, że istnieje zgodność warunków badań z przewidywanymi, a zatem

prawdopodobieństwo zgodności warunków środowiskowych obiektu  $P = 1$ . Jeżeli można sądzić, że występują różnice pomiędzy jakością obiektów poddawanych badaniom, a innych obiektów z danej populacji, lub też warunki środowiskowe są inne od zakładanych, to prawdopodobieństwo poprawnej pracy badanych obiektów musi być zmniejszone. Dokonać można tego przez wymnożenie prawdopodobieństw, np.: dane są niezawodności:  $R(T) = 0.92$  i  $R(0) = 0.95$ . Jaka będzie niezawodność rzeczywista tych obiektów?  $R = R(T) \cdot R(0) = 0.92 \cdot 0.95 = 0.874$ .

## 6. 6. Prognozowanie na podstawie rozkładu Weibulla

Stosowanie rozkładu Weibulla jest zalecane wówczas, gdy obiekty przechodzą do stanu niezdatności głównie na skutek zużycia nagłego, katastroficznego (pęknięcia, wylamania, wykruszenia itp.). Jest to najczęściej wykorzystywany rozkład w analizie niezawodnościowej. Z powodu złożonych obliczeń bardzo często korzysta się z metody graficznej i siatki rozkładu Weibulla - rys. 39. Na jednej z osi tej siatki naniesiona jest skumulowana intensywność uszkodzeń  $H$ , a na drugiej średni czas pracy  $u$ . Sposób przygotowania danych do analizy graficznej rozkładu Weibulla podano w rozdz. 6. 1. (przy opisie tabl. 19).

Dystrybuanta trwałości  $F(t)$  obiektu zużywającego się wg rozkładu Weibulla w czasie  $(0, t)$  może być obliczona z zależności:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t^b}{a}} \quad (46)$$

gdzie:  $a$  - parametr skali,  
 $b$  - parametr kształtu.

Aby określić parametr skali, wykorzystuje się fakt, że dla  $H = 100\%$  odpowiadający czas  $t = a$ . Do obliczenia parametru kształtu korzysta się natomiast z tego, że tangens nachylenia prostej aproksymującej wyniki doświadczeń naniesione na siatce, wynosi  $\lambda/b$ . Odczytuje się wartość  $b$  na dodatkowej skali, prowadząc prostą równoległą do prostej doświadczałnej przez stały punkt W (lewy górny róg siatki na wartości 3).

Na siatce z rys. 39. naniesiono graficzny obraz wyników doświadczalnych podanych w tabl. 19. Dla przykładu tego:  $a = 250$ ,  $b = 0.8$ . Korzystając z tych danych można obliczyć np. następujące zadania:

**Przykład 1:** Oszacować, na jaki okres można udzielić gwarancji, aby 95% produkowanych prądnic miało przebieg wyższy, niż objęty gwarancją (przy danych:  $a = 250$ ,  $b = 0,8$ ).

Na górnej osi poziomej znajdujemy punkt odpowiadający prawdopodobieństwu  $100 - 95 = 5\%$ , bo  $F(t) = 1 - R(t)$ .

Przesuwając się wzdłuż rzędnej 5% aż do prostej doświadczalnej odczytujemy wartość odciętej (1), która wynosi  $14 \times 10^3$  h. Jest to czas do uszkodzenia, którego prawdopodobnie nie osiągnie tylko 5% prądnic.

**Przykład 2:** Oszacować prawdopodobieństwo uszkodzenia  $F(t)$  prądnicy przed osiągnięciem  $100 \times 10^3$  h, jeśli rozkład uszkodzeń takich prądnic obrazuje prosta na rys. 39.

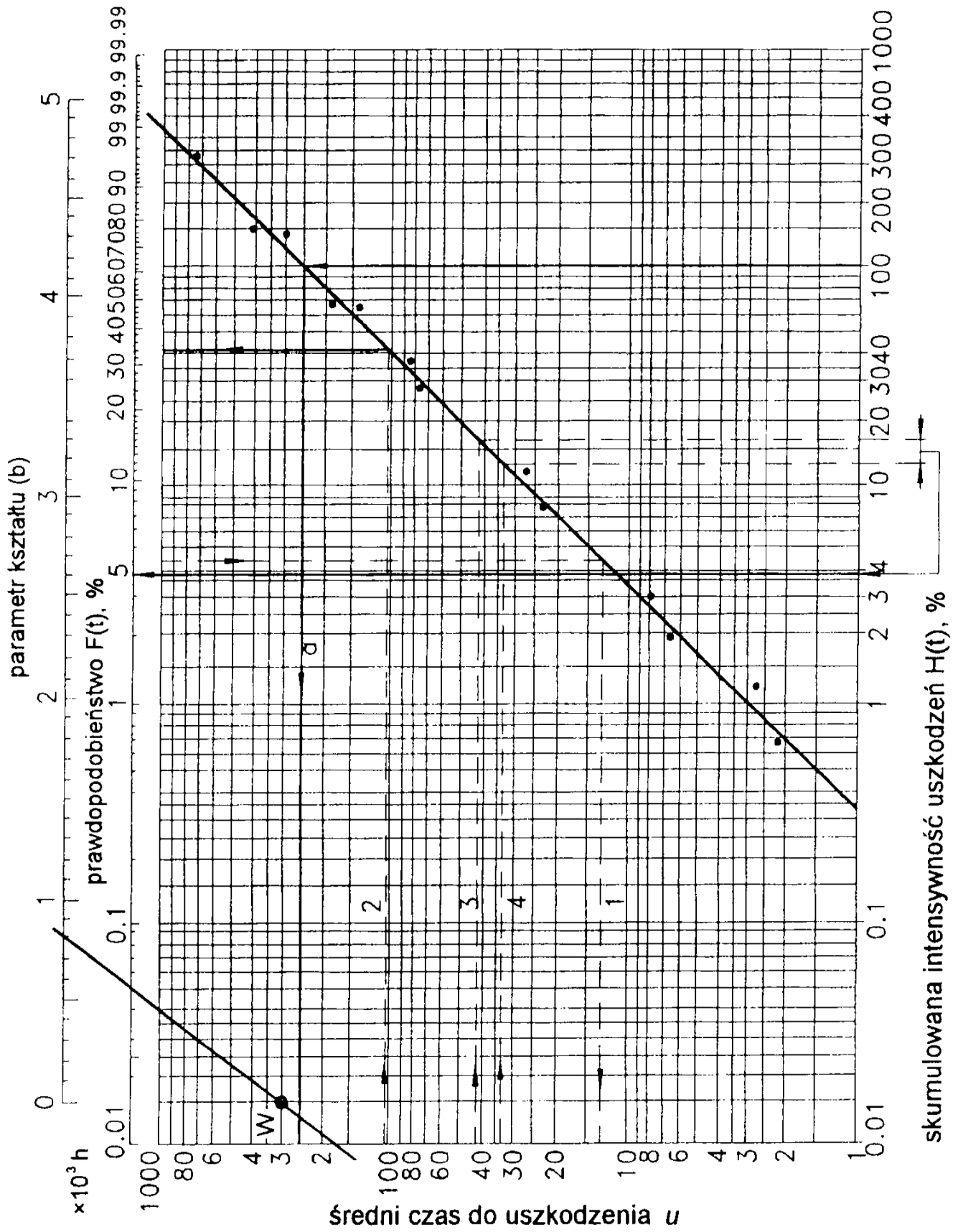
Na osi pionowej  $u$  odszukujemy wartość  $u = 100 \times 10^3$  h i przesuwając się wzdłuż odciętej 2 określamy punkt przecięcia się z prostą doświadczalną. Jego odcięta, odczytana na górnej skali poziomej określa prawdopodobieństwo uszkodzenia prądnicy w czasie  $100 \times 10^3$  h.

Prawdopodobieństwo  $F(t)$  wynosi 33%. Oznacza to, że na 100 takich prądnic, 33 ulegnie prawdopodobnie uszkodzeniu przed upływem tego czasu.

**Przykład 3:** Określić prawdopodobieństwo warunkowe, że prądnica, która przepracowała bez uszkodzenia  $32 \times 10^3$  h ulegnie uszkodzeniu przed upływem  $40 \times 10^3$  godzin.

Dla rzędnej  $32 \times 10^3$  h (przez doprowadzenie jej do prostej doświadczalnej) odczytujemy skumulowaną inensywność uszkodzeń  $H$  na dolnej skali poziomej. Wynosi ona 13%. Podobnie dla rzędnej  $40 \times 10^3$  h wartość  $H = 16,8\%$ . Różnica wynosi  $16,8 - 13 = 3,8\%$ . Odnajdujemy na dolnej skali poziomej wartość 3,8% i przesuwając prostą pionową odczytujemy odpowiedź na skali prawdopodobieństw uszkodzeń  $F(t) = 4,9\%$ .

Prawdopodobieństwo warunkowe, że prądnica, która przepracowała bez uszkodzeń  $32 \times 10^3$  h ulegnie uszkodzeniu przed osiągnięciem przebiegu  $40 \times 10^3$  h, wynosi zatem 4,9%.



Rys. 39. Siatka rozkładu Weibulla

---

## Literatura podstawowa do rozdziału 6

1. *Bartosiewicz J. : niezawodność narzędzi skrawających. WNT, Warszawa 1987*
2. *Barnet V. : Elementy teorii pobierania prób. PWN, Warszawa 1982*
3. *Brandt S. : Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych. PWN, Warszawa 1976*
4. *Firkowicz Sz. : Statystyczne badanie wyrobów. WNT, Warszawa 1970*
5. *Hebda. M., Janicki D. : Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji WKiŁ, Warszawa 1977*
6. *Mańczak K. : Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa 1976*
7. *Nowikow O. A., Uwarow W. N. : Rachunek prawdopodobieństwa w zagadnieniach eksploatacji i obsługi samochodów. WRiL, Warszawa 1971*
8. *Sadowski W. : Statystyka matematyczna. PWE, Warszawa 1969*
9. *Volk W. : Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1973*

## 7. TECHNIKI EKSPLOATACYJNE - WNISKOWANIE MERYTORYCZNE

Pod pojęciem wnioskowanie merytoryczne będziemy rozumieli ostateczne opracowanie wyników badań eksploatacyjnych (sprawozdanie z badań) w oparciu o wyniki wnioskowania statystycznego. Można tu zatem mówić o pewnych decyzjach eksploatacyjnych (prowadzeniu określonej polityki eksploatacyjnej), opartych na przesłankach wynikających z przeprowadzonych badań eksploatacyjnych niezawodności. Prowadzenie takiej polityki eksploatacyjnej może się odbywać na różnych poziomach decyzyjnych (dyrektora, głównego konstruktora, głównego technologa, czy też kierownika działu eksploatacji).

Sprawozdanie z badań eksploatacyjnych niezawodności winno zatem, oprócz prostoty języka, być zbiorem odpowiednio przygotowanych informacji dla tych decydentów do podjęcia określonych decyzji problemowych, a nie rozwiązywać problemu.

Każde badanie nie tylko eksploatacyjne składa się z kilku elementów, z których każdy może być wystarczającą całością badania, zależnie od celu.

Są to następujące elementy:

1. miary zjawiska (pomiar),
2. przewaga informacji wynikających z pomiaru, mniejszość informacji pochodzących z analizy,
3. przewaga informacji pochodzących z analizy, mniejszość z pomiaru,
4. informacje pochodzące z analizy,
5. informacje prognostyczne.

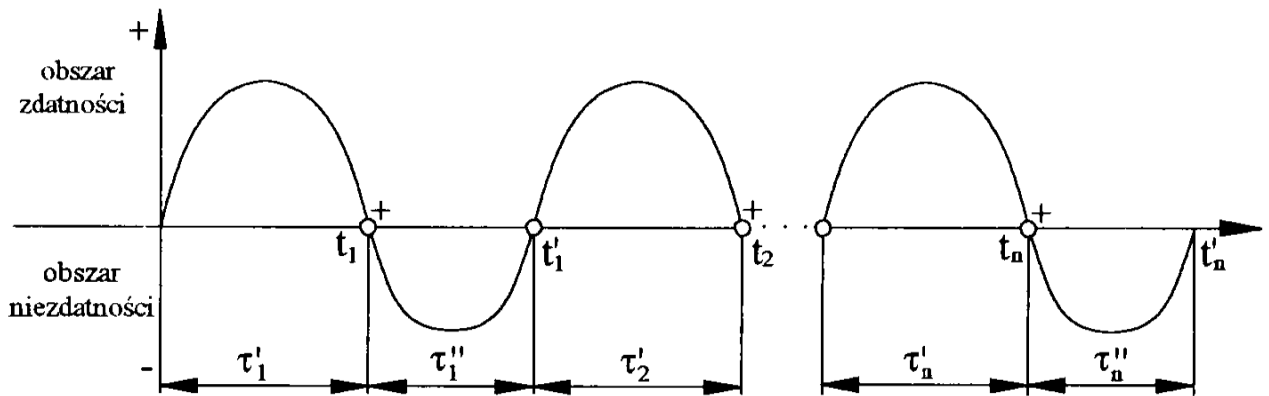
Im wyższy poziom decyzyjny, tym dominować winna przewaga informacji pochodzących z analizy i synteza (prowadząca do prognozy).

Treść merytoryczna sprawozdania powinna zatem uwzględniać poziom odbiorcy, co oznacza, że stopień szczegółowości opracowania musi być dostosowany do szczebla, na którym zapadają odpowiednie decyzje.

Ogólnie rzecz biorąc, w części I przygotowawanego sprawozdania z badań winien być zarysowany problem badawczy i wnioski syntetyczne z wyników badań (dla najwyższych szczebli decyzyjnych), a w części II winny być podane bardziej szczegółowe wyniki i wnioski z badań dla gruntowniejszych analiz.

W rozdziale niniejszym zarysowano pewne zagadnienia (techniki eksploatacyjne) z punktu widzenia inżyniera-mechanika konstruktora, lub technologa, pomocne do prowadzenia określonej polityki eksploatacyjnej.

Techniki eksploatacyjne obejmują sposoby, metody użytkowania i naprawialności określonych obiektów technicznych, związane z jego okresowym przechodzeniem ze stanu zdatności w stan niezdatności (rys. 40)



Rys. 40. Proces użytkowania i odnowy obiektu odnawialnego

- okres eksploatacji:  $\tau'_1, \tau'_2, \tau'_3$ ,

- okres odnowy  $\tau''_1, \tau''_2, \tau''_3$ ,

- chwile uszkodzenia:  $t_1, t_2, t_3$

Wszystkie techniki eksploatacyjne powinny prowadzić albo do wydłużenia czasów poprawnej pracy ( $\tau'$ ) albo do skrócenia czasów pozostawania w naprawie ( $\tau''$ ). W praktyce stosowana jest jedna i druga idea. Łączą się one ze sobą i tworzą wspólną teorię (odnowy i niezawodności). Z założenia dotyczącego zagadnień poruszanych w skrypcie (niezawodności) nie omawiane są w nim zagadnienia związane z odnową obiektów. Zastosowanie modeli obsługi masowej do wyznaczenia zapotrzebowania na części zamienne i materiały eksploatacyjne omówione są w skrypcie autora dotyczącym ćwiczeń pt. Ćwiczenia z eksploatacji.

Metodyka użytkowania i naprawialności, jako zbiór praktycznych metod postępowania (wg teorii odnowy i niezawodności), dotyczy w szczególności obiektów technicznych określonego typu, np. obrabiarek, maszyn przemysłu spożywczego, maszyn rolniczych, telewizorów itp. W niniejszym rozdziale podano jedynie ogólne metody postępowania, związane ze zwiększeniem lub utrzymaniem niezawodności obiektów mechanicznych, zwłaszcza obrabiarek lub złożonych z nich systemów produkcyjnych.

## 7. 1. Sterowanie niezawodnością obrabiarek

W czasie eksploatacji, obrabiarki, czy też inne obiekty, powinny spełniać zadania z niezawodnością założoną przy konstruowaniu i otrzymaną w produkcji. Etap eksploatacji jest odzwierciedleniem tych właściwości użytkowych, których obiekty te nabyły w swojej „młodości”, tj. w okresie projektowania i wytwarzania.

W tabl. 24 pokazano, jaki powinien być średni czas do pierwszego uszkodzenia obrabiarek w określonej klasie jakości.

Tabl. 24. Kryteria jakościowej oceny niezawodnościowej obrabiarek

Klasa jakości	Niezawodność	Średni czas $u$ (do pierwszego uszkodzenia lub między uszkodzeniami)
BW	bardzo wysoka	powyżej 2000 h
W	wysoka	1501 - 2000 h
S	średnia	1001 - 1500 h
N	niska	600 - 1000 h
BN	bardzo niska	poniżej 600 h

Klasyfikacja obrabiarek i systemów produkcyjnych wg stopnia ich niezawodności wynika głównie z przeznaczenia, zakresu uniwersalności oraz stopnia automatyzacji. Głównym czynnikiem decydującym o wyborze niezbędnego poziomu niezawodności jest jednak analiza skutków uszkodzenia obrabiarki, np.: inne będą dla obrabiarki uniwersalnej, a zdecydowanie inne dla centrum obróbczego.

Klasy niezawodności wg wskaźnika  $R(t)$  zamieszczono w tabl. 25, a w tabl. 26 podano wymagania niezawodnościowe określonych grup obrabiarek.

Tabl. 25. Klasy niezawodnościowe obrabiarek i systemów produkcyjnych wg wskaźnika  $R(t)$

Klasa niezawodności	0	1	2	3	4	5
Wskaźnik $R(t)$	0.9	0.9	0.99	0.999	0.9999	0.99999

Należy podkreślić, że przyporządkowanie podane w tabl. 26 dotyczy najniższych wymagań, które powinny być spełnione przez obrabiarki i systemy produkcyjne. Im bardziej rozwinięty system produkcyjny, tym doskonalsza powinna być jego struktura niezawodnościowa. Tendencją zatem jest dążenie do zwiększenia niezawodności obrabiarek w miarę tego, jak używane są one do tworzenia coraz bardziej złożonych systemów produkcyjnych.



Tabl. 26. Wymagania niezawodnościowe obrabiarek

Rodzaj obrabiarek i systemów produkcyjnych	Klasa	
	Jakość	Niezawodność
Obrabiarki uniwersalne, zespołowe, specjalne	N, S	1
Obrabiarki NC, CNC	S	1
Centra obróbkowe	W	1
Automatyczne stacje obróbkowe	W	2
Elastyczne gniazda obróbkowe	W	1
Elastyczne systemy obróbkowe	W	2
Elastyczne linie obróbkowe	BW	2
Elastyczne gniazda wytwórcze	W	2
Elastyczne systemy wytwarzania	BW	3
Elastyczne linie wytwórcze	BW	2
Linie automatyczne	BW	2
Wytwórnice bezzałogowe	BW	3

Program zapewnienia niezawodności obrabiarek winien zawierać:

- opis środków, jakie musi zastosować wytwórca w produkcji i poprawie jakości obiektu,
- zestawienie specyficznych zadań dotyczących niezawodności i sposób ich ustalania w programie niezawodności.

Plan programu niezawodności powinien wyszczególniać natomiast:

Kiedy ? - to powinno być zrobione (terminy wykonania).

Kto ? - jest odpowiedzialny.

Jak ? - to powinno być zrobione.

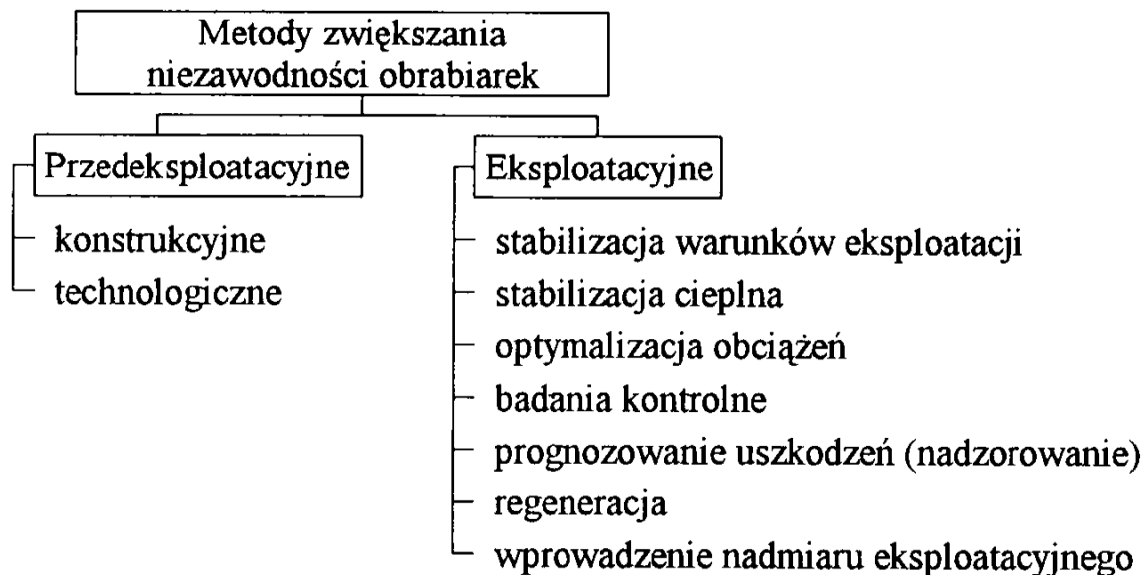
Ile ? - należy włożyć w to wysiłku (środki finansowe, technika itp).

Przeciwdziałanie skutkom uszkodzeń, które zawsze występują niezależnie od poziomu niezawodności obiektu, tyle że z różną intensywnością, polega na:

-stosowaniu metod diagnostycznych, które pozwalają na wcześniejsze wykrycie powstałego uszkodzenia lub przestrzegają przed nim, np. wskaźnik paliwa w samochodzie,

-podwyższeniu naprawialności, tzn skracaniu czasu na odnowienie po wystąpieniu uszkodzenia np. wymienialność całych podzespołów w urządzeniach elektronicznych.

Zapobieganie powstawaniu uszkodzeń obiektów technicznych, a tym samym przedłużanie ich „życia”, polega jednak głównie na podwyższaniu ich niezawodności. Można to uzyskać albo metodami przedeksploatacyjnymi lub eksploatacyjnymi (rys. 41).



Rys. 41. Klasyfikacja metod zwiększania niezawodności obrabiarek

W metodach przedeksploatacyjnych, metoda technologiczna jest, przy znacznej złożoności obiektu, mało efektywna ze względów ekonomicznych. Wymaga bowiem zróżnicowania parametrów jakościowych elementów, co przeczy unifikacji i jest w wielu przypadkach praktycznie nie możliwe do realizacji lub ekonomicznie nieuzasadnione. Często stosowaną odmianą tej metody jest selekcja wyrobów na grupy wymiarowe.

Znacznie korzystniejsze są metody konstrukcyjne, pozwalają bowiem, praktycznie bez większych ograniczeń, na budowę obiektów o dużej niezawodności z elementów o małej niezawodności - poprzez odpowiednią syntezę struktury niezawodnościowej (zastosowanie elementów rezerwowych).

Jeżeli zamierza się zwiększyć niezawodność „słabych” elementów, należy zidentyfikować rodzaje występujących procesów destruktywnych i następnie przystąpić do rozlicznych działań zwiększających odporność tych elementów na uszkodzenia. Mogą być przy tym stosowane np.: działania konstrukcyjne lub eksploatacyjne, polegające na zmianie:

- tworzywa elementu,
- rodzaju smarowania lub smaru,
- własności tarcowych powierzchni roboczych,
- grubości warstwy utwardzonej,
- trwałości powierzchniowej,
- założonej sztywności połączenia lub skojarzenia,

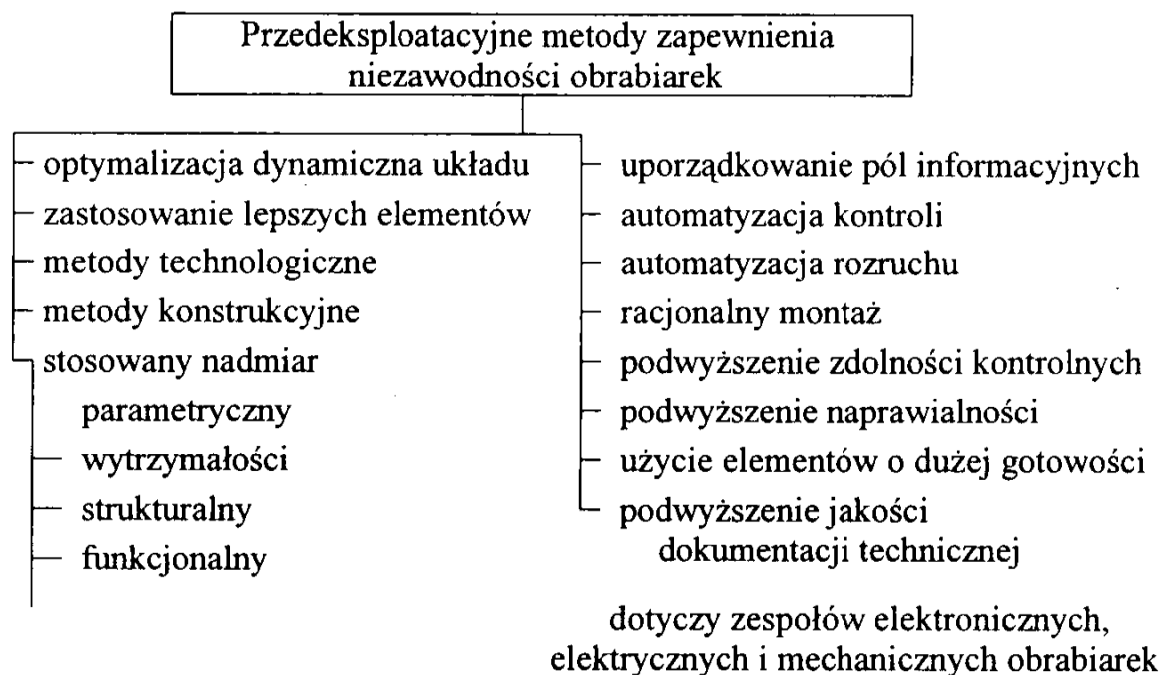
- wartości założonych luzów lub granic tolerancji,
- wymiarów i kształtu elementów,
- rodzaju pary tarcia.

Słaby element eliminuje się z obiektu, podwyższając jego niezawodność dowolnymi metodami. Przy czym właściwie każda z metod polega na pieczołowitym dopilnowaniu wymagań konstruktora (zadanie dla technologa) albo na interwencji konstruktora w postaci zaplanowanego odpowiednio nadmiaru w konstrukcji, tj. rezerwowań różnego typu (rys. 42.).

Rezerwowanie parametryczne stosowane jest od dawna w budowie maszyn i polega na stosowaniu odpowiednich współczynników bezpieczeństwa.

Rezerwowanie funkcjonalne polega na zaplanowaniu w strukturze systemu produkcyjnego dodatkowego „podsystemu”, który:

- pracuje na „luzie” i może w każdej chwili zastąpić właściwy układ, gdy ten ulegnie uszkodzeniu (rezerwa gorąca),
- jest gotowy do uruchomienia (rezerwa ciepła),
- jest gotowy do wymiany (rezerwa zimna).



Rys. 42. Klasyfikacja przedeksploatacyjnych metod zapewnienia niezawodności obiektów technicznych

Rezerwowanie umożliwia przekroczenie barier niezawodnościowych. Sposób podwyższania niezawodności poprzez nadmiar elementów w stosunku do koniecznego, jest niechętnie stosowany w obiektach mechanicznych ze względu na wysoki koszt, chociaż pewne przykłady są ogólnie znane

np. podwójne układy hamulcowe w samochodach. W złożonych systemach produkcyjnych takie rezerwowanie jest jednak coraz częściej stosowane ze względu na wysoki koszt przestoju awaryjnego systemu.

Każda konstrukcja (obiekt techniczny) charakteryzuje się właściwą jej niezawodnością potencjalną (przykłady podano w tabl. 26). Niezawodność potencjalna może być zrealizowana w procesie produkcji i eksploatacji obiektu tylko wówczas, gdy warunki wytwarzania i użytkowania nie odbiegają od zakładanych. W praktyce udaje się to niezmiernie rzadko i dlatego rzeczywista niezawodność obiektu jest znacznie niższa od potencjalnej. Należy to brać pod uwagę przy projekcie wstępnym i projektować wyższą niezawodność od wymaganej.

Za potencjalną, konstrukcyjną niezawodnością obiektu powinna następować również wysoka niezawodność produkcyjna, która też jest zwykle niższa od potencjalnej. Analiza informacji o uszkodzeniach powstałych podczas eksploatacji wykazuje, że część tych uszkodzeń spowodowana jest przyczynami produkcyjnymi. Aby udział tych uszkodzeń był jak najmniejszy, należy proces technologiczny odpowiednio przygotować i efektywnie kontrolować.

Nie zawsze udaje się (i nie zawsze jest celowe ekonomiczne) podwyższanie niezawodności poprzez zmniejszenie liczby uszkodzeń przypadających na zadany okres czasu. Wówczas podwyższa się ogólną użyteczność obiektu poprzez podwyższenie naprawialności. Dokonuje się tego w dwojaki sposób:

1. Wykonując obiekt tak, aby skutki przewidywanych uszkodzeń były usuwane w krótszym niż dotąd czasie, np. wymiana całych paneli elektronicznych.
2. Wykonując obiekt tak, aby usuwanie skutków powstałych uszkodzeń było mniej pracochłonne.

Określone wymagania niezawodnościowe mogą być sprawdzane i potwierdzone wyłącznie w trakcie eksploatacji. Konieczne jest zatem uruchomienie obiegu informacji od eksploatatora do konstruktora. Miejsce sporządzania takich informacji powinno być przypisane jak najbliżej źródła ich powstania, np. poprzez stosowanie automatyzacji kontroli, czy też tzw. nadzorowania. Nadzorowanie narzędzi lub innych szybko zużywających się elementów, jest standardowym rozwiązaniem w nowoczesnych systemach produkcyjnych. Mogą tu być stosowane np. metody ustalania czasu wymiany poprzez pomiar siły skrawania, czy też pomiar zużycia. Na bazie zgromadzonych informacji, możliwe jest stosowanie odpowiednich procedur (strategii eksploatacyjnych) utrzymania maszyn w ruchu.

## 7. 2. Metody utrzymania w ruchu obrabiarek

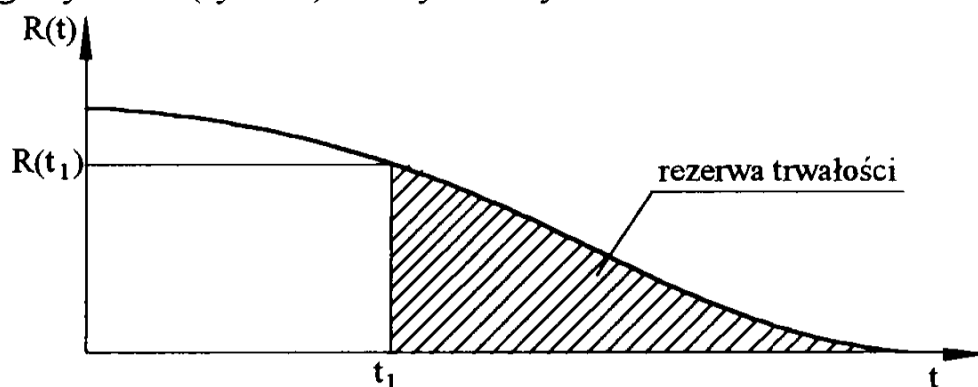
Pojęcie „utrzymania obiektu w ruchu” w sensie dosłownym rozumiane jest jako dążenie do podtrzymania funkcjonowania pracującego już urządzenia. W eksploatacji rozumiane jest jednak jako pojęcie w szerszym znaczeniu, tj. jako dążenie do maksymalnego, jeszcze jednak opłacalnego, wydłużenia okresów użytkowania urządzenia.

Ogólnie uważa się, że do zadań służb utrzymania ruchu w przedsiębiorstwie produkcyjnym należy zapewnienie niezawodnej pracy urządzeń technologicznych na poziomie uzasadnionym ekonomicznie. Powyższe osiąga się poprzez:

- czynności konserwacyjne,
- czynności remontowe,
- czynności prowadzące do przywrócenia pierwotnego stanu parku maszynowego, poprzez wymianę lub inne metody przywracania zdolności obiektów.

W Polsce, w zakresie remontów obrabiarek, funkcjonuje tzw. System Planowo-Zapobiegawczy Remontów. Obrabiarka pracuje w sztywnym cyklu dziewięcioremontowym o strukturze BBSBBSBK, gdzie: B - remont bieżący, S - remont średni, K - remont kapitalny, tzn. po dwóch remontach bieżących jest remont średni, a po dwóch remontach średnich obrabiarka poddawana jest remontowi kapitalnemu.

Podstawą przekazywania obrabiarki do remontu kapitalnego jest przepracowanie przez nią 24000 godzin, przy czym liczba ta jest modyfikowana przez szereg współczynników uzależnionych od warunków pracy obrabiarki. Do wad tego systemu (rys. 43) należy zaliczyć:

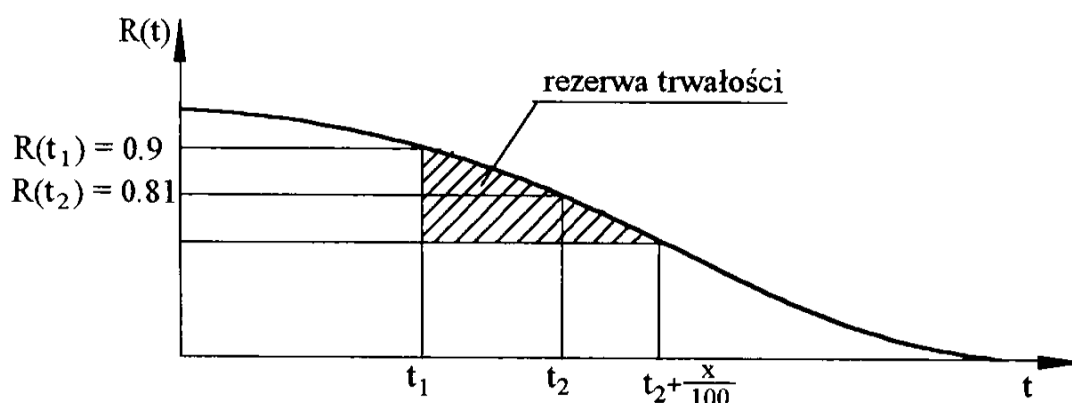


Rys. 43. Utrzymanie ruchu wg sztywnego planu cykli napraw: w systemie planowo-zapobiegawczym uwzględniono pierwszą naprawę. Powierzchnia zakresowana jest proporcjonalna do niewykorzystanej rezerwy trwałości

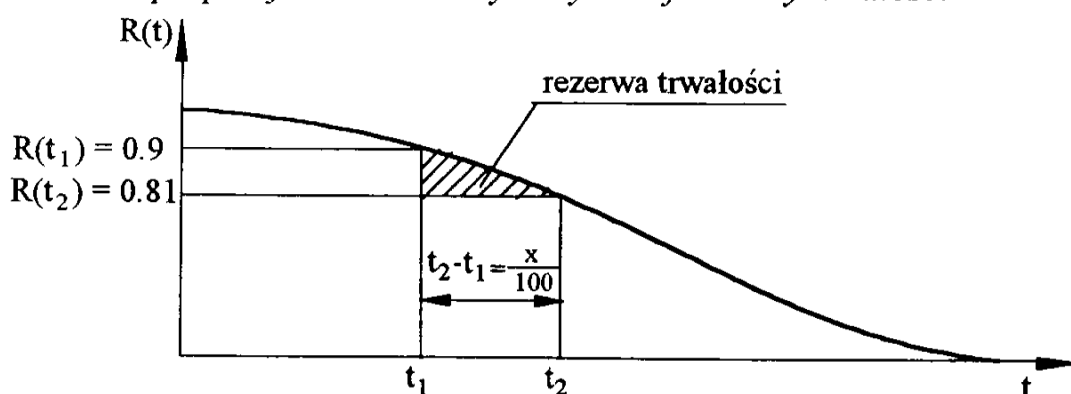
- kierowanie do remontu obrabiarek w oparciu o normatyw określany niezależnie od stanu technicznego,
- normatywy te nie uwzględniają postępu technicznego, jaki istnieje w budowie maszyn,
- system nie uwzględnia awarii ani częstości ich występowania.

Oprócz tego systemu (stopniowo usuwanego z praktyki przemysłowej) znane są również inne metody postępowania (strategie eksploatacyjne), takie jak:

- utrzymanie sterowane diagnostyką (rys. 44),
- utrzymanie wg metod mieszanych, częściowo sztywny plan, częściowo diagnostyka, którą można realizować ciągle lub okresowo (rys. 45).



Rys. 44. Metoda utrzymania w ruchu obrabiarek z zastosowaniem okresowej diagnostyki, przy zapewnieniu żądanej niezawodności i natychmiastowej naprawy (słuszna dla pierwszej odnowy). Powierzchnia zakreskowana jest proporcjonalna do niewykorzystanej rezerwy trwałości



Rys. 45. Metoda utrzymania ruchu z zastosowaniem diagnostyki ciągłej, przy zapewnieniu żądanej niezawodności, tj. napraw w ustalonym (na podstawie badania) terminie: słuszna dla pierwszej odnowy. Powierzchnia zakreskowana jest proporcjonalna do niewykorzystanej rezerwy trwałości. Oszacowano tu granicę rezerwy trwałości, pozwalającą na ustalenie ekonomicznie uzasadnionego terminu naprawy

Powyższe schematy wskazują dobitnie, w jakim stopniu rodzaj i odmiana przyjętej metody utrzymania ruchu wpływają na wykorzystanie trwałości obiektu. Wskazują też na fakt, jak ważnym zagadnieniem staje się diagnostyka techniczna.

Wybór metody i jej odmiany zależy od celu, jaki danej metodzie stawiamy i od możliwości jej stosowania w konkretnym przypadku. Schematy funkcjonalne tych metod pokazane na rys. 43-45 tworzą więc pewne strategie eksploatacji.

### **7. 3. Zadania i metody diagnostyki technicznej**

Jednym z najważniejszych wymogów utrzymania obiektów technicznych w ruchu jest znajomość ich rzeczywistego stanu. Cel ten przyświeca diagnostyce technicznej, zajmującej się zespołem przedsięwzięć (metod i środków), prowadzących do stwierdzenia stanu technicznego eksploatowanego obiektu. Diagnostyka techniczna grupuje swe zainteresowania w zakresie:

- analiz charakterystyk technicznych struktury urządzeń z punktu widzenia oceny ich stanu technicznego,
- metodyk badań, obejmujących planowanie badań i sposoby ich realizacji,
- technicznych środków realizacji.

Stara się zatem dać odpowiedź na 4 podstawowe pytania:

1. Co badać? (jaką cechę),
2. Jak badać? (metodyka badań),
3. Czym badać? (środki techniczne),
4. Jak wnioskować (powiązania strukturalne).

Realizacja zadań diagnostyki technicznej w obszarze ocen stanu niezawodnościowego elementów, lub całych obiektów technicznych, opiera się w każdym przypadku na kontroli stanu. Kontrola stanu elementów maszyn podatnych na regulację realizuje się głównie poprzez kontrolę parametrów zewnętrznych, np. temperatury, ciśnienia itp.

Kontrola stanu elementów maszyn podlegających procesom starzenia, zużycia, zmęczenia itp. odbywa się za pomocą badań nieniszczących. Takie i tylko takie badania oraz metody badań są szczególnie zalecane do stosowania i będą preferowane w przyszłości.

Można je podzielić na dwie podstawowe grupy:

1. Badania wymagające bezpośredniego kontaktu z urządzeniem, korpusem urządzeniem lub elementem maszyny.

2. Badania nie wymagające bezpośredniego kontaktu, możliwe do realizacji w sposób pośredni.

Do pierwszej grupy należą prawie wszystkie rodzaje nieniszczących metod defektoskopowych i metody pomiaru wibracji maszyn. Do drugiej grupy należą metody: izotopowa (znaczników izotopowych), badania zużycia elementów węzłów tribologicznych poprzez badanie produktów zużycia, defektoskopia rentgenowska i gamma radiografia, neutronografia, termowizja, badania drgań akustycznych, emisja akustyczna.

Utrzymanie w ruchu obiektu polega w istocie na podejmowaniu przez użytkownika, w każdej chwili, nowej decyzji dotyczącej postępowania z obiektem. Jednym z czynników wpływających na takie decyzje jest informacja o aktualnym stanie obiektów, a także o stanie przeszłym i przyszłym. Stąd też rola diagnostyki technicznej w systemie eksploatacji sprowadza się do podania użytkownikowi wiarygodnej informacji o aktualnym stanie obiektu.

Metoda diagnostyczna, jako metoda pomiaru, musi spełniać dwa zasadnicze warunki:

1. musi być powtarzalna,
2. wyniki jej muszą być jednoznaczne.

W Polsce diagnostyka jest wprowadzana do systemu eksploatacji (np. obrabiarek) w sposób mało zorganizowany. Nie sformułowano bowiem dotychczas precyzyjnie zadań pragmatycznych i nie wyznaczono jej miejsca w systemie eksploatacji, co czyni ją mało efektywną.

Nadrzędnym zadaniem diagnostyki technicznej jest optymalizacja systemu eksploatacji, rozumiana jako działalność na rzecz podniesienia niezawodności oraz jego funkcjonowania przy najniższych kosztach jednostkowych. Szczegółowy sposób realizacji tego zadania jest uzależniony od miejsca wyznaczonego diagnostyce w systemie eksploatacji (faza wytwarzania lub faza użytkowania).

W fazie wytwarzania zadaniem diagnostyki technicznej jest kontrola poprawności wykonania projektu i prototypu (projektowanie), a także jakości montażu mechanizmów, podzespołów i zespołów (produktowanie). Kontrola zdatności obiektu po jego wyprodukowaniu ma na celu stwierdzenie, czy nie ma w nim żadnej niesprawności (uszkodzenia). Negatywny wynik sprawdzeń oznacza przejście do lokalizacji i usunięcia niesprawności.

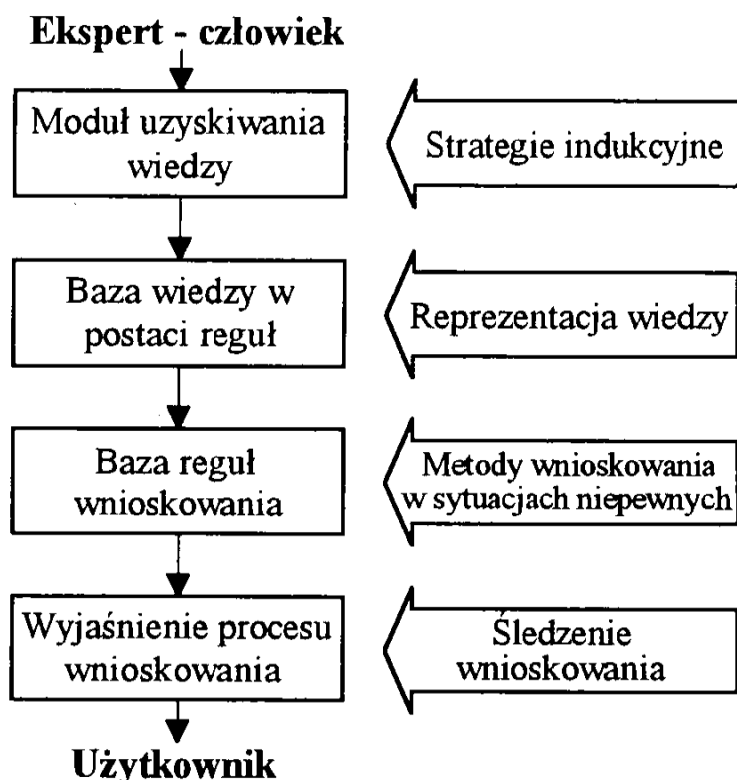
Faza użytkowania to ciągłe lub dyskretne diagnozowanie stanu obiektu (dozorowanie). Do tego celu wykorzystuje się przyrządy kontrolno- pomiarowe, sygnalizujące jakość funkcjonowania niektórych zespołów. Uzyskane w ten sposób informacje mają ograniczony zakres i nie wystarczają do podjęcia



właściwej decyzji odnośnie dalszego postępowania z obiektem. Dlatego też bardziej nowoczesne obiekty techniczne, lub o większym stopniu złożoności, wyposaża się w dodatkowe urządzenia diagnostyczno - decyzyjne (komputerowe), pozwalające zwiększać ilość informacji diagnostycznych i podejmować decyzje dotyczące zakresu czynności obsługowo-regulacyjnych w sposób automatyczny. Dotyczy to szczególnie dozoru szybko zużywających się narzędzi skrawających lub innych elementów obiektu.

Należy tu nadmienić również o coraz szerzej upowszechnianej idei systemów eksperckich (patrz Mechanik Nr 6/89).

Prace naukowo badawcze związane z budową systemów eksperckich są ciągle rozwijane i dlatego dotychczas nie uzgodniono ostatecznych ich ram oraz definicji. **Za system ekspercki uważa się system zawierający oprogramowanie przy użyciu którego można rozwiązywać problemy w pewnym wąskim obszarze wiedzy w sposób zbliżony do tego, w jaki robi to człowiek ekspert.** Uważa się również, że system ekspercki powinien dodatkowo zapewniać możliwość śledzenia i uwzględniania proponowanych rozwiązań - rys. 46.



Rys. 46. Typowa struktura systemu eksperckiego

Głównymi cechami systemu eksperckiego są:

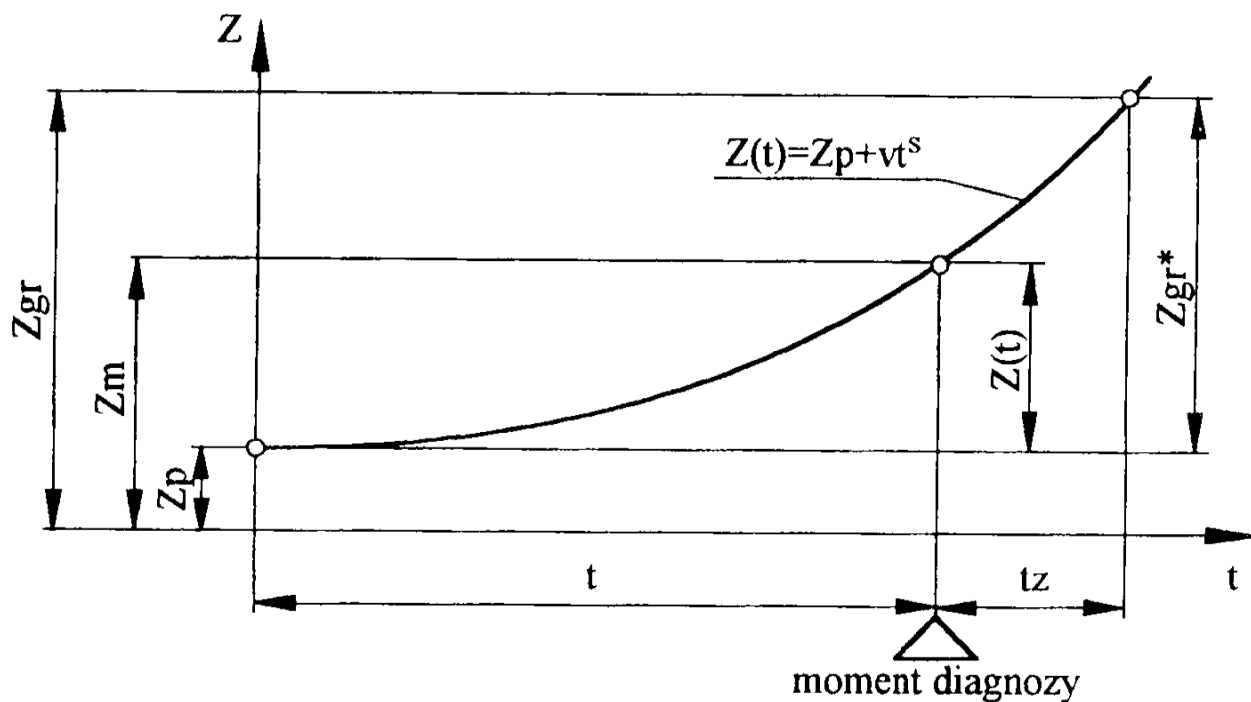
- przedstawienie niegeometrycznych danych do opisu części i urządzeń oraz ich funkcji,
- przedstawienie zasad wnioskowania i przetwarzania (przeliczania, zasad łączenia, doświadczenia),
- przedstawienie niegeometrycznego planowania rezultatów do opisu wybranych urządzeń i skomponowanych rozkładów włączając alternatywy i ich wymogi.

Projektant dodaje pewne swoje wymogi do większości uzyskanych automatycznie informacji. Następnie system ekspercki porównuje te wymogi z cechami wszystkich urządzeń przechowywanych w bazie danych. Wybrane zostają tylko te urządzenia, które spełniają wszystkie wymogi.

Jednym z elementów systemu eksperckiego jest moduł symulacji. W module tym, który powinien być obowiązkowo w oprogramowaniu, planista musi mieć możliwość obserwacji symulacji procesu montażu wyrobu przy użyciu wybranych wcześniej urządzeń. Podstawą do stworzenia symulacji powinien być wygenerowany przez system plik z informacją opisującą poszczególne urządzenia. tzn. gdzie i jak są one umiejscowione (zorientowane) oraz jak mają współpracować z innymi urządzeniami.

W tym module powinno także następować sprawdzanie urządzeń pod względem kolizyjności i szybkości działania.

Efektem procesu diagnozowania jest diagnoza techniczna, czyli identyfikacja stanu technicznego obiektu oraz jego przydatności do dalszej eksploatacji. Istotne znaczenie ma przy tym prognozowanie jako proces określania przyszłych stanów (które zaistnieją po chwili badania), na podstawie czego przewiduje się resurs sprawnej pracy  $t$ . Prognozowanie wymaga znajomości związków pomiędzy parametrami stanu  $Z$  i eksploatacyjną miarą starzenia  $t$ . Związki te ustalane są na ogół doświadczalnie. Ilustracją takiej zależności jest rys. 47.



Rys. 47. Wyznaczanie zapasu resursu przy znanym okresie pracy elementu od początku eksploatacji

$Z(t)$  - wartość diagnostycznego parametru stanu faktycznego,

$Z_p$  - wartość początkowa parametru diagnostycznego (po dotarciu maszyny),

$Z_{zm}$  - wartość zmierzona parametru stanu,

$Z_{gr}$  - wartość graniczna parametru diagnostycznego,

$v$  - intensywność zmian parametru na jednostkę starzenia,

$t$  - miara starzenia (czas, przebieg)

$t_z$  - zapas resursu

$s$  - wykładnik potęgi określający charakter zmian parametru stanu

Jeżeli znany jest przebieg zmienności parametru  $Z$  w funkcji miary starzenia  $t$ , np.  $Z(t) = Z_p + vt^s$ , można wyznaczyć parametr  $v$  i wtedy zapas resursu  $t_z$  określa zależność:

$$t_z = \frac{Z_{gr} - Z_{zm}}{v} \quad (47)$$

Na przykład: zmierzona za pomocą hamowni podwoziowej moc tracona w układzie pędym samochodu wynosi  $Z_{zm} = 26 \text{ KM}$ . W nowym, dotartym samochodzie moc tracona wynosiła  $Z_p = 20 \text{ KM}$ .

Od początku eksploatacji samochód ma przebieg  $t = 6000 \text{ km}$ . Wobec tego:  $Z(t) = Z_{zm} - Z_p = 6 \text{ KM}$  i średnia intensywność zmiany parametru wynosi  $v = 6 \text{ KM} / 60000 \text{ km} = 1 \text{ KM} / 10 \text{ tys. km}$ . Maksymalna dopuszczalna wartość

traconej mocy dla tego samochodu wynosi  $Z_{gr} = 32$  KM. Zatem zapas resursu układu pędowego tego samochodu wyniesie:

$$t_z = \frac{32-36}{\frac{1}{10000}} = 60000 \text{ km.}$$

W procesie diagnozowania poprzez pomiar parametrów  $Z$  określa się stany techniczne  $W$  obiektu. Odpowiednie wykorzystanie informacji o stanach  $W$  tego obiektu jest natomiast domeną teorii eksploatacji (eksploatyki), której zbiór praktycznych metod postępowania nosi nazwę technik eksploatacyjnych.

#### 7. 4. Przykład techniki poprawy niezawodności narzędzi ściernych

Poprawę niezawodności projektowej osiąga się przez zmianę istniejącego stanu, różnego rodzaju przedsięwzięciami.

Przedsięwzięcia te będą o tyle skuteczniejsze, jeżeli będą wyodrębniały najistotniejsze zagadnienia, które muszą być poprawione oraz będą starannie zaplanowane. Przy tym postępowaniu istotne znaczenie ma rozróżnienie między diagnozą a wynikającym z niej działaniem (wnioskowaniem merytorycznym).

Narzędziami niezwykle podatnymi na poprawienie ich niezawodności są narzędzia ściernie. Są to obiekty odnawialne o trwałości określonej ich charakterystyką techniczną. Właściwości eksploatacyjne tych narzędzi są dobierane do określonych warunków obróbczych (warunków środowiskowych  $x$ ) i mogą być zmienione w szerokim zakresie poprzez zmianę parametrów opisujących ich charakterystykę. Właściwości te poddają się zatem sterowaniu. Przy błędnie dobranej charakterystyce, okres trwałości  $T_f$  narzędzi będzie krótszy od czasu maszynowego operacji  $t_m$  i nie wykonają one swego zadania obróbczego - będą więc zawodne.

Dążeniem użytkownika (eksploatatora) jest zatem takie poprawienie charakterystyki narzędzi (ich jakości projektowej), aby z zawodnego stało się ono niezawodne.

Nie może on jednak mieć stuprocentowej pewności, że różne narzędzia ściernie o poprawionej charakterystyce będą niezawodne. Wynika to z faktu, że proces produkcji tych narzędzi jest procesem o dużym stopniu losowości, różnicującym właściwości eksploatacyjne poszczególnych egzemplarzy narzędzi z tej samej partii, wykonanej w tym samym czasie i przez tego samego producenta. Losowość właściwości eksploatacyjnych powiększa się jeszcze bardziej, jeżeli użyte będą narzędzia pochodzące od różnych producentów.

W jednej z fabryk, w operacji szlifowania pierścieni łożysk tocznych na automacie szlifierskim (ustalone i powtarzalne warunki obróbcze) okazało się, że z dostarczonej partii ściernic tylko niektóre egzemplarze były zdolne wykonać postawione zadanie obróbcze. Zaistniała zatem sytuacja badawcza, której celem było określenie przydatności dostarczonych ściernic do tej operacji oraz kierunków ewentualnych przedsięwzięć, zmierzających do wyeliminowania zakłócenia produkcji z tytułu wadliwych narzędzi.

Przeprowadzono badania eksploatacyjne naturalne wg planu  $(N, Z, r)$  na próbie 80 - elementowej (dostarczona partia ściernic liczyła 1000 szt.). W wyniku opracowania statystycznego danych doświadczalnych, zbudowano histogram pokazany na rys. 22 skryptu. Określono, że rozkład trwałości badanych ściernic opisany jest rozkładem gamma o parametrach:  $\lambda = 0.93$ ,  $\varphi = 3.29$ . Przykład analizy takiego rozkładu podano w p. 4. 1. skryptu, z której wynika, że niezawodność narzędzi z badanej populacji wynosi 0.2. Była zatem sytuacja niezadowolająca użytkownika i należało dokonać przedsięwzięć eksploatacyjnych na odpowiednim poziomie decyzyjnym.

#### **Wnioskowanie merytoryczne na szczeblu dyrektora technicznego.**

1. Należy zmniejszyć parametry obróbcze (warunki środowiskowe  $x$ ) danej operacji. Zmniejszy się zatem wartość funkcji obciążenia  $Q_F(t)$  i tym samym wydłuży się okres trwałości ściernic. Wniosek ten nie został przyjęty do realizacji z powodu wydłużenia czasu maszynowego operacji. Przy wydłużeniu tego czasu tylko o 10% dawało to dzienną stratę wydajności wynoszącą 120 sztuk łożysk.
2. Należy wyselekcjonować z dostarczonej partii narzędzia o odpowiadających właściwościach eksploatacyjnych. Obliczono że drogą tą może być zabezpieczona produkcja na 11 dni roboczych. Będzie to zatem czas na dokonanie nowego zamówienia ściernic o poprawionej charakterystyce. Pojawił się jednak problem diagnostyki kontrolnej tych narzędzi, a zatem należało dać odpowiedź na jej cztery zasadnicze pytania: co badać?, jak badać?, czym badać? i jak wnioskować?.

#### **Wnioskowanie merytoryczne na szczeblu kierownika działu oprzyrządowania narzędziowego.**

Jakość eksploatacyjna ściernic  $Q_o(t)$  jest zróżnicowana, co przy stosowaniu ich w tych samych warunkach obróbczych ( $a=const$ ) wskazuje, że zróżnicowany musi być składnik  $b$  funkcji  $Q_o = at+b$ , związany z jakością połączenia ziarna ze spoiwem (p. rys. 18b skryptu).

Wychodząc z teorii wytrzymałości materiałów kruchych (Griffitha) można zbudować najprostszy model wytrzymałościowy takiego połączenia (model tribologiczny). Wytrzymałość kruchego materiału wg tej teorii opisuje zależność:

$$\sigma = \frac{\sqrt{E\gamma}}{C} \quad (41)$$

gdzie:  $E$  - moduł sprężystości podłużnej,

$\gamma$  - energia powierzchniowa,

$C$  - długość krytycznej mikroszczeliny powierzchniowej.

Mikroszczeliny powierzchniowe rozwijają się aż do stanu krytycznego pod wpływem obciążeń, a zatem są zmienne w czasie (jest to zatem pierwszy składnik funkcji odpornościowej  $Q_o(t) = at + b$ . Poprawy sytuacji należy jednak szukać w parametrach niezmiennych w czasie, a zatem związanych ze składnikiem  $b$ . Moduł  $E$  i energia powierzchniowa  $\gamma$  są parametrem budowy tego narzędzia i nie ulegają zmianom w czasie, są to więc te parametry, które winny być przeanalizowane. Energia powierzchniowa zależna jest od zastosowanych materiałów ziarna i spoiwa. Nie chcemy zmieniać tych składników budowy narzędzia -  $\gamma$  jest więc dla nas wartością stałą. Moduł  $E$  zależy natomiast głównie od ilości tych składników użytych do produkcji narzędzia, które to mogą być zmieniane w procesie produkcji.

Dla tego samego rodzaju ziarna ściernego i spoiwa, moduł  $E$  może być więc dobrym kryterium wytrzymałości elementarnego układu (połączenia ziarna ze spoiwem). Jest to zatem odpowiedź na pytanie - co badać? Jako kryterium diagnostyczne-parametr ten winien być wyznaczony metodami nieniszczącymi. Adekwatną w tym względzie jest metoda akustyczna, oparta na związku modułu  $E$  i częstotliwości drgań własnych  $f$  drgającego ciała:

$$E = \left(\frac{f}{k}\right)^2 \cdot \rho \quad (48)$$

gdzie:  $k$  - współczynnik poprawkowy ze względu na kształt i rozmiary ściernic,

$\rho$  - gęstość ściernicy

Jest to zatem odpowiedź na pytanie - jak badać?

Krzystając z tej metody, zbadano wartości modułu  $E$  ściernic użytych do badań eksploatacyjnych, przyrządem ZWUK-107, co pozwoliło na opracowanie funkcji  $t = f(E)$ . Przebieg tej funkcji obrazuje rys. 14. skryptu (krzywa 3). Pozostałe krzywe opisują tę samą funkcję dla ściernic o różnej wartości energii powierzchniowej. Dano tym samym tu odpowiedź na pytanie - czym badać. Pozostało zatem tylko wnioskowanie merytoryczne.

Wykreślenie na funkcji  $t = f(E)$ , punktu odpowiadającego czasowi maszynowemu  $t_m$  danej operacji, pozwala wyznaczyć graniczną wartość modułu  $E$  (w tym przypadku  $E_{gr} = 47.5 \text{ kN/mm}^2$ ). Można więc oczekiwać, że ściernice o większych wartościach tego parametru będą miały okresy trwałości  $T$  większe od czasu maszynowego  $t_m$ . Wartość  $E_{gr}$  można w niewielkim zakresie zmienić poprzez zmianę rodzaju użytego spoiwa (zmiana energii powierzchniowej). Zmiany te w gruncie rzeczy są jednak niewielkie, co obrazuje rys. 14. skryptu. Należy więc dążyć do zmiany charakterystyki ściernicy poprzez zmianę proporcji jej składników - co odzwierciedla w charakterystyce technicznej twardość tego narzędzia, opisana symbolami literowymi skali Nortona.

Istnieje liniowa zależność pomiędzy twardością (E, F, G . . .) i wartością modułu  $E$ , przy czym zmianie o jeden stopień twardości narzędzia, o spoiwie ceramicznym odpowiada zmiana wartości modułu  $E$  o  $4.5 \text{ kN/mm}^2$ .

Zbadano, że w analizowanej partii ściernic, rozrzut modułu  $E$ , może być opisany rozkładem normalnym  $N(44.9; 2.78)$ . Zatem minimalna wartość tego parametru (przy założeniu poziomym ufności 95%) może wynosić:

$$E_{\min} = E - 2\sigma_{n-1} = 44.9 - 2 \cdot 2.78 = 39.3 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

Chcąc zatem podnieść niezawodność ściernic stosowanych w tej operacji, należałoby zachować warunek

$$E_{gr} \leq E_{\min}$$

Różnica między tymi wartościami wynosi  $47.5 - 39.3 = 8.2 \text{ kN/mm}^2$ . Biorąc pod uwagę, że przesunięciu o wartość o 1 stopień na skali literowej, odpowiada zmiana modułu  $E$  o  $4.5 \text{ kN/mm}^2$ , należałoby zmienić o 2 stopnie twardość tych ściernic tak, aby uzyskać większe prawdopodobieństwo tego, że wykonają one prawidłowo postawione zadanie obróbcze.

Aby obliczyć to prawdopodobieństwo należało wyznaczyć wartość zmiennej standaryzowanej  $u_i$ , rozkładu normalnego o wartości średniej  $E = 44.9 + 9$  i odchyleniu standardowym  $\sigma_{n-1} = 2.78$  oraz poszukiwanej wartości  $E_i = E_{gr}$ :

$$u_i = \frac{E_{gr} - \bar{E}}{\sigma_{n-1}} = \frac{47.5 - 53.9}{2.78} = -2.3$$

a następnie z tablicy rozkładu normalnego obliczyć wartość dystrybuanty trwałości  $F(t)$  dla warunku ( $u < u_i$ ). Wynosi ona 0.0107. Poszukiwana jakość

projektowana tych narzędzi, inaczej mówiąc ich niezawodność początkowa  $R(0)$  wynosi

$$R(0) = 1 - 0.0107 = 0.9893.$$

Można więc oczekiwać, że na 100 ściemnic o poprawionej charakterystyce, 99 z nich prawidłowo wykona postawione zadanie obróbcze. Zatem ściemnice o poprawionej charakterystyce technicznej winny w pełni zaspokoić wymagania użytkownika.

## Literatura podstawowa do rozdziału 7

1. *Hebda. M., Mazur T., Pelec H. : Teoria eksploatacji pojazdów. WKiŁ, Warszawa 1978*
2. *Karpiński J., Firkowicz S. : Zasady profilaktyki obiektów technicznych. PWN, Warszawa 1981*
3. *Konieczny J. : Wstęp do teorii eksploatacji urządzeń. WKiŁ, Warszawa 1971*
4. *Kopociński B. : Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa 1973*
5. *Mazur T. : Kierowanie eksploatacją urządzeń technicznych. OPT, Katowice 1972*
6. *Olearczuk E. : Zarys teorii użytkowania urządzeń technicznych. WNT, Warszawa 1972*
7. *Okreglicki W. Łopuszański B. : Użytkowanie urządzeń mechanicznych. WNT, Warszawa 1980*
8. *Oprędkiewicz J. : Podstawy niezawodności obrabiarek i systemów produkcyjnych. WNT, Warszawa 1989*
9. *Pawłow B. W. : Badania diagnostyczne w technice. WNT, Warszawa 1989*
10. *Piasecki S. : Optymalizacja systemów obsługi technicznej. WNT, Warszawa 1967*



## 8. Zadania do prac kontrolnych

### 8. 1. I praca kontrolna

**Uwaga:** każdy student wybiera sobie określony numer zadań (od 1 do 22)

1. Pewien producent twierdzi, że może zaprojektować i wykonać przyrząd pomiarowy, który będzie miał średni czas między uszkodzeniami równy  $u$  godzin (przy założeniu rozkładu wykładniczego). Wykonanie zadania przez ten przyrząd wymaga, aby działał on bez uszkodzenia przez  $t$  godzin. Jaka jest szansa, że nie ulegnie on uszkodzeniu przed upływem tego czasu?

Nr zadania	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$u(h)$	150	170	180	190	200	210	220	230	240	250	
$t(h)$	10	10	10	15	15	15	20	20	20	25	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370
25	25	30	30	30	35	35	35	40	40	40	45

2. Jeden z podzespołów ww. przyrządu ma średni czas między uszkodzeniami równy  $u$  godzin (wg powyższego zadania). Jakie są prawdopodobieństwa sprawnego wykonania zadania w ciągu: 1, 5, 10, 50, 100, 200 godzin? Podaj odpowiedź na to pytanie w postaci wykresu niezawodności  $R(t)$ , zakładając rozkład wykładniczy.
3. Producent pralki automatycznej pragnie, aby niezawodność jego pralki w okresie rękojmi (2 lata) wynosiła:

Nr zadania	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$R(t)$ [%]	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92

- a) Jakie trzeba postawić wymagania konstruktorom co do średniego czasu między uszkodzeniami, jeżeli rozkład uszkodzeń jest rozkładem wykładniczym?
- b) Załóż, że wymagania te będą dwukrotnie większe. Jaka będzie wtedy niezawodność pralki dla okresu gwarancyjnego (1 rok)?
4. Średnia żywotność podzespołu A telewizora wynosi  $u$  godzin ( $u$  wg zadania 1), a rozkład żywotności jest rozkładem wykładniczym.

- a) Jaki procent tych podzespołów w populacji będzie miał żywotność równą 100 godzin?
- b) Średnia żywotność podzespołu B tego telewizora wynosi  $u + 50$  godzin ( $u$  wg zadania 1). Rozkład jest również rozkładem wykładniczym. Jaki procent tych podzespołów w populacji będzie miał żywotność równą 150 godzin?
- c) Powyższe podzespoły są wykonywane oddzielnie, a następnie łączone ze sobą szeregowo w jeden wspólny zespół. Jaki procent tych zespołów będzie miał żywotność równą co najmniej 200h?
- d) Jaka będzie niezawodność tego zespołu przy połączeniu równoległym?
5. Z praktyki wiadomo, że średni czas regulacji telewizora kolorowego wynosi 60 minut. Jaka jest szansa, że pracownik może wykonać taką regulację w ciągu  $t$  minut ( $t$  wg zadania 1). Załóż, że czas wykonania regulacji opisywany jest rozkładem wykładniczym.
6. Podane poniżej zestawienie zawiera podstawowe częstości uszkodzeń pewnych elementów telewizora

Element	Liczba sztuk	Częstość uszkodzeń/godz
Tranzystor	15	$14 \times 10^{-6}$
Rezystor	25	$3 \times 10^{-6}$
Kondensator	10	$10 \times 10^{-6}$

- a) Oszacuj średni czas między uszkodzeniami tych elementów telewizora przy założeniu rozkładu wykładniczego.
- b) Wszystkie elementy są elementami krytycznymi, decydującymi o działaniu telewizora. Jaka będzie przewidywana niezawodność takiego układu?
- c) Podaj, jakie są dopuszczalne częstości uszkodzeń tego telewizora, aby jego niezawodność wynosiła 0.9 (przy założeniu, że wszystkie elementy są elementami krytycznymi).
7. W tabl. 8 skryptu podano niezawodność zespołów pojazdu jednośladowego przy określonych przebiegach ( $l$  - km), przy czym zbadano, że częstość uszkodzeń opisywało prawo wykładnicze
- a) Sporządź graficzny obraz niezawodności  $R(L)$  (mierzonej w funkcji przejechanych kilometrów) dla najmniej i najbardziej niezawodnego podzespołu pojazdu jednośladowego.
- b) Wykreślić stosunek średnich przebiegów między uszkodzeniami  $\bar{L}$  zespołów o największej i o najmniejszej niezawodności, tzn.  $\frac{U_{\max}}{U_{\min}} = f(L)$

- c) Jaką można przewidywać niezawodność dla całego pojazdu jednośladowego po przebiegu  $L = 5000$  km.
- d) Jakie działania należałoby podjąć, aby niezawodność tę powiększyć o 10%?
- e) Przypuśćmy, że niezawodność tego pojazdu powinna wynosić 90%. Wymień kilka możliwych wariantów, które po zastosowaniu w praktyce dałyby żądany poziom niezawodności. Oblicz, o ile musiałby się zwiększyć średni przebieg zespołu, który dotychczas jest zespołem najbardziej zawodnym.

## 8. 2. II praca kontrolna

1. Zostałeś mianowany kierownikiem produkcji w jednym z zakładów. Twoim pierwszym zadaniem jest przygotowanie raportu o występujących problemach produkcji. Jeden z problemów polega na tym, że kluczowy wyrób produkowany przez ten zakład często się psuje. Jesteś w stanie odnaleźć raporty opisujące funkcjonowanie tego wyrobu - tzn. czas jaki upłynął (w miesiącach) do uszkodzenia. Główny dyrektor twierdzi, że w przyjętym okresie gwarancji (2 lata) do zakładu trafia z powrotem nie więcej niż 20% tych wyrobów. Musisz wykazać czy dyrektor ma rację? W tym celu należy:
  - a) przygotować indywidualnie tablicę danych - na wzór tabl. 10 ze skryptu (str. 95),
  - b) dokonać obliczeń miar niezawodności dla 150 wyrobów - na wzór tabl. 11 (str. 97),
  - c) wykreślić wykresy gęstości prawdopodobieństwa  $f(t)$  i intensywności uszkodzeń  $\lambda(t)$  - na wzór rys. 25,
  - d) wykreślić wykresy dystrybuanty trwałości  $F(t)$  oraz funkcji niezawodności  $R(t)$ ,
  - e) określić z funkcji niezawodności  $R(t)$  czy dyrektor zakładu ma rację czy też nie,
  - f) podać na jaki okres może być udzielona gwarancja aby mieć pewność, że do zakładu nie wróci więcej niż 5% analizowanych wyrobów.
2. W poniższej tabeli zestawiono czasy pracy do osiągnięcia dopuszczalnego zużycia ściernic ceramicznych, stosowanych w operacji szlifowania pierścieni łożysk tocznych;
  - a) opracuj wrywkowy plan odbioru tych ściernic wg oceny alternatywnej i liczbowej dla wybranej przez siebie partii o liczności  $n = 30$  sztuk,
  - b) z poniższej tablicy wybierz losowo próbkę ściernic o liczności  $n = 30$ ,
  - c) sprawdź, czy w wybranej przez siebie partii ściernic nie ma wyników obarczonych błędem grubym. Zastosuj w tym celu test Grebbs'a,

- d) dla wybranej próbki oblicz średnią trwałość oraz odchylenie standardowe,  
 e) sporządź histogram i diagram dla swoich wyników,  
 f) dobierz postać rozkładu teoretycznego (biorąc pod uwagę jeden z rozkładów analizowanych w skrypcie),  
 g) określ prawdopodobieństwo poprawnej pracy ściernic danej partii, biorąc pod uwagę, że czas operacji szlifierskiej wynosi 31 s,  
 h) określ okres niezawodnościowej pracy ściernic, tak, aby przy zastosowanych parametrach obróbki, ich niezawodność wynosiła 90%.

Nr	$T_k$ [s]	Nr	$T_k$ [s]	Nr	$T_k$ [s]	Nr	$T_k$ [s]	Nr	$T_k$ [s]
1	19.2	11	24.0	21	29.5	31	32.0	41	42.7
2	19.2	12	24.0	22	29.5	32	32.0	42	42.7
3	19.2	13	24.0	23	29.5	33	34.9	43	42.7
4	20.2	14	25.5	24	32.0	34	34.9	44	42.7
5	22.6	15	25.6	25	32.0	35	34.9	45	42.7
6	22.6	16	25.6	26	32.0	36	34.9	46	48.0
7	22.6	17	27.4	27	32.0	37	38.4	47	48.5
8	23.0	18	29.5	28	32.0	38	38.4	48	49.0
9	23.5	19	29.5	29	32.0	39	40.0	49	49.5
10	23.5	20	29.5	30	32.0	40	41.5	50	49.5

4. W poniższej tabeli zestawiono czasy pracy bieżącej samochodowych regulatorów napięcia, ( $t \times 1000$ ). Należy opracować statystycznie powyższe wyniki badań, tj:

Lp.	$t$	Lp.	$t$	Lp.	$t$	Lp.	$t$	Lp.	$t$	Lp.	$t$
1	20.3	11	11.5	21	82.0	31	61.0	41	46.0	51	78.0
2	20.3	12	18.5	22	81.0	32	61.0	42	48.5	52	11.5
3	31.0	13	20.8	23	61.0	33	64.5	43	48.5	53	22.5
4	34.0	14	30.0	24	50.0	34	4.5	44	48.0	54	20.8
5	37.5	15	30.8	25	50.0	35	16.0	45	50.0	55	34.5
6	18.5	16	41.5	26	22.0	36	18.5	46	61.0	56	41.5
7	16.6	17	43.0	27	20.7	37	20.3	47	63.0	57	43.0
8	4.5	18	43.0	28	20.3	38	20.7	48	67.0	58	46.0
9	64.5	19	43.0	29	16.6	39	30.0	49	78.0	59	50.0
10	85.0	20	50.0	30	15.6	40	30.0	50	85.0	60	18.5

- a) uszeregować dane wg czasu pracy od minimalnego do maksymalnego,
- b) sporządzić tablicę szeregu rozdzielczego zmiennej  $t$  oraz wykreślić jej histogram,
- c) założyć dla dowolnych 10 (wybranych przez siebie) regulatorów, iż wystąpiło dla nich uszkodzenie. Czasy pracy tych regulatorów oznaczyć znakiem „+”,
- d) zbudować tablicę danych, umożliwiającą wyznaczenie skumulowanej intensywności uszkodzeń badanych regulatorów,
- e) nanieść otrzymane wartości skumulowanej intensywności uszkodzeń  $H(t)$  na zkszerowaną siatkę rozkładu Weibulla i aproksymować linią prostą otrzymane punkty,
- f) określić parametry rozkładu Weibulla dla rozpatrywanego przykładu,
- g) obliczyć zadania 1, 2, 3 dotyczące rozkładu Weibulla (str. 146 skryptu) korzystając ze swojej prostej aproksymującej wyniki badań.