



BRONISŁAW SŁOWIŃSKI

# INŻYNIERIA EKSPLOATACJI MASZYN

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

# **INŻYNIERIA EKSPLOATACJI MASZYN**



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

Bronisław Słowiński

# **INŻYNIERIA EKSPLOATACJI MASZYN**

Koszalin 2014

ISBN 978-83-7365-248-4

Przewodniczący Uczelnianej Rady Wydawniczej  
*Mirosław Maliński*

Recenzja  
*Jerzy Girtler*  
*Stanisław Legutko*

Redakcja  
*Alina Leszczyńska*

Projekt okładki  
*Tadeusz Walczak*

© Copyright by Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej  
Koszalin 2014

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

---

Koszalin 2014, wyd. III popr., ark. wyd. 13,28, nakład 150 egz., format B-5  
Druk: EXPOL, Włocławek

# SPIS TREŚCI

Wstęp.....	9
Wykaz użytych skrótów i oznaczeń.....	13
<b>Rozdział 1 .....</b>	<b>15</b>
<b>PROBLEMATYKA EKSPLOATACJI</b>	
1.1. Przemysłowy proces realizacji .....	15
1.2. Istota i cechy eksploatacji.....	18
1.3. Cele i struktura nauk o eksploatacji.....	21
1.4. Prakseologiczne ujęcie eksploatacji .....	24
1.5. Problemy eksploatacyjne i ich podział .....	27
1.6. Podsumowanie.....	30
<b>Rozdział 2 .....</b>	<b>31</b>
<b>DZIAŁANIE ZE ŚRODKIEM TECHNICZNYM</b>	
2.1. Realizacja potrzeb społecznych.....	31
2.2. Maszyna jako środek techniczny .....	34
2.3. Wymagania stawiane środkom technicznym.....	37
2.4. Cechy środków technicznych .....	40
2.5. Zużywanie środka technicznego.....	43
2.6. Podsumowanie.....	46
<b>Rozdział 3 .....</b>	<b>47</b>
<b>SYSTEMOWE UJĘCIE EKSPLOATACJI</b>	
3.1. Pojęcie systemu .....	47
3.2. Podejście systemowe .....	50
3.3. Modelowanie systemowe .....	53
3.4. Model systemowy układów eksploatacji .....	56
3.5. Inżynieria systemów .....	59
3.6. Podsumowanie.....	62
<b>Rozdział 4 .....</b>	<b>63</b>
<b>UTRZYMANIE RUCHU MASZYN</b>	
4.1. Problemy utrzymania ruchu.....	63
4.2. Zadania działu utrzymania ruchu .....	66
4.3. Strategie utrzymania ruchu.....	69
4.4. Trendy utrzymania ruchu.....	72
4.5. Systemy wspomagające utrzymanie ruchu.....	75
4.6. Podsumowanie.....	78

<b>Rozdział 5 .....</b>	<b>79</b>
<b>TRWAŁOŚĆ I ZUŻYCIE MASZYN</b>	
5.1. Dyspozycyjność maszyn i urządzeń .....	79
5.2. Zmiana stanu technicznego maszyn .....	82
5.3. Trwałość maszyn i jej rodzaje .....	85
5.4. Techniczne procesy zużywania części maszyn .....	88
5.5. Zużywanie ekonomiczne maszyn .....	91
5.6. Podsumowanie .....	94
<b>Rozdział 6 .....</b>	<b>95</b>
<b>ELEMENTY DIAGNOSTYKI MASZYN</b>	
6.1. Diagnostyka techniczna i jej rodzaje .....	95
6.2. Identyfikacja stanu jako zadanie diagnostyki .....	98
6.3. Procedury diagnozowania maszyn i urządzeń .....	101
6.4. Metody diagnozowania maszyn i urządzeń .....	104
6.5. Kontrola stanu wg modelu diagnostycznego .....	107
6.6. Podsumowanie .....	110
<b>Rozdział 7 .....</b>	<b>111</b>
<b>PODSTAWY BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH</b>	
7.1. Źródła wiedzy eksploatacyjnej .....	111
7.2. Planowanie badań eksploatacyjnych .....	114
7.3. Modelowanie w badaniach eksploatacyjnych .....	117
7.4. Projektowanie badań eksploatacyjnych .....	120
7.5. Aparatura do badań eksploatacyjnych .....	123
7.6. Podsumowanie .....	126
<b>Rozdział 8 .....</b>	<b>127</b>
<b>ELEMENTY TEORII NIEZAWODNOŚCI</b>	
8.1. Pojęcie i istota niezawodności .....	127
8.2. Funkcja niezawodności .....	130
8.3. Niezawodność obiektów nieodnawialnych .....	133
8.4. Niezawodności obiektów odnawialnych .....	136
8.5. Ilościowy rachunek niezawodności .....	139
8.6. Podsumowanie .....	142
<b>Rozdział 9 .....</b>	<b>143</b>
<b>PROGNOZOWANIE NIEZAWODNOŚCI</b>	
9.1. Metodyka prognozowania niezawodności .....	143
9.2. Prognozowanie według rozkładu normalnego .....	146
9.3. Prognozowanie według rozkładu wykładniczego .....	149
9.4. Prognozowanie według rozkładu Weibulla .....	152
9.5. Prognozowanie według rozkładu gamma .....	155

9.6. Podsumowanie.....	158
<b>Rozdział 10 .....</b>	<b>159</b>
<b>NIEZAWODNOŚĆ UKŁADU ZŁOŻONEGO</b>	
10.1. Modelowanie systemowe struktury układu .....	159
10.2. Modele struktur niezawodnościowych .....	162
10.3. Struktura niezawodnościowa szeregową .....	165
10.4. Struktura niezawodnościowa równoległa .....	168
10.5. Struktura niezawodnościowa mieszana .....	171
10.6. Podsumowanie.....	174
<b>Rozdział 11 .....</b>	<b>175</b>
<b>CZŁOWIEK W SYSTEMIE EKSPLOATACJI</b>	
11.1. Układ człowiek-maszyna.....	175
11.2. System antropotechniczny .....	178
11.3. Człowiek jako operator maszyny .....	181
11.4. Model niezawodności człowieka.....	184
11.5. Działania na rzecz bezpieczeństwa pracy.....	187
11.6. Podsumowanie.....	190
<b>Rozdział 12 .....</b>	<b>191</b>
<b>METODY POPRAWY NIEZAWODNOŚCI</b>	
12.1. Problemy doskonalenia niezawodności.....	191
12.2. Metody przedeksploatacyjne .....	194
12.3. Metody eksploatacyjne .....	197
12.4. Metody rezerwowania .....	200
12.5. Informatyka w doskonaleniu niezawodności.....	203
12.6. Podsumowanie.....	206
<b>Rozdział 13 .....</b>	<b>207</b>
<b>PROCESY OBSŁUGI TECHNICZNEJ</b>	
13.1. Obsługiwanie i jego rodzaje .....	207
13.2. Organizacja procesu obsługi .....	210
13.3. Zlecanie realizacji usług .....	213
13.4. System usług planowo-zapobiegawczych .....	216
13.5. Metoda oceny jakości usług .....	219
13.6. Podsumowanie.....	222
<b>Rozdział 14 .....</b>	<b>223</b>
<b>ZAOPATRYWANIE EKSPLOATACYJNE</b>	
14.1. System zaopatrywania i jego struktura .....	223
14.2. Zapasy i ich klasyfikacja .....	226
14.3. Sterowanie zapasami .....	229



14.4. Normowanie zapasów.....	232
14.5. Zaopatrywanie wspomagane komputerowo .....	235
14.6. Podsumowanie.....	238
<b>Rozdział 15 .....</b>	<b>239</b>
<b>PRZYKŁADY ROZWIĄZYWANIA ZADAŃ</b>	
<b>Bibliografia.....</b>	<b>255</b>
<b>Zalecana literatura uzupełniająca .....</b>	<b>265</b>
<b>Załącznik .....</b>	<b>269</b>

# Wstęp

Maszyny, samochody, komputery i inne urządzenia techniczne są obmyślane i produkowane nie po to, aby były – ale po to, by ułatwiać życie ludzi. Powstają zatem, aby je użytkować, czyli szerzej mówiąc – eksploatować. Sprawna eksploatacja urządzeń wymaga od użytkowników stosowania się do pewnych zasad, którymi zajmuje się nauka o eksploatacji. Nauka ta, obok nauk o projektowaniu i wytwarzaniu urządzeń, jest trzecią bardzo istotną gałęzią wiedzy inżynierskiej.

Na eksploatację można mieć różne spojrzenie w zależności od punktu widzenia; inne ma ekonomista, dla którego eksploatacja to wykorzystywanie złóż mineralnych (węgiela, rudy żelaza, siarki, itp.) lub innych zasobów w przedsiębiorstwie, inne polityk, dla którego oznacza ona wyzysk klasowy, i inne inżynier.

**Eksploatacja w znaczeniu inżynierskim** obejmuje organizacyjne, techniczne, ekonomiczne i społeczne zagadnienia związane z działaniem ludzi i maszyn. W tym ujęciu można dopuścić stwierdzenie, które już w latach sześćdziesiątych XX wieku sformułował twórca teorii eksploatacji, J. Koniczny, że „*eksploatacja jest działaniem*” [63].

Maszyny same z siebie nie działają tylko wypełniają określoną funkcję (zadanie) nałożone przez człowieka. Zadania te świadomie wyznacza człowiek i tylko on (ze względu na to pojęcie „świadomie”) może działać. Działania te obejmują poszukiwanie najbardziej właściwego (optymalnego) sposobu użytkowania maszyn, urządzeń lub innych obiektów technicznych, oraz minimalizację negatywnego oddziaływania tych urządzeń na środowisko naturalne.

Stąd też eksploatacji maszyn nie można i nie należy rozpatrywać (jak pisze prof. S. Oziemski [105], a z czym autor zgadza się w 100%) jako „*zagadnienie li tylko techniczne, ale jako problem interdyscyplinarny – system, w którym powiązано oddziaływania techniczne, ekonomiczne, społeczne, ekologiczne na tle fluktuacji poziomu gospodarki kraju i życia człowieka w jedną całość.*”

W takim ujęciu maszyna w powiązaniu z człowiekiem tworzy *system antropotechniczny*, a jedną z najistotniejszych jego właściwości staje się niezawodność (*ang. reliability*), której synonimem jest pewność realizacji zadania. Podstawą działań w tym zakresie jest znajomość procesu zmian własności elementów maszyny, które zmieniają się w sposób niekorzystny wraz z upływem czasu i wzrostem intensywności użytkowania.

Zjawisko to powoduje konieczność odnowy (odtworzenia) własności maszyny poprzez odpowiednią diagnostykę i obsługi techniczne, polegające na konserwacji, regeneracji i wymianie elementów na nowe. To wszystko oznacza na ogół „technikę prawidłowej eksploatacji”. Definiowana ona jest jako „*powiązanie zarządzania, finansowania, inżynierii i innych stosowanych w odniesieniu do obiektów technicznych działań praktycznych, ukierunkowanych na minimalizację kosztów eksploatacji tych obiektów*” [25]. Działania praktyczne dotyczą założeń projektowych i projektu, mających zapewnić niezawodność i obsługiwalność maszyn, ich użytkowanie, usprawnianie i wymianę.

Istotę tego „*całościowego ujmowania eksploatacji*” – według Downarowicza [29] dobrze oddaje pojęcie „*inżynieria eksploatacji*”. Określenie to wydaje się bliskie rzeczywistym aspektom eksploatacji (szeroko rozumianej), jak i polskiej tradycji naukowej. Za takim ujęciem optuje również autor, stąd też przyjęty tytuł podręcznika „**Inżynieria eksploatacji maszyn**”.

Obejmuje on zagadnienia dotyczące użytkowania i odnowy szeroko rozumianych maszyn, urządzeń i innych obiektów technicznych (instalacji), wytworzonych do realizacji potrzeb ludzkich.

Opracowany podręcznik stanowi materiał do studiów w zakresie podstaw eksploatacji, zwłaszcza na kierunkach związanych z dyscypliną *Budowa i Eksploatacja Maszyn*. Z uwagi na fakt, iż jest to podręcznik akademicki, przeznaczony dla studiów I stopnia (inżynierskie) w zakresie kierunków nie zajmujących się stricte eksploatacją, siłą rzeczy nie obejmuje wszystkich aspektów i całej złożoności inżynierii eksploatacji, a tylko jej najistotniejsze elementy wyznaczone ministerialnym standardem kształcenia dla studentów tej dyscypliny naukowej.

*Głównym celem (założeniem metodycznym)* tego podręcznika jest wykształcenie w studentach wiedzy i umiejętności w zakresie: interpretowania podstawowych pojęć z zakresu eksploatacji obiektów technicznych; wyjaśniania zależności między eksploatacją, trwałością i niezawodnością; charakteryzowania typowych podsystemów eksploatacji oraz wykazywania występujących w nich zależności; określania przyczyn procesów zużyciowo-starzeniowych oraz metod zapobiegania i likwidowania ich skutków; modelowania systemu eksploatacji maszyn i urządzeń; oceniania obiektów technicznych według kryterium niezawodności i prognozowania w tym zakresie; zasad analizy danych eksploatacyjnych; przewidywania zagrożeń wynikających z nieprawidłowej eksploatacji; wykorzystania reguł eksploatacji uwzględniających prewencję i diagnostykę;

w organizacji procesów obsługowych oraz planowania zasobów części zamiennych, regeneracji i modernizacji maszyn.

Prezentowany *podręcznik ma budowę modułową* i obejmuje 15 rozdziałów tematycznych. Pierwsze 14 rozdziałów zawiera treści programowe, a rozdział 15 przykłady rozwiązywania zadań z eksploatacji. Tematy programowe, przewidziane jak materiał uzupełniający do 2 – godzinnego wykładu, obejmują po 5 podtematów szczegółowych, z których każdy opisano na 3 stronach.

Należy tu dodać, a zarazem podkreślić, że każdy, nawet najlepiej opisany wykład, tworzy tylko wiedzę deklaratywną („wiem, że”). W praktyce inżynierskiej potrzebna jest natomiast wiedza proceduralna („wiem jak”). Aby przekształcić tę pierwszą w drugą, potrzebne jest ćwiczenie (łączenie różnych rzeczy ze sobą). W tym celu w ostatnim rozdziale podręcznika zamieszczono przykładowy zestaw zadań ćwiczeniowych, wraz z procedurą postępowania przy ich rozwiązywaniu. Do rozwiązywania ćwiczeń z zakresu inżynierii eksploatacji przydatne są też, zamieszczone w załączniku, tablice dystrybuanty  $F$  rozkładu normalnego, wartości krytycznych testu Grebbsa oraz nomogram do wyznaczenia parametrów rozkładu Weibulla.



# Wykaz użytych skrótów i oznaczeń

- $a$  – parametr skali rozkładu Weibulla,
- $b$  – parametr kształtu rozkładu Weibulla,
- $c_j$  – średnia cena obsługi oddanej w outsourcing,
- CMMS* – (*Computerized Maintenance Management Systems*) systemy komputerowe do gospodarki remontowej i utrzymania ruchu,
- ERP* – (*Enterprise Resource Planning*) rozbudowany funkcjonalnie system informatyczny, obejmujący procesy produkcji, dystrybucji i finansów,
- $F(t)$  – funkcja dystrybucji (dystrybuanta) zmiennej losowej  $T$ ,
- $f(T)$  – gęstość prawdopodobieństwa uszkodzeń,
- $K$  – współczynnik nowoczesności konstrukcji,
- $K$  – koszt zaopatrywania,
- $K_s$  – koszty stałe funkcji utrzymania ruchu w przedsiębiorstwie,
- $k$  – współczynnik wpływu warunków otoczenia na niezawodność,
- $k_{gs}$  – współczynnik gotowości (w lit. anglojęzycznej oznaczany *MTTFF*),
- $k_{zmi}$  – jednostkowy koszt zmienny świadczonej usługi,
- $L_e$  – łańcuch eksploatacji,
- $L_u$  – łańcuch użytkowania,
- $L_o$  – łańcuch obsługiwanania,
- MRP I* – (*Material Requirements Planning*) planowanie potrzeb materiałowych,
- MRP II* – (*Manufacturing Resource Planning*) planowanie zasobów produkcyjnych,
- $Q_r$  – rynkowy aspekt jakości,
- $Q_p$  – projektowy aspekt jakości,
- $Q_r$  – wytwórczy aspekt jakości,
- $Q_e$  – eksploatacyjny aspekt jakości,
- OS* – zryczałtowana opłata stała outsourcingu,
- $R$  – niezawodność (w sensie opisowym),
- $R_g$  – graniczna wartość niezawodności,
- $R_i$  – niezawodność  $i$ -tego elementu,
- $R_s$  – niezawodność układu  $n$ -elementowego o strukturze szeregowej,
- $R_r$  – niezawodność układu  $n$ -elementowego o strukturze równoległej,
- $R_{rs}$  – niezawodność układu złożonego o strukturze równoległo-szeregowej,
- $R_{sr}$  – niezawodność układu złożonego o strukturze szeregowo-równoległej,
- $R(t)$  – funkcja niezawodności,
- $r$  – parametr rozkładu chi-kwadrat  $\chi^2$ ,
- SAT* – elementarny układ działania (mikrosystem),
- SE* – system eksploatacji,

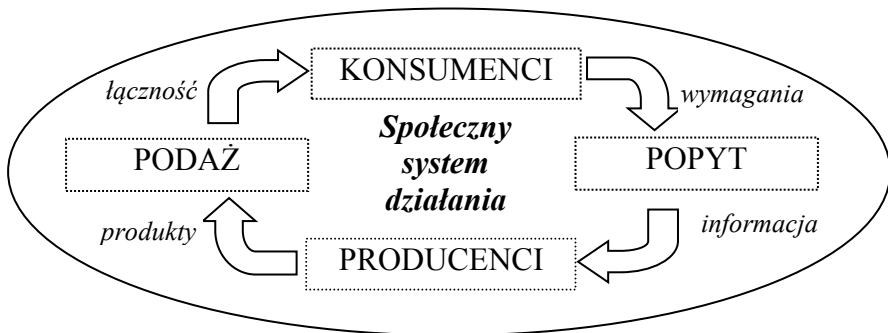
$SO$	– system obsługiwanania,
$SKE$	– system kierowania eksploatacją,
$SKO$	– system kierowania obsługiwaniem,
$SKU$	– system kierowania użytkowaniem,
$SU$	– system użytkowania,
$SWE$	– system wykonawczy eksploatacji,
$SWU$	– system wykonawczy użytkowania,
$SWO$	– system wykonawczy obsługiwanania,
$s(\sigma)$	– wartość odchylenia standardowego wytrzymałości,
$s(Z)$	– wartość odchylenia standardowego naprężenia,
$T$	– okres trwałości obiektu,
$T_k$	– kryterialny okres trwałości obiektu,
$t_e$	– liczba lat eksploatacji,
$t_m$	– czas maszynowy (zakładany),
$UO$	– uogólnione obciążenie (naprężenie),
$UW$	– uogólniona wytrzymałość,
$u$	– średni czas pomiędzy uszkodzeniami ( $MTBF$ ),
$u_m$	– wartość zmiennej standaryzowanej,
$v$	– współczynnik zmienności,
$W_{QU}$	– wymagania dotyczące jakości użytkowej,
$W_{QT}$	– wymagania dotyczące jakości technologicznej,
$W_{QD}$	– wymagania dotyczące jakości dystrybucji,
$W_p$	– wartość początkowa maszyny,
$X$	– wektor cech stanu maszyny ( <i>defekt</i> ),
$x$	– współczynnik bezpieczeństwa,
$Y$	– wektor wyjściowy ( <i>symptom</i> ),
$Z_p$	– zużycie potencjału eksploatacyjnego,
$Z_z$	– wartość nominalna wytrzymałości,
$\eta$	– sprawność środka technicznego,
$\mu$	– zakładana intensywność dokonywania napraw,
$\nu$	– średni czas odnowy obiektu (w lit. angielskiej oznaczany $MTR$ ),
$\lambda(t)$	– intensywność uszkodzeń, nazywana też funkcją ryzyka,
$\sigma_{n-1}$	– odchylenie standardowe dla populacji,
$\sigma_n$	– odchylenie standardowe dla próbki,
$\sigma_x$	– odchylenie standardowe dla wartości średniej,
$\varphi$	– liczba uszkodzeń (parametr rozkładu gamma),
$\omega_{\max}$	– teoretyczna intensywność działania,
$\omega_p$	– praktyczna intensywność działania,
$\chi$	– parametr rozkładu chi-kwadrat $\chi^2$ .

# 01. PROBLEMATYKA EKSPLOATACJI

## 1.1. Przemysłowy proces realizacji

Człowiek jest istotą społeczną – żyje i przejawia życiową aktywność wśród innych ludzi. Współdziałanie ludzi doprowadziło do powstania organizacji społecznych, a wśród nich takich, które prowadzą działalność gospodarczą. Działalność ta polega na realizacji określonych procesów wytwarzania produktów lub świadczeniu usług i prowadzona jest w celach zarobkowych [117]. Procesem realizacji określa się więc splot działań, których celem jest zaspokojenie czyichś potrzeb. Każdy powtarzalny proces, w wyniku którego powstaje produkt na sprzedaż przy użyciu maszyn lub innych urządzeń oraz z podziałem pracy pomiędzy różnych uczestników, nazywa się przemysłowym procesem realizacji [93].

W ramach przemysłowych procesów realizacji najbardziej rozpowszechnione są procesy produkcyjne, które polegają na przetwarzaniu zasobów na użyteczne produkty. Produkcja ma charakter społeczny, bo ludzie współpracują ze sobą w procesie produkcji, a także praca jednych służy zaspokojeniu innych członków społeczeństwa. Tym samym tworzy się społeczny system działania – rys. 1 [132].



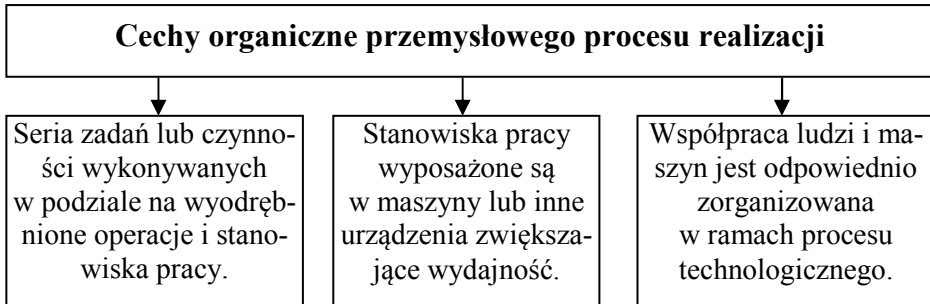
Rys. 1. *Schemat społecznego systemu działania* [137]

Główną siłą napędzającą rozwój procesów przemysłowych jest i będzie nadal branża produkcyjna [3]. Jej domeną działania są procesy produkcyjne. Proces produkcyjny przebiega w środowisku systemu produkcyjnego, czyli przedsiębiorstwa. System produkcyjny to układ wzajemnie powiązanych ze sobą zasobów materialnych, energetycznych, kadrowych, kapitałowych i informacyjnych.



Przedsiębiorstwo dysponując środkami produkcji (urządzenia) oraz odpowiednimi technologiami, dokonuje transformacji zasobów (materiały, energia, praca ludzi) w użyteczne produkty. Podczas tej transformacji następuje sukcesywne zużywanie się nie tylko zasobów, ale także środków produkcji, które wymagają co pewien czas naprawy lub wymiany [54].

Niezależnie od rodzaju prowadzonej działalności, czy też wielkości przedsiębiorstwa, każdy proces przemysłowy opisują trzy cechy – rys. 2 [1].



Rys. 2. *Cechy organiczne przemysłowego procesu realizacji* [1]

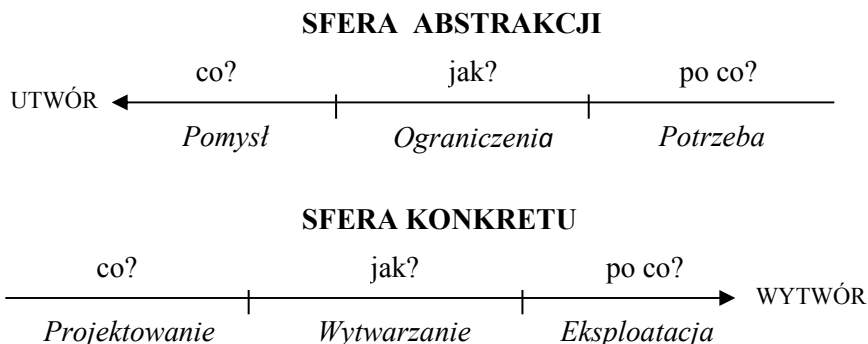
Odbiorcą wyrobów jest, jako wiadomo, rynek tworzony przez konsumentów. W systemie gospodarki rynkowej jemu podporządkowany jest całokształt filozofii produkcji. Przemysłowy proces realizacji nie stanowi zatem celu sam w sobie, to środek wiodący do celu, jakim jest dostarczenie dobra lub usługi o oczekiwanej przez klienta wartości po akceptowanej cenie. Aby to nastąpiło, wymagane jest zintegrowane działanie trzech grup działań [104]:

- *marketingu* – identyfikacja i rozpoznanie potrzeb klienta,
- *projektowania* – obmyślanie produktu o pożądanych cechach,
- *wytwarzania* – seria operacji materializujących koncepcje projektantów.

Ideowo produkcja to proces materializacji energii, a nadawanie materii określonej, wymaganej formy, to przetwarzanie. „Przetwarzanie” to, w przemysłowym procesie realizacji, jest pojęciem szerszym i obejmuje dwie sfery: abstrakcji (obmyślania) i konkrety (wytwarzania) [133].

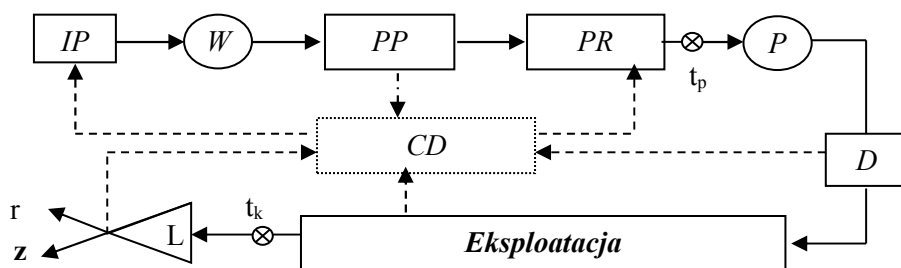
*Czynności sfery abstrakcji* obejmują fazę analizowanie potrzeb, przewidywanie warunków eksploatacji i przyjęcie miar niezawodności oraz koncypanie, czyli obmyślanie co „to” ma być. W wyniku tego działania powstaje utwór myślowy, w postaci pomysłu.

*Czynności sfery konkrety* związane są z zapisem pomysłu w postaci rysunku, przetworzeniem go w materialny wyrób oraz jego eksploatację – rys. 3.



Rys. 3. *Dwie komplementarne sfery przemysłowego procesu realizacji* [131]

Konkretyzacja tych dwóch sfer następuje w ramach cyklu życia wyrobu. Poszczególne etapy tego cyklu przedstawiono na rys. 4 (opis w tekście) [56].



Rys. 4. *Etapy cyklu życia produktu przemysłowego* [56]

Proces rozpoczyna się od identyfikacji potrzeb (*IP*), której wynikiem jest zbiór wymagań (*W*), określający m.in. żadaną jakość wyrobów. Kierując się wymaganiami przystępuje się do przygotowania produkcji (*PP*), a następnie uruchomienie produkcji (*PR*). W pewnej chwili  $t_p$  otrzymuje się produkt (*P*), który poprzez kanały dystrybucji (*D*) trafia do użytkownika w celu eksploatacji.

Okres eksploatacji, mimo że najdłuższy w całym cyklu życia wyrobu, kończy się w jakiejś chwili  $t_k$ , po czym następuje likwidacja (*L*) tego wyrobu przez złomowanie (*z*) lub recykling (*r*). Informacje z poszczególnych etapów zbierane są w centrum decyzyjnym (*CD*), gdzie realizowane są procesy zarządcze i logistyczne. Każdy zatem obiekt techniczny jest wytwarzany po to, aby go eksploatować. Wyrób wprowadzony do eksploatacji i wypełniający swoje zadania zgodnie z założeniami staje się środkiem technicznym. Utrzymanie tych środków technicznych w ruchu jest zadaniem inżynierii eksploatacji maszyn.

## 1.2. Istota i cechy eksploatacji

Eksploatacja jest pojęciem interdyscyplinarnym i zależnie od rodzaju wykonywanego zawodu może być różnie pojmowana, przykładowo wg [110]:

- *inżyniera* – eksploatacja to użytkowanie (wraz z naprawami, konserwacją itp.) maszyn, urządzeń lub różnych innych systemów technicznych,
- *ekonomisty* – eksploatacja to wykorzystywanie złóż mineralnych, np. węgla, lub sposób gospodarowania środkami trwałymi w przedsiębiorstwie,
- *polityka* – eksploatacja to wykorzystywanie siły roboczej i wyzysk klasy.

Zjawiska eksploatacyjne są elementem każdego ludzkiego działania. Jak wiemy, ostatecznym celem każdej działalności człowieka jest zmiana otaczającej go rzeczywistości w kierunku dla niego najkorzystniejszym, przy możliwie małym nakładzie pracy, stąd w tych ujęciach występuje wspólny rdzeń znaczeniowy, który wskazuje, że:

- jest to długotrwała działalność a nie jednorazowe przedsięwzięcie,
- działalność ta ma umożliwić uzyskiwanie długotrwałych korzyści,
- eksploatacja nie jest celem działalności, ale ma umożliwić osiągnięcie celu.

Człowiek dążąc do realizacji swoich celów podejmuje określone działania przy użyciu odpowiednio skonstruowanego instrumentarium (narzędzi). Źródeł różnic w interpretacji pojęcia „eksploatacja” należy zatem szukać wyłącznie w specyfice eksploatowanych narzędzi, bowiem:

- dla inżyniera obiektem są przeważnie maszyny,
- dla ekonomisty – przedsiębiorstwa,
- dla działacza gospodarczego – bogactwa naturalne,
- dla polityka – praca grupy społecznej.

W językach obcych nie ma prostego odpowiednika polskiego słowa „eksploatacja”. Używa się pojęcia *maintenance* (fr. *main* = ręka; *tenance* = trzymanie), które odnosi się głównie do obsługiwanie. Konwencję tę przyjęło np. czasopismo „*Eksploatacja i Niezawodność*”, które określa swój tytuł w j. ang. jako „*Maintenance and Reliability*”. Niezawodność wydziela się tym samym poza pojęcie „eksploatacja”, traktując ją jako pojęcie pozaeksploatacyjne. Nie jest to właściwe. Z wielu publikacji naukowych wynika, że polska interpretacja pojęcia *eksploatacja* (urządzeń technicznych) nie może być utożsamiana z interpretacją pojęcia *maintenance*. Mówiąc o *eksploatacji* trzeba mówić bowiem o *użytkowaniu* (*operation*) i *obsługiwaniu* (*maintenance*), ale także o niezawodności, diagnostyce i bezpieczeństwie działania maszyn z uwzględnieniem konsekwencji nie tylko ekonomicznych [62, 63, 64].

Ponadto, ze względu na konieczność podejmowania decyzji eksploatacyjnych, eksploatacja maszyn i innych urządzeń obejmuje (gdyż musi obejmować) obszar wiedzy dotyczący działania systemów antro- i socjotechnicznych. Stąd też twierdzenie S. Oziemskiego, że: „*eksploatację urządzeń technicznych należy rozpatrywać nie tylko jako zagadnienie techniczne, ale jako problem interdyscyplinarny – system, w którym powiązано oddziaływania techniczne, ekonomiczne, społeczne, ekologiczne na tle fluktuacji poziomu gospodarki kraju i życia ludzi w jedną całość*” [105]. Autor utożsamia się z tym poglądem i stosuje dalej konwencję, iż: „**eksploatacja to działanie człowieka z maszyną**”.

Chcąc uwzględnić wszystkie aspekty działania człowieka z maszyną, w Wielkiej Brytanii, w 1974 r., wprowadzono pojęcie „terotechnologia”. Definiuje się ją jako „*powiązanie zarządzania, finansowania, inżynierii i innych stosowanych w odniesieniu do obiektów technicznych działań praktycznych, ukierunkowanych na minimalizację kosztów eksploatacji tych obiektów*” [25]. W Polsce jednak pojęcie to nie przyjęło się, a obszar tych zadań opisuje się pojęciem „**inżynieria eksploatacji**” [29]. W tym znaczeniu eksploatacja obejmuje zbiór czynności związanych z celowym i efektywnym użytkowaniem oraz obsługiwaniem różnych maszyn i urządzeń, traktowanych jako środki techniczne. Takie całościowe ujmowanie eksploatacji rozwija również środowisko naukowe w Polsce, co znalazło potwierdzenie w dotychczasowym dorobku tego środowiska, oraz normie terminologicznej PN-82/N-04001, z której wynika, że:

- *eksploatacja* – to zespół celowych działań organizacyjno-technicznych i ekonomicznych ludzi z obiektem mechanicznym oraz wzajemne relacje występujące pomiędzy nim od chwili przejścia do użytkowania zgodnie z przeznaczeniem, aż do likwidacji,
- *zarządzanie eksploatacją* – to działanie obejmujące planowanie i podejmowanie decyzji, organizowanie, kierowanie i kontrolowanie, skierowane na zasoby systemu eksploatacji (ludzkie, finansowe, rzeczowe i informacyjne), wykonywane z zamiarem osiągnięcia: racjonalnego wykorzystania obiektów mechanicznych i utrzymania ich w stanie zdatności funkcjonalnej.

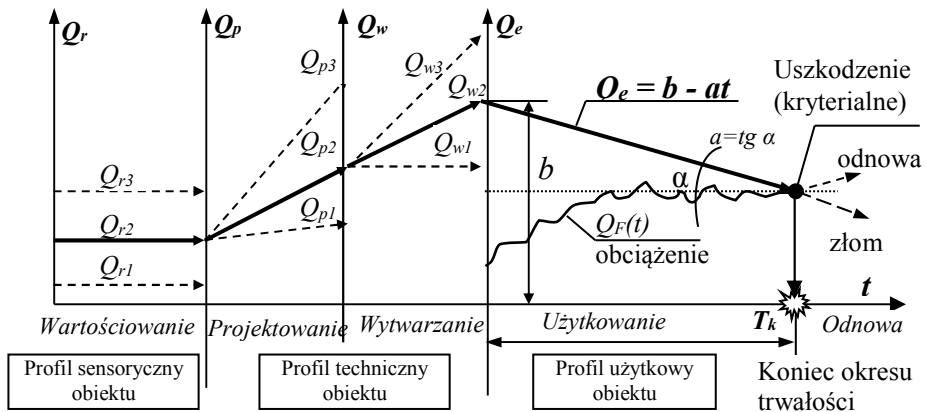
Inżynierię eksploatacji należy utożsamiać zatem z poglądem, że jest to ogół czynności związanych z racjonalnym wykorzystaniem maszyn lub obiektów technicznych, przy czym:

- *maszyna* – to sztuczne urządzenie przeznaczone do częściowego lub całkowitego zastąpienia funkcji energetycznych, fizjologicznych lub intelektualnych człowieka [54],
- *obiekt techniczny* – dowolne urządzenie, charakteryzujące się tym, że [66]:  
– ma określone przeznaczenie (zbiór zastosowań),

- ulega uszkodzeniom i wymaga obsługiwań,
- może być ulepszane,
- może szkodzić człowiekowi i środowisku,
- przechodzi w swym istnieniu przez różne fazy (etapy życia).

Te cechy można uznać także za podstawowe cechy maszyny. Stąd jej eksploatacja obejmuje dwa różne aspekty [130]:

- *działanie* – znamienne tym, że występuje ona w dwu rolach: jako podmiot działania (wówczas jest użytkowana) i jako przedmiot działania (wówczas jest obsługiwana),
- *zbiór stanów* – pogrupowanych w fazy jej istnienia i określaných ogólnie jako stany jakościowe: jakości rynkowej  $Q_r$ , projektowej  $Q_p$ , wytwarzania  $Q_w$  i eksploatacyjnej  $Q_e$  – rys. 5 [135].



Rys. 5. Schemat zmiany stanów jakościowych maszyny [135]

Przejęcie maszyny na kolejny etap realizacyjny transformuje jej cechy jakościowe. Na każdym z tych etapów jej życia występuje oddziaływanie czynników losowych, które powodują zróżnicowanie tych cech, np.  $Q_{p1}$ ,  $Q_{p2}$ ,  $Q_{p3}$ , ...  $Q_{pn}$ . Stąd linia opisująca zmiany stanów (*stan – to wszystko to, co się dzieje z obiektem w danej chwili czasu t*) jest zmienną losową, np.: od  $Q_{p1}$  do  $Q_{pn}$ . Efektem tego jest, że okres trwałości maszyny  $T_k$  jest także zmienną losową i może być jedynie wyznaczony w sposób przybliżony, opisując przebieg zużycia (wynikającego z obciążeń  $Q_F$ , które też są zmienne) modelem liniowym o postaci [135]:

$$Q_e = b - at \quad (1)$$

gdzie:

$b$  – jest stałą zależną od jakości technicznej ( $Q_p + Q_w$ ),

$a$  – stała, która określa intensywność procesów zużycia w danej maszynie.

### 1.3. Cele i struktura nauk o eksploatacji

Kto nie wie dokąd zdąży, prawdopodobnie tam nigdy nie dotrze; cel, warunki i środki to trzy człony każdej działalności praktycznej – jak określa to T. Kotarbiński w swoim dziele „Traktat o dobrej robocie” [66]. Pojęcie *celu* możemy rozpatrywać jako zamierzony rezultat naszego działania. Samo pojęcie celu zakłada, że mamy pewien wpływ na to, co robimy, lub przynajmniej jesteśmy narzędziem w rękach kogoś, kto taki wpływ ma. Działać z własnego wyboru może tylko ktoś mający realny wpływ na swoje ruchy, kiedy to, co robi, jest zależne tylko od niego.

Ponieważ we wszechświecie nie mogą istnieć dwa obiekty o identycznych właściwościach, można wyciągnąć stąd wniosek, że do każdego celu rozumianego jako jedno konkretne zdarzenie, prowadzi tylko jedna droga. W nauce i technice nazywamy ją *drogą optymalną*. Takiej drogi stale i wciąż poszukujemy, racjonalizując nasze działania.

Ogólnie biorąc **celem nauk eksploatacyjnych** jest przede wszystkim tworzenie i rozwijanie wiedzy naukowej, dotyczącej eksploatacji, stosując metody naukowe. Ponadto, dążenie do uwiarygodnienia wiedzy o walorach użytkowych, co sprawia, że ulega zmniejszeniu obszar wiedzy zdroworozsądkowej, jeszcze przez naukę nie zweryfikowanej. Wyniki tych nauk winny umożliwiać przewidywanie wszelkich skutków niewłaściwego obchodzenia się z eksploatowanym obiektem [110]. Jednakże nie jest to wszystko, czego spodziewamy się od nauk eksploatacyjnych. Bardziej szczegółowo cel ten można określić na podstawie wytycznych programowych MNiSzW w ramach kursu „Eksploatacja”. I tak:

- *zakładane cele edukacyjne:*
  - rozumienie istoty poprawnej eksploatacji oraz określanie wpływu eksploatacji na trwałość obiektów technicznych,
  - poznanie zależności pomiędzy eksploatacją i niezawodnością obiektów technicznych,
  - kształtowanie umiejętności rozpoznawania czynników decydujących o prawidłowej eksploatacji i zmianie stanu obiektów technicznych,
  - przygotowanie do stosowania zasad poprawnego użytkowania, obsługi i zaopatrywania obiektów technicznych,
  - rozwijanie poczucia odpowiedzialności za techniczne i ekologiczne bezpieczeństwo eksploatacji,
  - rozwijanie zainteresowań postępowaniem techniczno-organizacyjnym w eksploatacji.

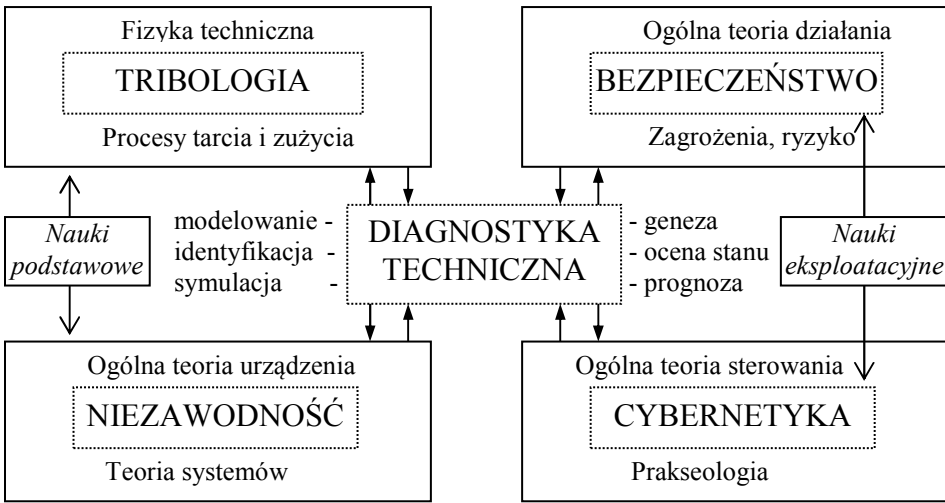
- *zakładane umiejętności:*
  - interpretowanie podstawowych pojęć z zakresu eksploatacji obiektów technicznych,
  - wyjaśnianie zależności między eksploatacją, trwałością i niezawodnością,
  - charakteryzowanie typowych podsystemów eksploatacji oraz wykazywanie występujących w nich zależności,
  - określanie przyczyn występowania procesów zużyciowo-starzeniowych oraz metod zapobiegania i likwidowania ich skutków,
  - interpretowanie informacji o zmianach stanu obiektów technicznych,
  - charakteryzowanie poziomów niezawodności typowych obiektów technicznych,
  - przewidywanie zagrożeń wynikających z nieprawidłowej eksploatacji,
  - stosowanie technologii informatycznej w planowaniu, projektowaniu, realizacji i zarządzaniu eksploatacją obiektów technicznych,
  - ocenianie obiektów technicznych według kryterium niezawodności,
  - korzystanie z technicznych źródeł informacji podczas rozwiązywania problemów eksploatacyjnych.

Z definicji eksploatacji wypływa natomiast zakres oczekiwanych, merytorycznych umiejętności w zakresie **inżynierii eksploatacji**, określanych jako *cele użytkarne*:

- kierowanie eksploatacją systemów technicznych,
- formułowanie zadań projektowych na bazie rozpoznania potrzeb,
- identyfikowanie stanów technicznych,
- kontrolowanie procesów tribologicznych,
- identyfikowanie cech systemów technicznych, w tym ich wartości,
- wyznaczanie i ocenianie sprawności obiektów technicznych,
- określanie ryzyka awarii i szans właściwej pracy obiektów technicznych,
- planowanie rozwoju i modernizacji obiektów technicznych,
- dobieranie strategii utrzymywania w ruchu obiektów technicznych.

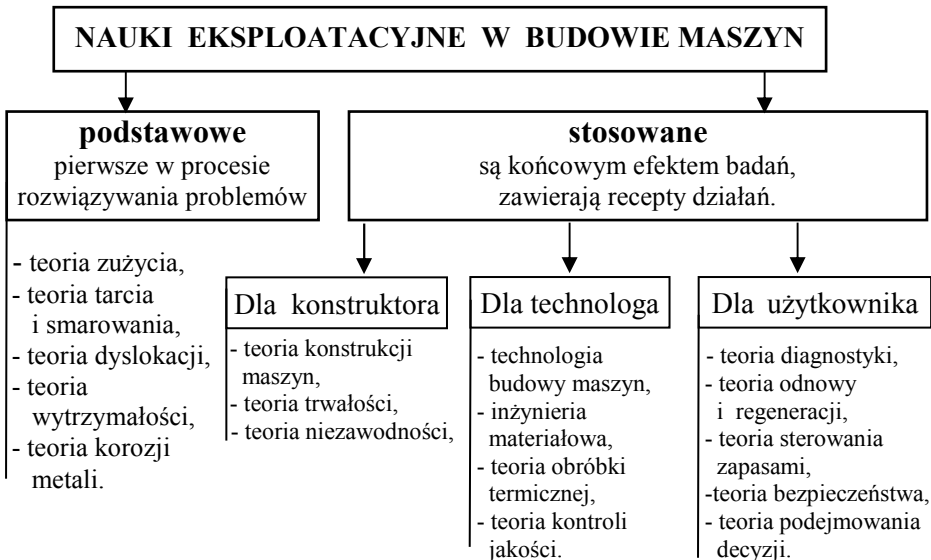
Realizacja wszystkich tych celów wymaga szerokiego spektrum wiedzy ogólnej i specjalistycznej. Gwoli przykładu można tu tylko podać, że omówienie samej diagnostyki technicznej wymagało, np. 1110 stron tekstu w książce B. Żółtowskiego i Cz. Cempla: „Inżynieria diagnostyki maszyn” [160].

Główne dziedziny wiedzy eksploatacyjnej obrazuje schemat na rys. 6 [159].



Rys. 6. Schemat powiązania nauk eksploatacyjnych z naukami podstawowymi [159]

Wśród nauk eksploatacyjnych, stosowanych w budowie maszyn, wyróżnia się dwie komplementarne grupy: podstawową i stosowaną. Każda z tych grup obejmuje różne zestawy wiedzy (teorie) – rys. 7 [110].



Rys. 7. Nauki eksploatacyjne wykorzystywane w budowie maszyn [110]



## 1.4. Prakseologiczne ujęcie eksploatacji

Eksploatacja to działanie człowieka z maszyną [105]. Działanie to „świadome zachowanie się zmierzające do określonego celu” [67]. Maszyny nie mając świadomości nie działają, tylko funkcjonują (wypełniają określone zadania); lepiej lub gorzej – ale tylko wykonują to, do czego zostały przewidziane podczas projektowania. Do opisu funkcjonowania maszyn szczególnie przydatny jest aparat pojęciowy cybernetyki i prakseologii.

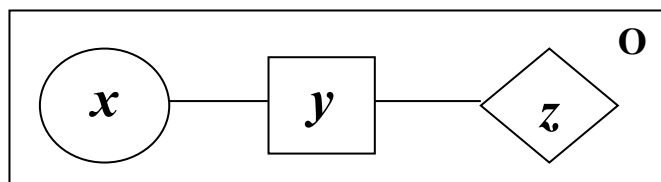
Każdą czynność podejmujemy z zamiarem wykonania lub osiągnięcia pewnego celu. Cel działania wynika z tego, co człowiek (podmiot działania) chce osiągnąć. Zatem występuje relacja: *cel działania* → *co chce osiągnąć?*, a z tego wynika: *co trzeba zrobić?*, aby cel osiągnąć natomiast *motywacja działania* → *po co to robi*. Celem człowieka jest projektowanie takich maszyn, aby „włożyć” tyle ile potrzeba, a „wyciągnąć” tyle, ile się da [134]. Tego typu ujęcie jest zasadą prakseologii, czyli nauki o sprawnym działaniu. W nauce eksploatacji wykorzystuje się dorobek prakseologii, z uwagi na fakt, iż wszystkie postulaty eksploatacji zawierają się w kategoriach sprawności.

Do metodologicznego opisu działania człowieka z maszyną zwykle stosuje się prakseologiczny model działania, który bazuje na tzw. „trójce Kotarbińskiego”, opisującej elementarny łańcuch działania [87].

W eksploatacji występuje wiele łańcuchów działania powiązanych ze sobą określonymi relacjami przestrzennymi, funkcjonalnymi, chronologicznymi i innymi. Z punktu widzenia realizacji zadania, sytuacja eksploatacyjna będzie w pełni określona, jeśli znane są następujące składowe działania [62]:

- sprawca, podmiot, użytkownik (*kto to robi?*),
- cel działania (*po co to robi?*),
- przyczyna (*dlaczego to robi?*),
- środek techniczny – obiekt techniczny (*czym to robi?*),
- metoda postępowania (*w jaki sposób to robi?*),
- przedmiot działania (*z czego, na co się oddziałuje?*),
- otoczenie – warunki (*w jakich okolicznościach?*),
- wynik (*co osiągnięto, lub co zrobiono?*).

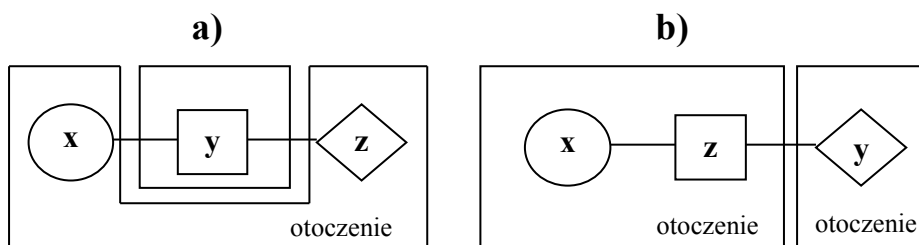
Warunkiem koniecznym (choć jak podano wyżej, niewystarczającym do pełnego opisu) jest istnienie trzech elementów: sprawcy – podmiotu działania (*x*), narzędzia – środka technicznego (*y*) i przedmiotu działania (*z*), które tworzą elementarny łańcuch działania, funkcjonujący w określonym otoczeniu (*o*). Nie może być zatem żadnego działania, jeżeli nie można wyróżnić tych podstawowych elementów – rys. 8 [62].



Rys. 8. *Elementarny łańcuch działania (model prakseologiczny eksploatacji)* [62]

Rolę sprawcy (jak wcześniej nadmieniono) może spełniać tylko człowiek (albo grupa ludzi). Pozostałe role w łańcuchu działania mogą spełniać ludzie, obiekty techniczne, zwierzęta, rośliny, informacje, materiały, energia, itp. [29].

Jeżeli wyróżniony przez nas obiekt (np. pojazd) spełnia w łańcuchu działania rolę środka technicznego (narzędzia) ( $y$ ), to takie działanie nazywamy *użytkowaniem* tego obiektu (rys. 9a), jeżeli natomiast ten sam pojazd jest przedmiotem działania ( $z$ ), np. gdy jest nalewane do niego paliwo na stacji benzynowej, to takie działanie nazywa się obsługiwaniem – rys. 9b [62].



Rys. 9. *Interpretacja graficzna łańcuchów działania:*  
**a) łańcuch użytkowania, b) łańcuch obsługiwania** [62]

Badany przez nas pojazd może w danym łańcuchu spełniać rolę pośrednika – środka technicznego ( $y$ ) lub przedmiotu operacyjnego ( $z$ ), na którym wykonujemy różne działania obsługowe. W najprostszym przypadku występują dwa współzależne łańcuchy: użytkowania i obsługiwania tego pojazdu. Taką całość nazywa się elementarnym układem eksploatacji danego środka technicznego.

Mówimy, że urządzenie (pojazd) jest użytkowane wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje taki łańcuch działania, w którym to urządzenie jest pośrednikiem lub elementem pośrednika działania (rys. 9a). Łańcuch taki, ze względu na dane urządzenie, nazywać będziemy *łańcuchem użytkowania*, a odbywający się w nim proces działania – *procesem użytkowania* (lub krócej – *użytkowaniem*), przy czym przez *użytkowanie* rozumiemy całokształt działań związanych z wykorzystaniem obiektu technicznego zdolnego do pracy. Urządzenie w takim

łańcuchu jest *obiektem użytku* (użytkowania). Podmiot działania zaś w tym łańcuchu nazywać będziemy użytkownikiem. Łańcuch użytkowania można zapisać w postaci trójki uporządkowanej (137):

$$L_u = \langle x, y, z \rangle \quad (2)$$

Przykłady łańcuchów użytkowania badanego pojazdu ( $p$ ) [130]:

	(x)	(y)	(z)
a)	kierowca	ciężarówka	materiał budowlany,
b)	kierowca	autobus	zbiór pasażerów,
c)	kierowca	prywatny pojazd	kierowca.

W przykładzie „c” kierowca wiezie sam siebie, czyli podmiot działania jest jednocześnie przedmiotem działania. Przedmiot działania w łańcuchu użytkowania określa się przedmiotem operacyjnym. Sens bowiem korzystania z urządzenia w takim łańcuchu polega na jego użyciu w działaniu na pewien przedmiot zewnętrzny, którym mogą być ludzie, czy inne urządzenia. Działania takie nazywa się często w praktyce operacjami (z punktu widzenia urządzenia – zewnętrznymi procesami roboczymi), a użytkowników urządzeń – operatorami.

Co jakiś czas urządzenie techniczne poddawane jest procesowi obsługi, przy czym przez obsługiwanie rozumiemy całokształt działań związanych z podtrzymywaniem i przywracaniem stanu zdatności obiektowi technicznemu. Mówimy, że urządzenie jest obsługiwane wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje łańcuch działania, w którym to urządzenie jest przedmiotem lub elementem przedmiotu działania (rys. 9b). Łańcuch taki, ze względu na dane urządzenie, nazywać będziemy *łańcuchem obsługiwania*, odbywający się zaś w nim proces działania – procesem obsługiwania (lub krócej – obsługiwaniem). Łańcuch obsługiwania opisujemy więc trójką:

$$L_o = \langle x, z, y \rangle \quad (3)$$

Stąd wynika, że o eksploatacji możemy mówić jedynie wtedy, gdy dane urządzenie jest albo użytkowane, albo obsługiwane, czyli łańcuch eksploatacji ( $L_e$ ) opisuje zależność:

$$L_e = L_u \cup L_o \quad (4)$$

W tym sensie samochód jest zarówno wtedy eksploatowany, gdy jest prowadzony przez kierowcę, jak i wtedy, gdy jest przechowywany w garażu lub remontowany. To samo dotyczy również innych urządzeń [62].

## 1.5. Problemy eksploatacyjne i ich podział

Podczas użytkowania maszyn i innych urządzeń technicznych występują różne nieprzewidziane zdarzenia, które ogólnie nazywamy problemami. Problem jest to zadanie, którego nie możemy rozwiązać za pomocą znanych wzorców (posiadanej wiedzy) [137].

Należy tu zaznaczyć, że tylko niektóre zdarzenia (na pewno nie wszystkie, które zachodzą w eksploatacji) mogą stwarzać problemy. Np. uszkodzenie maszyny jest niewątpliwie problemem, ale jej uruchomienie nie powinno być problemem chyba, że brakuje zasilania, bądź eksploatacator nie umie jej uruchomić, zaś w przypadku silnika spalinowego jego uruchomienie może być niemożliwe, np. jeżeli akumulator ulegnie rozładowaniu.

Punktem wyjścia do znalezienia rozwiązania jest zwykle dobre umiejscowienie (klasyfikacja problemu). Przykład kryteriów podziału i klasyfikację problemów eksploatacyjnych ze względu na te kryteria podano w tablicy 1 [100].

Tab. 1. *Podział problematyki eksploatacyjnej* [100]

KRYTERIUM	PROBLEMY EKSPLOATACYJNE
Funkcja urządzenia	- urządzeń I rodzaju (podstawowych) - urządzeń II rodzaju (pomocniczych)
Złożoność urządzenia	- urządzeń prostych (np. narzędzi) - urządzeń złożonych (np. obrabiarek, pojazdów, itp.)
Liczba urządzeń	- urządzenia pojedynczego - grupy urządzeń
Miejsce człowieka w działaniu z urządzeniem	- działania bezpośredniego - działania pośredniego (problemy kierownicze)
Rola urządzenia eksploatowanego	- urządzeń użytkowych - urządzeń obsługiwanych
Instytucja zainteresowana urządzeniem	- instytucji badawczych (projektantów urządzeń i ich systemów) - instytucji szkoleniowych (nauczycieli kadr eksploatacyjnych) - instytucji realizujących (producentów i służb ruchu)
Rodzaj podsystemu eksploatacji	- systemu zaopatrzenia - systemu remontu - systemu obsługi bieżącej - systemu zbierania i przetwarzania informacji - systemu użytkowania

Problemy można też klasyfikować wg sposobu ich rozpoznawania. Przykład podziału problemów ze względu na to kryterium podano w tab. 2 [100].

Tab. 2. *Klasyfikacja problemów eksploatacyjnych oraz sposoby ich badania* [100]

TECHNICZNE		ORGANIZACYJNE		ZARZĄDCZE	
1	Kształtowanie i rozpoznawanie cech eksploatacyjnych; <i>Analiza uszkodzeń</i>	4	Organizowanie i poprawianie struktur eksploatacyjnych; <i>Analiza relacji</i>	7	Identyfikowanie obiektu jako przedmiotu eksploatacji; <i>Analiza zjawisk</i>
2	Zużywanie i odtwarzanie zasobów funkcjonalnych; <i>Analiza strat</i>	5	Harmonizowanie obowiązków, uprawnień i odpowiedzialności; <i>Analiza konfliktów</i>	8	Dobór wskaźników i charakterystyk eksploatacyjnych; <i>Analiza zmienności</i>
3	Dobór technologii i technicznych środków eksploatacji; <i>Analiza bezpieczeństwa</i>	6	Określanie zakresu i zasad obiegu informacji eksploatacyjnej; <i>Analiza zdarzeń</i>	9	Oceny i decyzje eksploatacyjne; <i>Analiza wartości</i>
10	Rozpoznawanie ryzyka i kosztów eksploatacji; <i>Analiza niezawodności</i>				

Z punktu widzenia inżynierskiego ważny jest podział problemów na [137]:

- *dewiacyjne* – w systemie pojawia się defekt, a jego przyczyna jest nieznaną,
- *optymalizacyjne* – pojawia się konieczność szukania ekstremum jakiejś funkcji,
- *innowacyjne* – występuje potrzeba dokonania przebudowy systemu.

W inżynierii eksploatacji najbardziej istotne są problemy optymalizacji, np. łatwo możemy zwiększyć trwałość i niezawodność obiektu projektując go z trwalszych i wytrzymalszych elementów. Działanie to jednak pociągnie to za sobą znaczny wzrost jego ceny. Od nauk eksploatacyjnych oczekuje się więc nie tylko zapewnienia możliwości przewidywania skutków dla różnych sposobów eksploatacji i określenia przedsięwzięć, zapewniających wzrost trwałości i niezawodności obiektu, ale także żąda się, aby wskazywały najwłaściwsze (optymalne) z punktu widzenia efektywności procesu eksploatacji, strategie utrzymania ruchu [110].

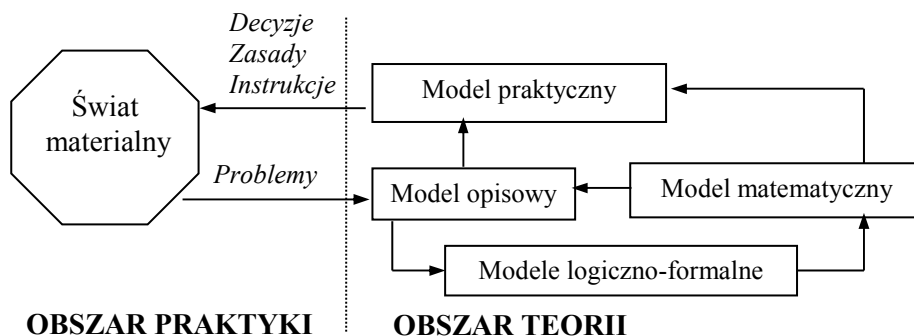
Kryteriami optymalizacji (bądź też warunkami ograniczającymi) w przypadku eksploatacyjnych problemów utrzymania ruchu mogą być, np.: koszt, czas, mobilność, ciągłość zabezpieczenia realizacji stawianych zadań itp. W zakresie tej problematyki można wyróżnić [3]:

- *problemy optymalizacji właściwości eksploatacyjnych urządzenia*; jako przykłady konkretnych problemów można tu wymienić:

- jak ustalać zakresy prac obsługowych i normy międzyobsługowe?,
- jak wdrażać nowe urządzenie do eksploatacji?,
- kiedy wycofać urządzenie z eksploatacji?,
- jakich przedsięwzięć wymaga przedłużenie eksploatacyjnej żywotności urządzenia?,
- jakie są w danych warunkach optymalne intensywności użytkowania urządzenia?
- *problemy optymalizacji organizacji systemu eksploatacji*; przykładowo:
  - jaka jest wielkość jednostek zabezpieczających eksploatację?,
  - jaka powinna być struktura terytorialna systemu eksploatacji?,
  - jak organizować przechowywanie i transport urządzeń w systemie eksploatacji?,
  - jakie powinno być wyposażenie techniczne jednostek obsługi?

Istota rozwiązywania problemów eksploatacyjnych (utrzymania ruchu i innych) polega na umiejętności znalezienia pewnego uogólnionego wzorca postępowania, słusznego dla pewnej klasy problemów. Problem eksploatacji można sformułować na różnym poziomie ogólności przy czym dla każdego problemu należy dobrać odpowiednią skalę uogólniania.

Uogólnianie problemów pozwala na budowanie dla danej klasy zjawisk eksploatacyjnych tzw. *modelu*. Takie postępowanie nazywa się *modelowaniem*. Istotą modelowania jest uproszczenie i opis rzeczywistości w języku logiki bądź matematyki. Modele powstają zatem jako intelektualny opis rzeczywistości i dotyczą teorii – rys. 10 [146].



Rys. 10. *Wykorzystywanie modelowania do rozwiązywania problemów eksploatacyjnych* [146]

Posiadając praktyczny model (strategie) można na jego podstawie podjąć właściwą decyzję, opracować określone zasady lub instrukcje postępowania (algorytmy eksploatacyjne). Przykłady takich strategii dotyczących utrzymania ruchu maszyn i urządzeń będą przybliżone w rozdziale IV.

## 1.6. Podsumowanie

*Rozdział I* jest wprowadzeniem w problematykę eksploatacji. Omówiono w nim przemysłowy proces realizacji, który jest funkcją społecznego systemu działania, zwracając szczególną uwagę na miejsce eksploatacji. Podano trzy istotne cechy opisujące istotę tego procesu oraz uwypuklono fakt, iż proces ten przebiega w dwóch sferach: abstrakcji (myślowej) i konkretności (materializacji myśli), w którym jednym z etapów jest eksploatacja.

Przeprowadzono rozważania dotyczące pojęcia eksploatacji i jej istotnych cech w odniesieniu do maszyn i innych urządzeń technicznych. Zwrócono uwagę, że pojęcie to nie oddaje w pełni działań związanych z użytkowaniem i odnową tych urządzeń, stąd wprowadzono pojęcie „inżynieria eksploatacji” i omówiono jej istotę.

Podano cele kształcenia w tym zakresie oraz zakres oczekiwanych umiejętności, rozumianych jako wiedzę proceduralną, czyli pozwalającą w sposób praktyczny spożytkować nabyte wiadomości. Podkreślono, że wiedza eksploatacyjna jest wiedzą systemową i wymaga umiejętności syntezy wielu wiadomości z różnych obszarów techniki. Pokazano, jakie nauki tworzą zręby wiedzy eksploatacyjnej, dotyczącej budowy maszyn, i jaki jest ich związek z naukami podstawowymi.

Wychodząc z prakseologii, czyli nauki o sprawnym działaniu, omówiono rodzaj działań, które muszą być znane, aby dokonać opisu sytuacji eksploatacyjnej. Podkreślono w tym zakresie istnienie dwóch odrębnych łańcuchów działania (użytkowania i odnowy), których zaistnienie i wyróżnienie jest dowodem na to, że mamy do czynienia z eksploatacją. Zdefiniowano pojęcie tych łańcuchów i podano przykłady w tym zakresie.

Zwrócono uwagę, że podczas użytkowania (ale także i odnowy) urządzeń technicznych występują różne nieprzewidziane zdarzenia, które wywołują sytuację określaną jako problem. Przyjmując różne kryteria podano klasyfikacje takich problemów. Wyróżniono trzy zasadnicze klasy problemów: techniczne, organizacyjne oraz zarządcze oraz podano sposoby ich badania. Podkreślono, że z punktu widzenia inżynierii eksploatacji najbardziej ważne jest grupowanie problemów na: dewiacyjne, optymalizacyjne oraz innowacyjne. Podano, że istota rozwiązywania tego typu problemów polega ogólnie na znalezieniu pewnego, uogólnionego wzorca postępowania, a istotę tego typu działania określa się modelowaniem. Podkreślono wagę modeli eksploatacyjnych określanych jako strategie utrzymania ruchu.

## 2. DZIAŁANIA ZE ŚRODKIEM TECHNICZNYM

### 2.1. Realizacja potrzeb społecznych

Działanie jest to świadome zachowanie się człowieka, podjęte w celu zrealizowania jakiejś potrzeby [93]. Człowiek w swym działaniu, z racji swojej niewielkiej wydolności fizycznej, wspomaga się różnymi pomocami. Pomoce te przyjęto określać jako „środki techniczne” [39]. Pojęciem tym określa się sztucznie wytworzone obiekty, realizujące wyznaczone im funkcje. Środki techniczne służą człowiekowi do ulżenia pracy, pomnożenia jej efektów, lub wyzwolenia się od jej trudów. Istotą działania środków technicznych jest transformacja: masy, energii lub informacji. Transformacja ta może być dwojakiego rodzaju:

- maszynowa, realizowana przez maszyny,
- niemaszynowa, realizowana przy użyciu narzędzi.

W zależności od rodzaju dokonywanej transformacji wyróżnia się:

- *maszyny energetyczne*, np. silniki (transformacja energii),
- *maszyny technologiczne*, np. obrabiarki (transformacja masy),
- *maszyny elektroniczne*, np. komputery (transformacja informacji).

Z założenia więc maszyna to urządzenie zastępujące człowieka w przestrzeni zadaniowej. Podstawowym wymogiem jest realizacja przewidzianej czynności, czyli *zdatność zadaniowa*. Maszyna ma nieporównanie bardziej większą zdatność zadaniową niż człowiek. Ponadto, ma zapisaną w oprogramowaniu perfekcję, kieruje się wyłącznie logiką i nie musi pamiętać o innych ludziach [87].

Zastępowanie ludzi maszynami to rzecz oczywista. Nie tylko dlatego, że nie strajkują i się nie męczą. Wymagania jakościowe są dziś tak wygórowane, że z potrzebną do ich spełnienia precyzją poradzić sobie mogą jedynie automaty, Świat współczesny jest światem maszyn i ich rozwiniętych postaci – *automatów*.

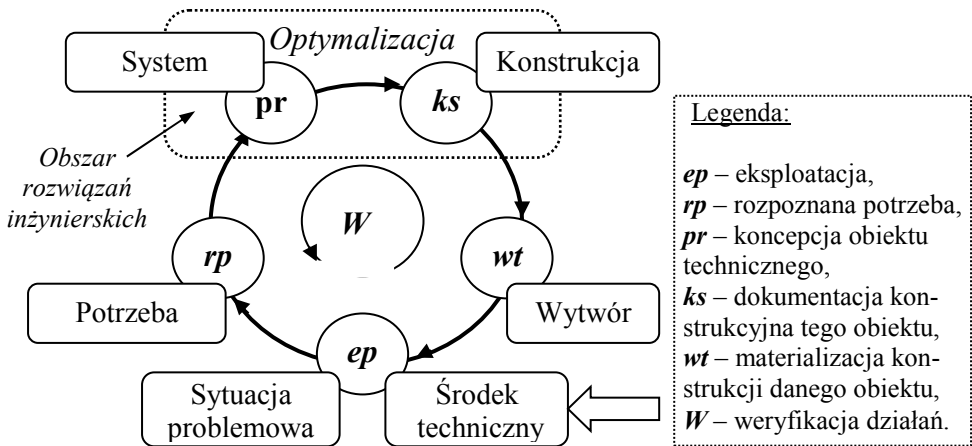
W zakresie stopnia automatyzacji można wyróżnić dwie istotne fazy [162]:

- *mechanizacja* – to zastąpienie pracy ręcznej pracą maszyn; człowiek nie dostarcza już energii, kieruje maszyną oraz steruje jej wewnętrznymi procesami,
- *automatyzacja* – to całkowite wyeliminowanie (automatyzacja kompleksowa) lub znaczne ograniczenie (automatyzacja częściowa) bezpośredniego udziału człowieka w pracę maszyny.



*Automatyzacja* jest jednym z najlepszych sposobów na osiągnięcie efektywności operacyjnej, szczególnie wtedy, gdy nowe maszyny są używane w połączeniu z nowoczesną techniką informatyczną. Może mieć naturę techniczną, ekonomiczną i organizacyjną [51].

Istotne aspekty cyklu życia środków technicznych mogą być analizowane na podstawie schematu przedstawionego na rys. 11 [157].



Rys. 11. *Automat Dietrycha* opisujący cykl życia środków technicznych [157]

Schemat ten, nazwany na cześć wybitnego polskiego konstruktora, profesora Politechniki Śląskiej w Gliwicach Janusza Dietrycha (1907-2001) „*Automatem Dietrycha*” (AD), ilustruje podstawową strukturę związków przyczynowo-skutkowych, zachodzących w procesach realizacji środków technicznych.

Środek techniczny istnieje we wszystkich fazach procesu zaspokajania potrzeb, ale w „różny sposób”. W fazach rozpoznawania potrzeby i projektowania jest on abstrakcją, zapisywaną i uszczegółowianą z wykorzystaniem odpowiednich notacji (zapis konstrukcji). W fazie wytwarzania jest on zmaterializowany pod postacią określonego wytworu [55].

Zasadniczym stadium AD jest *eksploatacja środka technicznego ep*. W tej fazie tworzą się różnego rodzaju sytuacje problemowe, które w części rozwiązywane są przez coraz doskonalsze środki techniczne. Praktycznie, istniejący realnie zbiór środków technicznych nie gwarantuje pełnego zaspokojenia potrzeb wszystkich jednostek w społeczeństwie. W odpowiedzi na *sytuację problemową* z tym związaną, pewna grupa społeczna rozszerza rozpoznanie potrzeb społecznych. W przedsiębiorstwie zadanie to określa się jako marketing.

Dalsza realizacja działań w Automacie Dietrycha ma się tak, że na podstawie rozpoznanej potrzeby *rp* grupa *projektantów* projektuje *system*. Jest on metodologicznym zbiorem określonych elementów i powiązań między nimi, tak dobranych, aby zaspokoić potrzebę, rozpoznaną i opisaną w stadium *rozpoznania potrzeby rp*. Kolejne stadium, *konstruowanie*, prowadzi do określenia koniecznych i wystarczających struktur *ks*, przyszłego środka technicznego, który będzie zdolny do realizacji zaprojektowanych działań. Styk systemu i konstrukcji to domena klasycznej inżynierii, gdzie poszukuje się stanów uznawanych za optymalne (przy danym poziomie wiedzy inżynierskiej).

Zapisana na określonym nośniku *konstrukcja* staje się w stadium *wytwarzania wt* podstawową informacją o koniecznych do wytworzenia strukturach materialnych w postaci gotowego *wytworu*. Ostatecznie *wytwór* poprawnie wytworzony przekazywany jest do eksploatacji, gdzie staje się *środkiem technicznym*, a jego działanie jest przyczyną nowej, zmienionej *sytuacji problemowej ep*.

Widoczna logika AD pokazuje hierarchiczną zależność kolejnych stadiów zaspokajania potrzeb. Bez rzetelnego *rozpoznania potrzeby* projektant nie mógłby poprawnie określić *systemu* gwarantującego zaspokojenie rozpoznanej potrzeby. Bez określenia *systemu* konstruktor nie może racjonalnie określić koniecznej i wystarczającej *konstrukcji* dla realizacji systemu.

Bez określenia *konstrukcji* nie ma żadnych możliwości stwierdzenia, że *wytwór* posiada wystarczającą zgodność z *konstrukcją*, a tym samym będzie zdolny do realizacji koniecznych *działań*. Widać zatem, jak poszczególne stadia AD zachodząc kolejno po sobie są wzajemnie uzależnione, a jednocześnie jak warunkują możliwość potwierdzenia adekwatności skutków każdego stadium.

Przeciwbieżna weryfikacja *W*, oznaczona na rys. 11 kolistą strzałką o kierunku odwrotnym do przebiegu podstawowych zależności przyczynowo-skutkowych AD, oznacza konieczność działań sprawdzających, które na mocy hierarchii podstawowej, prowadzone są przez przedstawicieli poprzednich stadiów względem sprawdzanego. Z zasady nadrzędności projektant *systemu* nie może odpowiadać za błędy popełnione podczas *rozpoznawania potrzeby*. Konstruktor nie ponosi odpowiedzialności za błędy marketingu i projektantów [157]. Wytwórca nie ponosi dodatkowo odpowiedzialności za błędy konstruktora. Tym samym konstruktor ma niezbywalne prawo do każdej formy kontroli zgodności wytworu z konstrukcją. Projektant ma niezbywalne prawo do weryfikacji skutku konstruowania w celu sprawdzenia, czy opracowana konstrukcja będzie zdolna do realizacji systemu. Marketing z kolei ma niezbywalne prawo do weryfikacji systemu pod kątem jego zdolności zaspokojenia rozpoznanej potrzeby.

## 2.2. Maszyna jako środek techniczny

Wśród środków technicznych wyróżniamy dwie grupy [62]:

- *pomieszczenia*, istotą tych środków jest spowalnianie zmian (np. na skutek klimatu),
- *urządzenia*, istotą których jest przyspieszanie zmian (np. podczas obróbki).

Urządzenia zwiększają siłę oddziaływania człowieka na otaczającą go rzeczywistość (intensyfikują pracę użyteczną). Wyróżnia się tu narzędzia i maszyny:

- *narzędzie* – to, ogólnie, układ materialny służący do celowego przekształcania innych układów materialnych i/lub do przekazywania komunikatów. Jego istotą jest to, że wymaga manipulacji i charakteryzuje się elastycznością,
- *maszyna* – to kombinacja ciał sztywnych, tak zestawionych, że przy ich pomocy można zmusić siły przyrody do wykonywania pracy. Jej istotą jest to, że wymaga obsługi i charakteryzuje się specjalizacją. Każda maszyna jest środkiem technicznym, ale nie każdy środek techniczny jest maszyną. Warunkiem koniecznym, aby coś nazwać maszyną, jest dostarczanie na wejściu energii innej niż od mięśni człowieka. Potocznie maszyny określa się pojęciem „urządzenie”. Urządzenie jest jednak pojęciem szerszym niż maszyna.

Każdy środek techniczny charakteryzują dwie cechy [26]:

- *własność*, cecha, którą nadaje się w trakcie konstruowania; po utracie tej cechy wyrób przestaje być tym, czym był – staje się innym wyrobem, np. krzesło po odcięciu oparcia przestaje być krzesłem, a staje się taboretem,
- *właściwość* – cecha, którą nabywa wyrób podczas eksploatacji ze względu na relacje do innego środka technicznego, np. właściwością danego samochodu jest to, że zużywa więcej paliwa od innego.

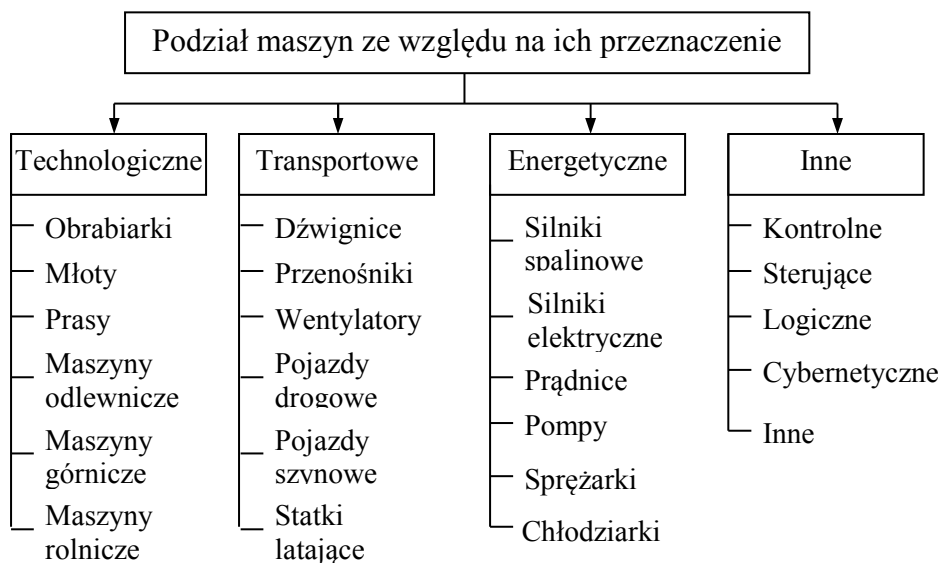
Zarówno narzędzia, jak i maszyny służą nam do usprawnienia pracy, pomnożenia jej efektów, wyzwolenia się od jej trudów. Na ogół nie odróżniamy zbyt dokładnie narzędzi od maszyn. Nie czujemy takiej potrzeby, być może dlatego, że nasze otoczenie jest nimi już tak bardzo nasycone. Maszyny występują w roli narzędzi, zaś stopień złożoności budowy czy obsługi wielu narzędzi jest dzisiaj tak wielki, że wszystkie one razem wydają nam się tym samym [48]. Jednak istnieją między nimi podstawowe różnice. Zasadnicza różnica między maszyną a narzędziem wyraża się stopniem niezależności ich działania [137]:

- *narzędzie* – wymaga manipulacji i charakteryzuje się elastycznością,
- *maszyna* – wymaga obsługi i charakteryzuje się specjalizacją.

Maszyna stanowi niepodzielną całość (system), w którym nie może zabraknąć żadnej przewidzianej części, gdyż uniemożliwia to jej funkcjonowanie zgodnie z projektem.

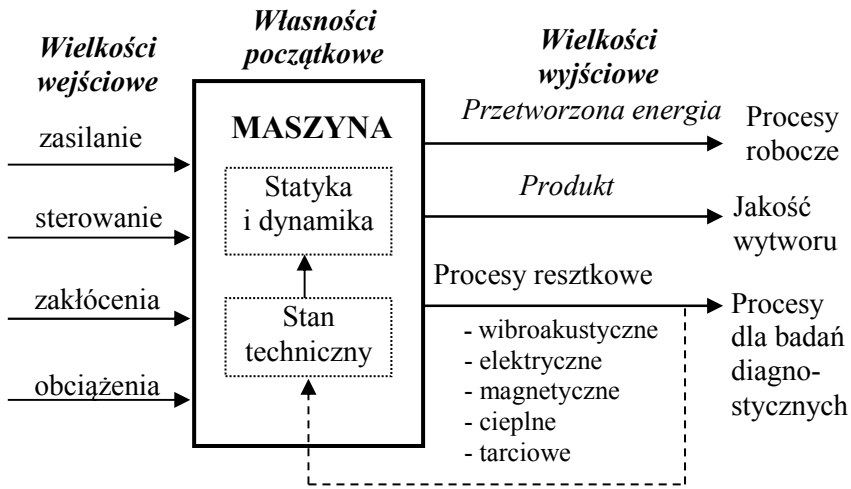
Interesującą definicję maszyny (ujmującą też ten aspekt) zawiera Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 grudnia 2009 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn i elementów bezpieczeństwa, według którego maszyna to „zeszół wyposażony, lub który można wyposażyć w mechanizm napędowy inny niż bezpośrednio wykorzystujący siłę mięśni ludzkich bądź zwierzęcych, składający się ze sprzężonych części albo elementów, z których przynajmniej jedna jest ruchoma, połączonych w całość mającą konkretne zastosowanie”.

Ze względu na spełniane czynności (przeznaczenie) maszyny dzieli się na cztery grupy – rys. 12 [98].



Rys. 12. *Podział maszyn ze względu na przeznaczenie* [98]

Każdą maszynę, niezależnie od jej klasyfikacji z rys. 12, opisują czynniki określone jako „3 W”: wielkości wejściowe, własności początkowe oraz wielkości wyjściowe [141]. Dwa podstawowe składniki wejściowe każdej maszyny to informacja i zasilanie. W trakcie projektowania zostają ustalone jej własności początkowe (cechy statyczne i dynamiczne). W wyniku złożenia się tych dwóch aspektów, uzyskuje się wielkości wyjściowe w postaci procesu roboczego, produktu oraz procesów resztkowych – rys. 13.



Rys. 13. Czynniki opisujące maszynę [141]

Przyjmując, że działanie realizowane jest przy użyciu maszyny, wyróżnia się:

- *intensywność działania teoretyczną* ( $\omega_{max}$ ), będącą własnością tego działania, czyli przewidzianego przez konstruktora w procesie projektowania tego wyrobu,
- *intensywność działania praktyczną* ( $\omega_p$ ), będącą właściwością tego działania, czyli uzyskanego w procesie eksploatacji.

Biorąc to pod uwagę można określić *sprawność* środka technicznego  $\eta$  [154]:

$$\eta = \frac{\omega_p}{\omega_{max}}. \quad (5)$$

Jest to skalarna bezwymiarowa wielkość fizyczna, określająca, w jakim stopniu dana maszyna (urządzenie) przekształca energię występującą w jednej postaci w energię innej postaci. Ruch maszyny jest możliwy tylko wtedy, gdy  $\eta > 0$ . Zwiększenie sprawności jest równoznaczne ze zmniejszeniem zużycia energii. Zgodnie z II zasadą termodynamiki, żaden środek techniczny nie może jednak uzyskać sprawności 100% (równiej 1).

Dążenie do jak największej sprawności wymaga redukcji strat. Jest to realizowane przez dobór odpowiednich charakterystyk maszyny, np. stopnia sprężania silnika spalinowego. Współcześnie następuje istotna zmiana jakościowa w tym zakresie, ponieważ zastosowanie mikroelektroniki pozwala w znaczący sposób podnieść sprawność maszyn [87], ale nigdy więcej niż 1.

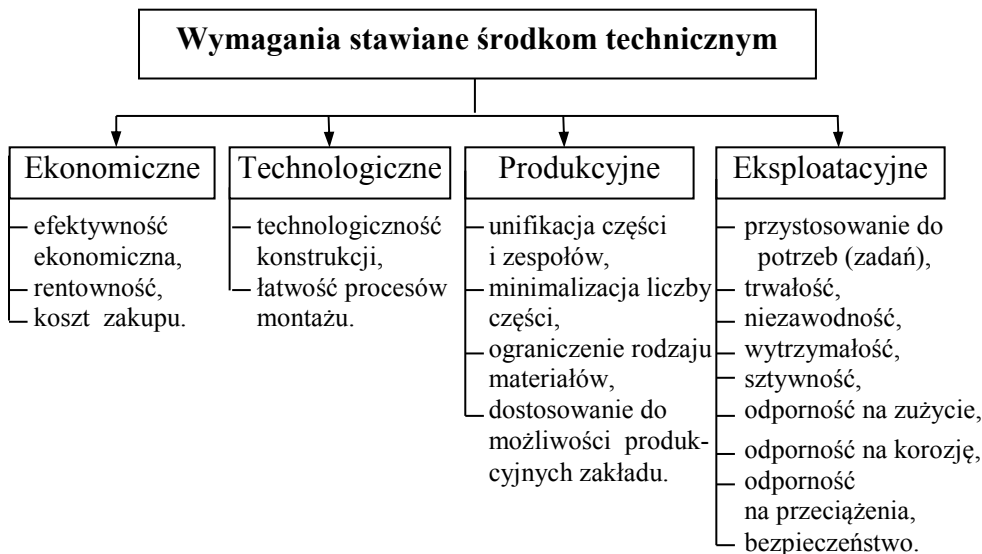
## 2.3. Wymagania stawiane środkom technicznym

Maszyny i inne urządzenia techniczne należą do podstawowych środków pracy. Użytkowane są zgodnie z określonymi wymaganiami. Słownikowo „wymaganie” jest to pewien warunek lub zestaw warunków, którym „coś” musi odpowiadać. Podaje się je najczęściej w postaci postulatów, czyli stanu, do którego należy dążyć.

Wymagania stawiane środkom technicznym można dzielić na rozmaite kategorie. Najbardziej ogólny ich zbiór można sformułować następująco [148]:

- wymagania, które muszą bezwzględnie być spełnione (bezpieczeństwo),
- wymagania, które są pożądane, ale nie niezbędne,
- wymagania o znaczeniu podrzędnym, które mogłyby zostać pominięte.

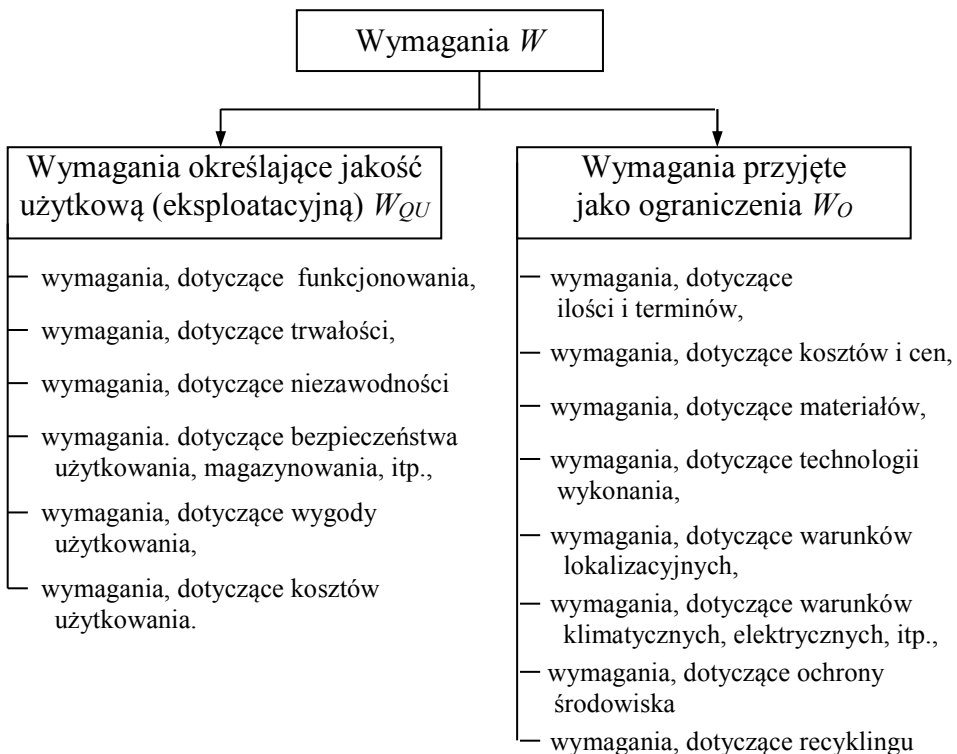
Ogólnie dla maszyn nie ma jednoznacznie określonych i w sposób uzasadniony zróżnicowanych wymagań projektowych. Wymagania takie, ze względu na szeroki asortyment maszyn, trudno jest bowiem uogólnić. Nie ulega wątpliwości, że powinny one wynikać z racji istnienia maszyny jako pewnego produktu techniki [26]. Stąd też wyróżnia się cztery grupy wymagań stawianych maszynom jako środkom technicznym – rys. 14 [127]:



Rys. 14. *Wymagania stawiane maszynom jako środkom technicznym* [127]

W procesie projektowania i konstruowania środków technicznych, specyfikacja merytorycznie jednoznacznego, spójnego i kompletnego zbioru wymagań jest jednym z istotnych warunków powodzenia oferty produkcyjnej [103]. Praktycznie trudno jest utworzyć, bez dokładnych analiz i działań wstępnych, dobry zbiór wymagań [26]. Wymaganie powinno być bowiem cechą systemu technicznego lub opisem tego, co projektowany środek techniczny powinien realizować, aby osiągnąć założony cel. Natomiast jak to ma realizować, jest przedmiotem projektu [148].

Z przedstawionych na rys. 14 wymagań ( $W$ ), według których ma być wykonana projektowana maszyna, zwykle wydziela się zbiór wymagań dotyczących jakości użytkowej ( $W_{QU}$ ), lub jakości technologicznej ( $W_{QT}$ ), względnie też jakości dystrybucji ( $W_{QD}$ ) i traktuje się jako funkcję celu. Jest to kryterium, według którego można oceniać dokonany wybór rozwiązania najlepszego spośród dopuszczalnych rozwiązań. Resztę wymagań traktuje się jako ograniczenia, których nie należy przekraczać, oznaczając je jako ( $W_O$ ) – rys. 15 [56].



Rys. 15. *Klasyfikacja wymagań w odniesieniu do środków technicznych* [56]

W Unii Europejskiej minimalne wymagania dotyczące środków technicznych użytkowanych w miejscach pracy (maszyn, narzędzi i aparatury oraz związanych z nimi instalacji) określa Dyrektywa Maszynowa nr 2006/42/WE, należąca do grupy tzw. dyrektyw społecznych, kierowanych do użytkowników maszyn i innych urządzeń technicznych, a przede wszystkim do pracodawców. Ponadto, dodatkowe wymagania ustala Dyrektywa Narzędziowa 655/WE oraz znowelizowane rozporządzenie Ministra Gospodarki z 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn (Dz. U. nr 199, poz. 1228 z dn. 29.12.2009 r.). Dyrektywy te nakładają na przedsiębiorców określone obowiązki w zakresie dostosowania maszyn do zaostrzonych wymagań bezpieczeństwa.

W Dyrektywie Maszynowej podaje się, że „w celu zapewnienia bezpieczeństwa maszyn konieczne jest przestrzeganie zasadniczych wymogów w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa; wymogi te muszą być stosowane, jako obowiązkowe, z uwzględnieniem stanu techniki w momencie powstania maszyny oraz wymogów technicznych i gospodarczych”. Producent chcąc zatem uzyskać świadectwo (certyfikat) zgodności z powyższą dyrektywą, musi sporządzić dla każdej wyprodukowanej maszyny deklarację zgodności WE, zgodnie z określoną procedurą postępowania, a jej efektem jest nadanie znaku CE.

Obowiązkiem producenta jest więc rozpoznanie wszystkich zagrożeń odnoszących się do danej maszyny, które musi następnie uwzględnić podczas projektowania i wytwarzania danej maszyny. Przykładowo do danych wymagań istnieje obowiązek działań dostosowawczych:

- *wymaganie* – uruchomienie maszyny winno być tylko przez celowe zadziałanie na przeznaczony do tego celu układ sterowania,
- ⇒ *działanie dostosowawcze* – zastosowanie rozwiązań technicznych wykluczających możliwość samoczynnego uruchomienia, np. po opuszczeniu osłony z blokadą, zadziałaniu wyłącznika krańcowego, przywróceniu napięcia zasilania, itp.
- *wymaganie* – winna być ograniczona możliwość bezpośredniego kontaktu z ruchomymi częściami maszyny mogącego powodować wypadki,
- ⇒ *działanie dostosowawcze* – dostęp do strefy zagrożenia blokują osłony, które mają trwałą konstrukcję, nie mogą być łatwo usuwane lub wyłączane ze stosowania,
- *wymaganie* – maszyna winna być wyposażona w układ do zatrzymania awaryjnego,
- ⇒ *działanie dostosowawcze* – maszyna musi mieć element sterowniczy przeznaczony do zatrzymania awaryjnego, który ma kształt „grzybka” koloru czerwonego na tle żółtym.



## 2.4. Cechy środków technicznych

Jeśli coś istnieje, to posiada jakieś cechy. Maszyna – jako środek techniczny – charakteryzowana jest przez zbiór cech, które ukształtowane zostały w fazie projektowania i wytwarzania. *Cecha* to odrębna charakterystyka jakiegoś wytworu materialnego (konkretu) lub utworu (abstraktu). Mówiąc o cechach maszyny mamy zatem na myśli jakieś jej własności konstrukcyjne lub właściwości eksploatacyjne, które dają się określić (najlepiej zmierzyć) i kształtować podczas jej wytwarzania. Cechy te wynikają głównie z chęci spełniania określonych wymagań, ustalonych na etapie formalizacji założeń.

Zarządzenie Prezesa Centralnego Urzędu Jakości i Miar z dnia 10.09.1968 w sprawie ogólnych wytycznych dotyczących kryteriów oceny jakości wyrobów (MP Nr 40/1968 poz.283) nakazuje wyróżniać trzy grupy cech:

- a) *cechy krytyczne*, tj. cechy, które decydują o stopniu zagrożenia dla życia lub zdrowia ludzkiego albo o utracie wartości użytkowej wyrobu,
- b) *cechy ważne*, tj. cechy posiadające istotne znaczenie z punktu widzenia przydatności wyrobu, lecz mogą przybierać różne wartości liczbowe stosownie do przeznaczenia,
- c) *inne cechy* (mało ważne), które związane są na ogół z jakością wyrobu.

Dobór cech i ich klasyfikacja uzależnione są od specyfiki wyrobu i jego przeznaczenia. Opisy cech wyrobu podaje się w zbiorze wymagań, które winien on spełniać. W zarządzeniu powyższym podaje się, iż dla maszyn – jako środków technicznych – cechami ważnymi mogą być:

- a) *wytrzymałość*, np. wytrzymałość mechaniczna, odporność izolacji na przebicie prądem, poprawność działania układów zabezpieczających i wyłączników awaryjnych, zabezpieczenie antytoksyczne, itp.,
- b) *funkcjonalność* – określana np. przez wydajność i sprawność,
- c) *niezawodność* mierzona, np.:
  - prawdopodobieństwem spełnienia wymaganych zadań w określonych warunkach, w określonym czasie lub przy określonej liczbie cykli,
  - średnią intensywnością uszkodzeń lub maksymalną ilością uszkodzeń,
- d) *żywość* mierzona, np.:
  - trwałością, rozumianą jako okres, przed którego upływem funkcjonalność nie spada poniżej właściwego poziomu (dla wyrobów nienaprawialnych),

- całkowitą żywotnością, rozumianą jako suma trwałości z uwzględnieniem kolejnych napraw lub regeneracji (dla wyrobów naprawialnych),
  - średnimi czasami między uszkodzeniami,
- e) *naprawialność* mierzona np. technologicznym czasem trwania napraw lub czasochłonnością oraz materiałochłonnością napraw i konserwacji.

Syntezyując powyższe, podstawowe cechy jakości eksploatacyjnej maszyny można podzielić na dwie grupy – rys. 16 [159].



Rys. 16. *Klasyfikacja cech jakości eksploatacyjnej maszyny* [159]

Zarówno jedną, jak i drugą grupę cech, charakteryzujących jakość eksploatacyjną maszyny, można ogólnie zaliczyć do grupy *cech techniczno-użytkowych*, tj. cech pierwotnych, które mają charakter obiektywny – są mierzalne, a więc nie zależą od odczuć człowieka. Dodatkowo dla większości maszyn cechami istotnymi, obok podanych wyżej, są cechy charakteryzujące je z punktu widzenia wymaga wzornictwa przemysłowego. Są to cechy wtórne (*emocjonalno-estetyczne*), dotyczące tych własności wyrobu, które mają zdolność oddziaływania na zmysły ludzkie. Cechy te są sprawą gustu – więc ze swej natury niemierzalne, ponieważ „o gustach się nie dyskutuje” i nie mierzy (metodami technicznymi).

Biorąc powyższe pod uwagę, można i należy przyjąć, że:

- tworzenie cech pierwotnych i ich pomiar należy do działań technicznych,

- tworzenie cech wtórnych jest domeną działań dizajnu (wzornictwa przemysłowego).

O ile cechy ważne mogą przybierać różne wartości (osłabiając co najwyżej tym samym sprawność maszyny), to cechy krytyczne muszą być bezwzględnie spełniane, ponieważ decydują o bezpieczeństwie. Naczelnym zadaniem projektanta maszyny jest więc zapewnienie bezpieczeństwa użytkownikowi maszyny.

W naukach technicznych spotykamy się z odniesieniem *bezpieczeństwa* tylko do człowieka – jako zagrożenie życia lub zdrowia – natomiast wszelkie sprawy „bezpieczeństwa” maszyny odnoszone są do niezawodności [145]. Jest tak dlatego, że jeżeli maszyna jest niezawodna, to nie występują w niej nagłe uszkodzenia, a tym samym jest ona bezpieczna dla człowieka i całego środowiska przyrodniczego. Dlatego bezpieczeństwo pracy maszyny wpisuje się w niezawodność [105].

Ustalenie normatywnego poziomu bezpieczeństwa to zagadnienie ekonomiczne i społeczne. Oceny bezpieczeństwa dokonuje się analizując prawdopodobieństwo wystąpienia ryzyka. Każde działanie techniczne wynika dziś z warunkowań ekonomicznych, stąd istotnego znaczenia nabiera pytanie: jakie jest dopuszczalne ryzyko i czy nie przekracza ono wartości akceptowanych? Ryzyko jest definiowane jako iloczyn uszkodzenia i prawdopodobieństwa, z którym się ono pojawia, czyli jako wartość oczekiwana negatywnych wyników jakiegoś działania lub sytuacji [145]. Wyróżnia się trzy kategorie ryzyka [105]:

- ryzyko psychologiczne,
- ryzyko techniczne,
- ryzyko ekonomiczne.

Ocena ilościowa interesującego nas najbardziej ryzyka technicznego odnieszona jest do wieku maszyny oraz wykonywanego zadania i jest oceną złożoną. W skrajnych przypadkach rozpatrywana jest ze względu na jedną określoną stratę lub ze względu na wszystkie (prognozowane jako skutki długości pracy maszyny). Poziom ryzyka może być społecznie akceptowany lub przeciwnie.

Ogólnie do projektowania przyjmuje się, że ryzyko techniczne utraty życia zawiera się w granicach od  $10^{-4}$  do  $10^{-6}$ , czyli jeden wypadek na 10 tys. do 1 miliona przypadków. W przypadkach bardzo wysokiego ryzyka osiąga poziom  $10^{-3}$ , który nie jest już społecznie akceptowany. Ryzyko w wysokości  $10^{-4}$  jest akceptowane, ale wywierane są silne presje na obniżenie tego poziomu. Presje te stopniowo maleją przy obniżaniu tego poziomu, aby przy  $10^{-6}$  uzyskać akceptację [17]. Należy jednak mieć na uwadze, że w miarę upływu czasu pracy maszyny zwiększa się poziom ryzyka ze względu na jej zużycie techniczne.

## 2.5. Zużywanie środka technicznego

Zużywanie części, elementów czy mechanizmów jest nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym pracy maszyn. Każda maszyna lub inny obiekt techniczny z biegiem czasu podlega temu procesowi, na skutek czego traci zdolność do pracy. Jest rzeczą oczywistą, że nie wszystkie części w maszynie ulegają jednakowo zużyciu. O trwałości maszyny decydują te części, które zużyciu jest najszybsze. Najszybciej zużyciu podlegają te części, które biorą czynny udział w pracy maszyny, jak na przykład: wały, łożyska, koła zębate, itp. Zadaniem konstruktora jest zatem takie ukształtowanie tych części i zastosowanie takich materiałów, aby zużycie było najmniejsze, a okres pracy najdłuższy.

Definitywnie, *zużywaniem* określa się proces zmian w warstwie wierzchniej części, węzła kinematycznego, zespołu czy całej maszyny, w których wyniku następuje utrata ich właściwości użytkowych. Efektem procesu zużycia jest zwykle ilościowa zmiana, którą można mierzyć objętościowo, liniowo lub wagowo [164]. Zużywanie pogarsza stan techniczny maszyn, a w krańcowym przypadku uniemożliwia jej prawidłową eksploatację.

Ogólnie procesy zużycia można sklasyfikować *ze względu na* [80]:

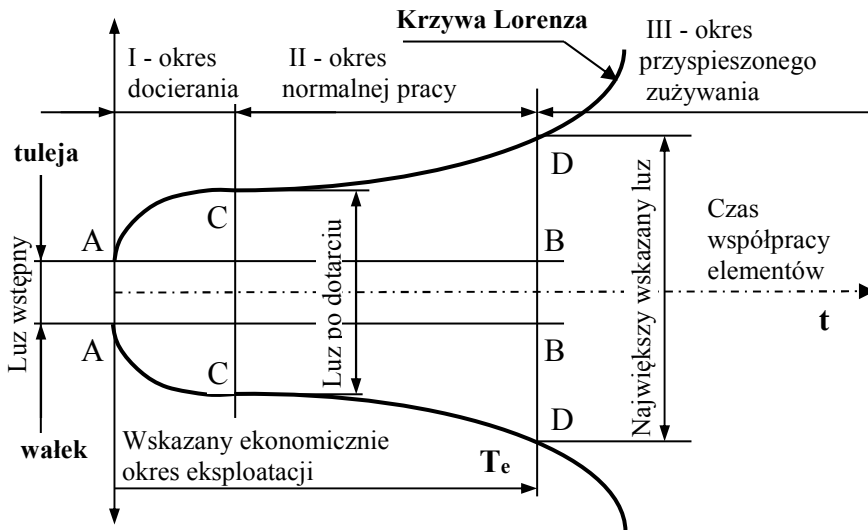
- *przyczyny* – tribologiczne i nietribologiczne,
- *przebieg* – ustabilizowane i niestabilizowane,
- *skutki* – normalne i awaryjne (patologiczne).

W wyniku zużycia następuje stopniowa utrata pierwotnej zdolności maszyny do wykonywania wyznaczonej jej pracy. Ze wzrostem zużycia postępuje zmniejszenie jej dokładności i użyteczności, a więc stopniowa degradacja stanu początkowego. Ogólnie rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje zużycia [11]:

- *zużywanie fizyczne*, które powstaje pod wpływem tarcia powierzchni zespołów przemieszczających się po sobie lub w wyniku korozji oraz innych przyczyn o charakterze fizycznym lub chemicznym. Ze względu na rodzaj oddziałującego czynnika zużywanie fizyczne części maszyn dzieli się na zużywanie mechaniczne, korozyjne i korozyjno-mechaniczne [74]. Objawia się ono nagłymi uszkodzeniami, pęknięciami lub złamaniami. Proces ten jest powolny (stopniowy), powoduje jednak zwiększenie się luzów w węzłach konstrukcyjnych (np. w łożyskach), nieszczelności w cylindrach, i związany z tym wzrost hałasu i drgań, zmniejszenie się dokładności maszyny i pogorszenie jej charakterystyki. Zużywanie fizyczne maszyn może również występować w czasie jej postoju, np. z powodu korozji źle zabezpieczonych elementów maszyny,

- *zużywanie ekonomiczne (tzw. moralne)* oznacza zmniejszenie się użytkowej wartości maszyny w stosunku do nowych, bardziej wydajnych maszyn. Zużywanie ekonomiczne powstaje więc w wyniku postępu technicznego, powodującego wprowadzanie do użytku nowych, doskonalszych i wydajniejszych maszyn.

Charakter zużywania mechanicznego elementu pary kinematycznej, np. wałek-tuleja, pracującej w warunkach tarcia suchego, opisuje tzw. *krzywa Lorentza*. Pokazuje ona nierównomierny charakter zmian powierzchniowych elementu w zależności od czasu. Zużywanie współpracującego elementu pary kinematycznej ma podobny charakter, tylko ze zmienionym znakiem (np. na wałku następuje zmniejszenie wymiaru poprzecznego, a na tulei zwiększenie). Stąd charakter zużycia takiej współpracującej pary elementów ma kształt krzywej dzwonnej, opisywanej najczęściej rozkładem normalnym – rys. 17 [98].



Rys. 17. Wykres zużywania mechanicznego współpracujących części maszyny [98]

W czasie eksploatacji maszyn i innych obiektów technicznych we wszystkich przypadkach trących się powierzchni wyodrębnia się trzy charakterystyczne fazy (okresy) zużywania [80]:

- okres docierania (niestacjonarny),
- okres zużywania umiarkowanego, zwykle o stałej intensywności,
- okres zużywania przyspieszonego (awaryjnego).

Faza I – *docieranie* jest wynikiem złożonych, współzależnych procesów fizykochemicznych, występujących w obszarach tarcia współpracujących ele-

mentów. Do najważniejszych zalicza się procesy mechanicznego oddziaływania warstw wierzchnich na siebie oraz fizykochemiczne oddziaływania środowiska, w którym realizuje się tarcie. Przez zmianę tego środowiska można więc zmienić intensywność docierania. W czasie docierania występuje dogładzanie i dopasowywanie się współpracujących powierzchni. Okres ten jest stosunkowo krótki, a zarazem bardzo ważny dla prawidłowego działania maszyny [75].

*Faza II* – w tym okresie obserwuje się stałą intensywność uszkodzeń, co oznacza że zużywanie jest prawie niezależne od czasu trwania procesu. Jest to tzw. zużywanie normalne. Na podstawie długości tego okresu określana jest trwałość części [80]. Przez cały okres normalnego zużywania obraz fizyczny zjawisk pozostaje prawie niezmienny (quasi statyczny).

*Faza III* – *okres zużywania przyspieszonego* jest obrazem jakościowych zmian fizykochemicznych, wpływających zdecydowanie na wzrost zużywania. Zaczyna się w chwili, gdy następuje zakłócenie normalnego zużywania w wyniku przekroczenia dopuszczalnego luzu dla danej pary trącej (rys. 17). Prowadzi to w krótkim czasie do utraty właściwości użytkowych trących się elementów. Na skutek tego występują dodatkowe obciążenia dynamiczne, wywołujące intensywniejsze odkształcenia elementów, następują zaburzenia w smarowaniu skojarzeń. Pojawiają się większe ubytki materiałów, rośnie chropowatość powierzchni. Wzrost zmian zmęczeniowych w warstwie wierzchniej prowadzi po pewnym czasie do zapoczątkowania procesu wypadania pierwszych cząstek materiału (pitting lub łuszczenie), co jest początkiem zużywania lawinowego, awaryjnego. Stąd też nie powinno się dopuszczać do przejścia maszyny w ten okres pracy.

Długość poszczególnych okresów zużywania oraz intensywność zużywania zależą od [74]:

- cech konstrukcyjnych skojarzonych części, kształtu ich powierzchni, obciążenia, rodzaju smarowania, rodzaju zastosowanych materiałów,
- cech technologicznych skojarzonych części; rodzaju ostatecznej obróbki, jakości obróbki cieplnej lub cieplno-chemicznej, chropowatości powierzchni, jakości montażu,
- cech eksploatacji; prawidłowego użytkowania, konserwacji i obsługi między naprawami.

Zużywaniu części maszyn powinno się przeciwdziałać zawsze, jest ono bowiem przyczyną zmniejszania trwałości elementów maszyn, a czasem ich awarii (zatarcie), dlatego stosuje się odpowiednie metody postępowania, prowadzące do wyeliminowania lub spowalniania zużywania, przykładowo: odpowiednie przygotowanie powierzchni roboczej, właściwe smarowanie, itp. [84].

## 2.6. Podsumowanie

Rozdział 2. obejmuje opis działań z maszyną jako środkiem technicznym. Omówiono zatem miejsce środków technicznych w realizacji potrzeb społecznych. Zagadnienie to rozpatrzono na podstawie cyklu racjonalnego działania, określanego jako „*Automat Dietrycha*”. Środek techniczny istnieje we wszystkich fazach tego procesu zaspokajania potrzeb, ale w „różny sposób”; bądź jako abstrakt, bądź jako twór materialny.

Dokonano klasyfikacji maszyn jako środków technicznych. Podano określenie na sprawność oraz omówiono dwa różne podejścia do jej zwiększania. Przeanalizowano zagadnienie czynników opisujących maszynę jako środek techniczny i podano klasyfikację maszyn ze względu na ich przeznaczenie. Wyszczególniono rodzaje wymagań, jakie się stawia maszynom, dzieląc je na cztery grupy: ekonomiczne, technologiczne, produkcyjne oraz eksploatacyjne. Podkreślono, że z punktu widzenia praktyki inżynierskiej wymagania te dzieli się na dwie podstawowe grupy: określające jakość użytkową, które stanowią funkcję celu działania, oraz ograniczenia. Podano rodzaje działań dostosowawczych (stosowanych przez producenta maszyn) w zakresie wymagań najistotniejszych, tj. związanych z ochroną zdrowia i bezpieczeństwem człowieka.

Wyróżniono różne poziomy znaczenia cech budowy maszyny dla użytkownika, zwracając uwagę na fakt, iż w naukach technicznych sprawy „bezpieczeństwa, zwykle odnosi się do życia i zdrowia człowieka, natomiast wszelkie sprawy „bezpieczeństwa” maszyny ujmowane są poprzez pojęcie niezawodności, stanowiącej jedną z najistotniejszych charakterystyk eksploatacyjnych maszyny. Definicja „przekładająca” bezpieczeństwo na potrzeby inżynierskie ustala poziom ryzyka, jako miarę tego bezpieczeństwa, i przyjmuje prawdopodobieństwo do jego oceny. Z punktu widzenia eksploatacji maszyn wyróżnia się też różne poziomy ryzyka technicznego przyjmowane jako społecznie akceptowalne.

Ryzyko uszkodzeń maszyny zwiększa się wraz z upływem czasu. Dokonano zatem klasyfikacji procesu zużycia ze względu na: przyczyny, przebieg i skutki. Podano i omówiono dwa podstawowe pojęcia w tym zakresie: zużycie fizyczne oraz zużywanie ekonomiczne. Zobrazowano tzw. „krzywą Lorenza”, stanowiącej podstawową charakterystykę zużywania fizycznego. Wskazano, że na krzywej tej wyodrębnia się trzy charakterystyczne okresy zużywania: niestacjonarny (docierania), stałej intensywności (zużywania umiarkowanego) oraz przyspieszonego zużywania, w którym występuje największa możliwość awarii maszyn.

### 3. SYSTEMOWE UJĘCIE EKSPLOATACJI

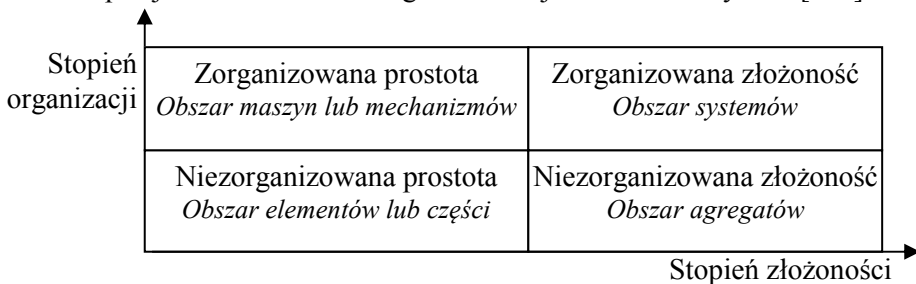
#### 3.1. Pojęcie systemu

Jedną z radykalnych zmian wprowadzanych przez nowoczesną naukę jest traktowanie rzeczywistości w sposób nieciągły, na kształt układającej się w rozmaite konfiguracje. Doszło do tego w wyniku działań z różnych stron naraz. Powstała logika matematyczna, a wraz z nią pojawiły się pojęcia „zbioru i „relacji”. Ponadto, gdy zaczęły powstawać coraz bardziej złożone urządzenia, zaczęto odczuwać potrzebę jakiegoś uogólnionego opisu, niezależnie od tego, czy jest to prosty mechanizm, czy wielka elektrownia. Wszystko to wywołało potrzebę posługiwania się ogólnym pojęciem czegoś, o czym wiadomo, że składa się z jakichś powiązanych elementów. Pojęciu temu nadano nazwę *system* [88].

Pojęcie system występuje we wszystkich naukach i technologiach. W literaturze spotyka się wiele definicji systemu – Sadowski wyliczył ich aż trzydzieści cztery [123]. Twórca teorii systemów L. von Bertalanffy zdefiniował *system* jako: „*zbiór elementów, pozostających we wzajemnym oddziaływaniu między sobą oraz otoczeniem*” [9]. Inne aspekty ujmuje definicja S. Pabisa [107]:

**„system to wyodrębniony z otoczenia zbiór obiektów materialnych lub abstrakcyjnych, które są połączone związkami tworzącymi strukturę”.**

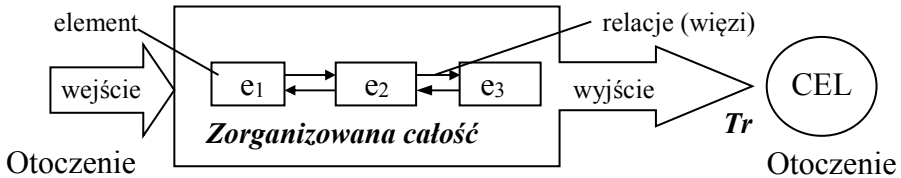
Ogólnie biorąc, systemy są to pewne konstrukcje myślowe, porządkujące i segregujące w określony sposób zjawiska rzeczywistości, nie wnoszące niczego nowego do rzeczywistości, lecz dające jej skoordynowany obraz (uporządkowany) w celu lepszego objęcia jej myślą i poznania. Powoływane są do życia w sposób naturalny bądź sztuczny, żyjąc lub pracując zadany odcinek czasu, a potem aktywność ich zamiera [19]. Rola systemu jest jednak szczególna, ponieważ opisuje on zachowanie zorganizowanej złożoności – rys. 18 [105].



Rys. 18. *Miejsce systemów w opisie różnych typów układów* [105]



Aby coś nazwać systemem, czyli zorganizowaną całością, muszą być wyróżnione co najmniej trzy elementy, współdziałające dla osiągnięcia określonego skutku, zwanego celem, przy czym cel jest to stan zasługujący na to, aby być osiągnięty. Oddziaływanie otoczenia na rozpatrywany system określa się jako wejście, a oddziaływanie systemu na otoczenie jako wyjście – rys. 19 [135].



Rys. 19. *Cybernetyczny model systemu* [135]

Systemy wykazują pewną własność, którą wyraża zasada Nernsta: *Całość to coś więcej, niż suma części, czyli: części wewnątrz systemu mają inne własności niż wtedy, gdy są odseparowane* [26]. Dzieje się tak dlatego, że własności całości (cechy systemowe) są określone przez [149]:

- własności elementów (części),
- relacje (powiązania systemowe).

Różne systemy można więc otrzymać przez różny sposób powiązania nawet identycznych zestawów części. Części powiązane ze sobą determinują cechy systemu, ale system ma też zwrotny wpływ na zmienność cech części, np. ich zużywanie. Stąd kolejna zasada systemowa, że *„struktura systemu decyduje o jego zachowaniu się”* [9].

Biorąc pod uwagę stopień organizacji można powiedzieć, że [19]:

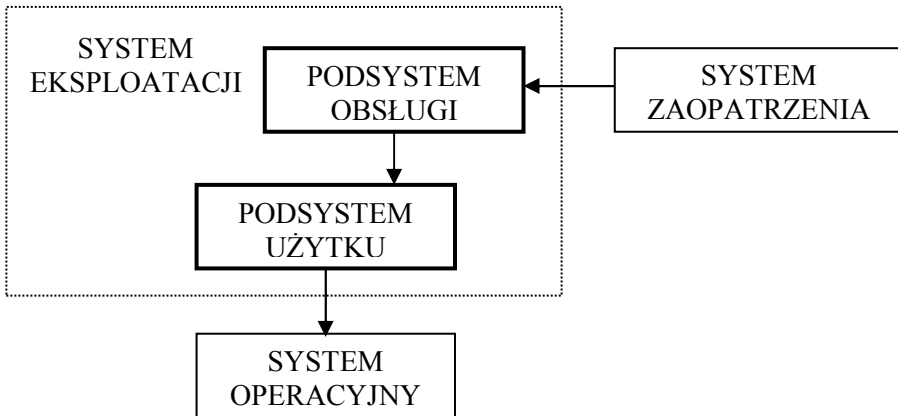
- zbiór elementów + struktura = układ,
- zbiór układów + koordynacja wewnętrzna = maszyna,
- zbiór maszyn + zadanie = system.

Zatem z punktu widzenia inżynierii *„system eksploatacji jest zbiorem wszystkich elementarnych układów eksploatacji danej maszyny, uporządkowanych relacją współużyteczności lub współzależności”* [62]. Do elementarnych układów dowolnej maszyny zalicza się [162]:

- układ użytkowania – podsystem użytku (SU),
- układ obsługowy – podsystem obsługi (SO).

Gdy system składa się z takich elementów, które same są zbiorami, każdy z tych zbiorów określa się jako *podsystem*. Ponadto, systemy mogą być elementami innego, wyższej rangi systemu, który wtedy określa się jako *nadsystem*.

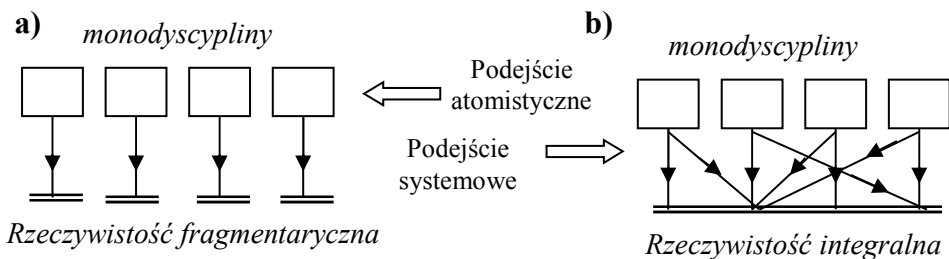
O tym, co traktować jako system i jakie w nim rozróżniać podsystemy, rozstrzyga ten, komu to jest potrzebne do rozwiązania określonego problemu. Podział systemu eksploatacji na podsystemy dokonywany jest przede wszystkim według stanów eksploatacyjnych i według funkcji działania – rys. 20 [62].



Rys. 20. *System eksploatacji i jego otoczenie* [62]

W świetle systemów skomplikowana rzeczywistość staje się uproszczona. Naukowcom z dawnych czasów także rzeczywistość przedstawiała się prosto. Tyle że dawniej było to wynikiem ubóstwa nauki, obecnie zaś wynika to z jej rozwoju i przyjęcia określonego (systemowego) opisu [88].

Eksploatacja, jako nauka bazująca na systemach, tę prostotę zawdzięcza abstrahowaniu od właściwości tworzywa. W eksploatacji stawia się pytania: „*jak to działa?*”, a nie „*z czego to jest zrobione?*”. W gruncie rzeczy właśnie różnice tworzyw powodowały wyodrębnianie się różnych monodyscyplin i tym samym rozkładanie pewnej całości na fragmenty – rys. 21 [88]. W rzeczywistości zaś całość stanowi jedno i do takiej analizy należy stosować podejście systemowe.



Rys. 21. *Schemat struktury nauki: a) tradycyjnej, b) nowoczesnej* [88]

## 3.2. Podejście systemowe

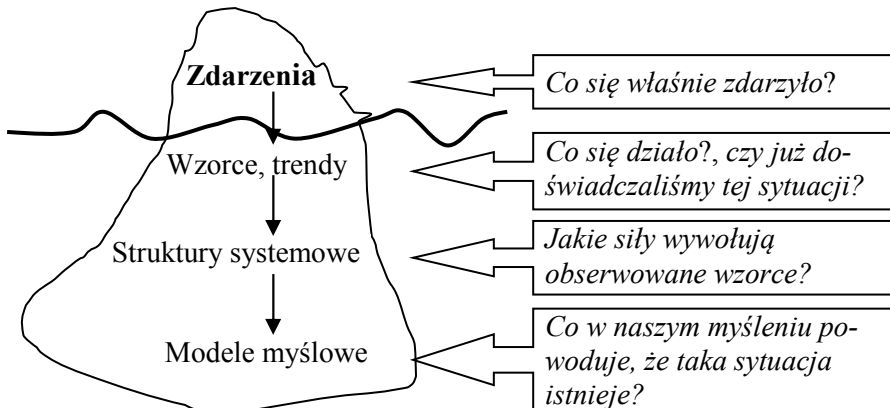
W ujęciu systemowym na plan pierwszy wysuwają się prawa i pojęcia ogólne, bowiem poszukuje się takich podobieństw (homologii), które są uniwersalne i dają się przenosić z jednej dziedziny wiedzy w drugą. Tego typu działanie wymaga nowej postawy myślowej, zwanej „myśleniem systemowym” [153].

**Myśleć systemowo**, to „uwzględniać kontekst (po co to?), zakładając przy tym, że jest on zmienny, złożony i uporządkowany (czyli systemowy), i tak naprawdę to nie wiadomo, gdzie się zaczyna i gdzie się kończy” [94]. Myślenie systemowe ukazuje nową perspektywę w badaniach: przyrody, człowieka oraz tworzeniu techniki i rzeczywistości społecznej [19].

G. Ossimitz definiuje je następująco [104]:

- myślenie modelami i zdolność do ich budowania,
- myślenie w kategoriach sprzężeń zwrotnych,
- myślenie dynamiczne,
- umiejętność sterowania systemami.

Postępowanie wykorzystujące ten rodzaj myślenia określane jest jako systemowy punkt widzenia albo *podejście systemowe*. Podejście to oznacza „zespolone patrzenie na całość systemu poprzez analizę roli i funkcji poszczególnych części w całości, z uwzględnieniem powiązań przyczynowo-skutkowych, często niejawnych i nieliniowych, z uwzględnieniem dalekosiężnych skutków decyzji tylko częściowo poznanych poprzez symulację” [19]. Dobrym obrazem myślenia systemowego jest metafora „góry lodowej” – rys. 22 [82].



Rys. 22. *Góra lodowa jako metafora podejścia systemowego* [82]

Pozostając w kręgu zdarzeń, jesteśmy na jej powierzchni. To właśnie na tym wierzchołku odbywa się większość dyskusji dotyczących określonego zdarzenia, np. awarii samochodu. Poszerzając perspektywę w czasie i przestrzeni, schodzimy pod powierzchnię i zaczynamy analizować trendy i wzorce. Jeszcze niżej dochodzimy do struktur systemowych, które determinują zachowanie systemu. Analiza tych struktur jest możliwa dzięki diagramom systemowym. Diagramy takie nazywane są „mapami modeli myślowych” [153].

*Modele myślowe* to nasze głęboko zakorzenione przekonania oraz sposoby postrzegania i myślenia. Są dla nas tak „oczywiste”, że często nie uświadamiamy sobie ich istnienia. Zwyczajowo myślimy np.: „*Jedna przyczyna wywołuje jeden skutek. Technologia rozwiąże każdy pojawiający się problem. Włożony wysiłek decyduje o wynikach. Jednostki nic nie mogą zrobić*”. To tylko kilka typowych modeli myślowych. Analiza modeli myślowych to najistotniejszy poziom myślenia systemowego. Jest to często bardzo trudne, ponieważ istnieje wiele mechanizmów obronnych, które utrudniają zmianę ukrytych założeń. Ale to z modeli myślowych wpływa struktura systemu [82].

Podejście systemowe w najszerszym znaczeniu może oznaczać więc podejście badawcze przeciwstawne paradygmatowi newtonowskiemu, który zalecał postrzegać badane obiekty jako zbiory autonomicznych części [58]. Paradygmat systemowy charakteryzuje natomiast integracja [19]:

- od części – do całości, z uwzględnieniem roli części w całości,
- od struktury systemu – do procesów w nim zachodzących.

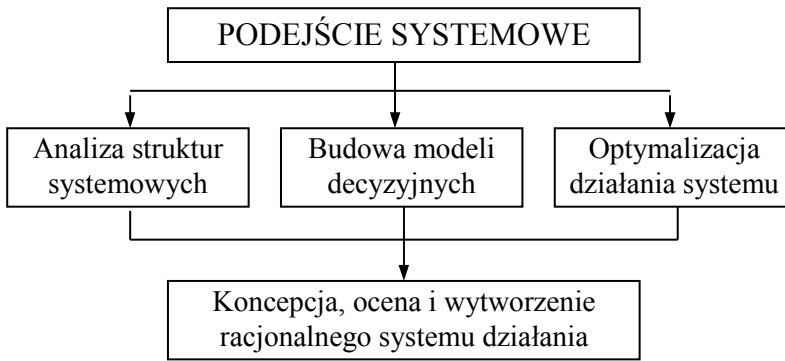
*Podejście systemowe* należy traktować jako zasadę porządkowania. Może być też rozumiane jako sposób postępowania, w których zjawiska są traktowane kompleksowo. Przewodnią myślą tego podejścia jest racjonalność i optymalne osiągnięcie celów [153]. Myśląc systemowo należy zawsze nawiązywać do właściwości systemu jako całości, do jego struktury oraz do jego funkcji i ewolucji [115]. Podstawą do systemowego ujęcia zagadnienia jest określenie elementów (części) wchodzących w skład systemu, relacji wiążących te elementy, obiektów należących do otoczenia oraz relacji wiążących system i otoczenie. Sposób określenia obiektów i relacji zależy przede wszystkim od zadań stawianych systemom i metod pozwalających je zrealizować [88].

Użyteczność metody systemowej polega przede wszystkim na jej przydatności do rozwiązywania problemów. Do tego konieczne jest jednak spełnianie pewnych rygorów (założeń) metodycznych. Przedstawiono je poniżej [115]:

- właściwości systemu wynikają z jego całości,
- każda rzecz może być połączona ze wszystkimi innymi,
- każde działanie powoduje jakiś efekt zwrotny (ang. *feedback*),

- struktura systemu determinuje rezultaty działań,
- rezultaty nie są proporcjonalne do wkładanego wysiłku,
- system funkcjonuje tak sprawnie, jak jego najsłabszy element,
- skutki problemu są często odległe w przestrzeni i w czasie.
- część systemu, która jest najbardziej elastyczna, ma największy wpływ na cały system.

Założenia te przedstawiają sedno istoty myślenia i podejścia systemowego. Zastosowania takiego podejścia można przedstawić w trzech nurtach, których ideą jest dostarczenie praktycznych metod dochodzenia do optymalnych rozwiązań w projektowaniu, wytwarzaniu i użytkowaniu maszyn w całym cyklu ich życia, z uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych i ekologicznych. Kierunki te pokazano na rys. 23 [77].



Rys. 23. *Kierunki rozważań podejścia systemowego* [77]

Podstawą funkcjonowania systemu jest jego struktura, stąd też jej analiza należy do głównych kierunków badań w podejściu systemowym.

Mówiąc o strukturze systemu należy odróżniać:

- *strukturę wewnętrzną* – tworzącą organizację lub architekturę systemu, na którą składają się elementy i relacje wiążące te elementy,
- *strukturę zewnętrzną* – tworzoną przez powiązania zachodzące między system a środowiskiem, opisywane przez jego wejście i wyjście; mogą tu występować relacje: energetyczne, informacyjne, lub czasowe.

Drugim kierunkiem analiz jest budowa modeli decyzyjnych, pozwalających na wyznaczenie optymalnej decyzji oraz, jeśli decyzja nie była optymalna, znalezieniu przyczyn pomyłki. Kolejny kierunek dotyczy, w szczególności, procedur optymalizacji systemu, a wszystko to ma na celu wytworzenie układu działania o najkorzystniejszych właściwościach eksploatacyjnych [77].

### 3.3. Modelowanie systemowe

Podano wcześniej, że podejście systemowe jest określonym aparatem metodologicznym. U jego podstaw leży modelowanie. Stąd też *teorię systemów* ujmujemy się jako teorię modelowania, która pomaga różnorodne obszary rzeczywistości opisać w tym samym języku i przez to odnosić wzajemnie do siebie. Jej znaczenie polega na tym, że oferuje jednolity język formalny do uporządkowanego opisu różnorodnych obszarów doświadczalnych. Przez to staje się ona dobrym narzędziem do syntezy badań interdyscyplinarnych. Centralne myśli przewodnie tej teorii mają korzenie w filozofii, traktowanej jako ponaddiscyplinarne rozumienie świata [153].

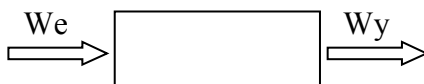
Jeden z podstawowych postulatów podejścia systemowego nakazuje, by badany obiekt (ujmowany jako system) z jednej strony rozpatrywać w relacji do jego zmieniającego się otoczenia (wejście-wyjście), z drugiej strony – by poszukiwać sprzężeń (relacji funkcjonalnych) między jego elementami (analiza struktury). Relacje strukturalne, wiążące elementy w systemie, mogą być określane w różny sposób: jako proste parametry (np. czasy obróbki dla procesu produkcyjnego), lub równania matematyczne opisujące działanie systemu. Relacje te mogą być zdeterminowane lub probabilistyczne [120].

Jeżeli rezygnuje się ze ścisłego modelu matematycznego, wykorzystując tylko opisy korelacyjno-graficzne, to takie modelowanie określa się jako „miękkie” [21]. Dotyczy ono problemów słabo ustrukturalizowanych, złożonych, związanych z niepewnością i niepełnością informacji.

Tego typu problemy występują zwłaszcza tam, gdzie w systemie jest człowiek. Działania człowieka, ze względu na jego złożoność, nie da się bowiem opisać ścisłymi zależnościami matematycznymi.

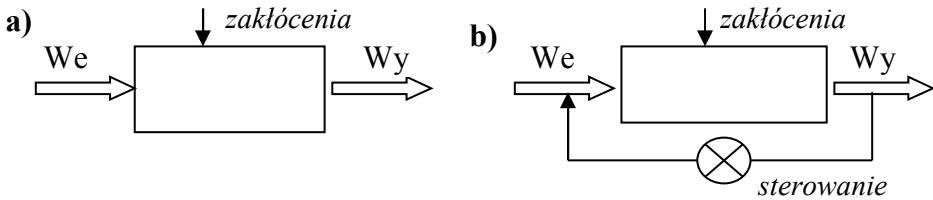
Systemy eksploatacji są systemami z udziałem człowieka (antropotechniczne), stąd do ich opisu właściwe jest miękkie podejście systemowe. Przy tego typu modelowaniu odwzorowuje się strukturę systemu za pomocą sieci powiązań przyczynowo-skutkowych (relacji). Najważniejszymi elementami w tym odwzorowaniu są linie ze strzałkami.

Elementarny model systemowy opisuje tzw. „czarna skrzynka” – rys. 24 [88].



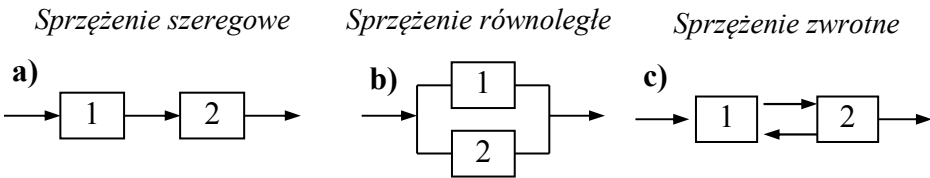
Rys. 24. *Elementarny model systemowy tzw. „czarnej skrzynki”* [88]

Model ten może być dalej coraz bardziej rozbudowywany np. – rys. 25.



Rys. 25. Model systemowy „czarnej skrzynki”:  
a) z zakłóceniami, b) z zakłóceniami i sterowaniem

Modelowanie obok alternatyw należy do podstawowych narzędzi analizy systemowej. Model systemowy to narzędzie zobrazowania badanego obiektu, które posiada wejścia, wyjścia i relacje. Istotną formą relacji systemowej jest *sprzężenie*. O sprzężeniu mówi się wtedy, gdy wyjście jednego podsystemu staje się wejściem innego podsystemu. Można je sprecyzować, gdy część systemu potraktuje się jako podsystem z własnymi wejściami i wyjściami. Sprzężenia – jako relacje – to podstawowy składnik struktury modelu systemowego. Do głównych typów sprzężenia zalicza się połączenie szeregowe, równoległe i zwrotne – rys. 26.



Rys. 26. Typy sprzężenia elementów w systemie

Struktura zatem to konfiguracja przestrzenna elementów. Należy zwrócić tu uwagę, że rozpatrując strukturę obiektu nie bierze się pod uwagę wszystkich relacji, jakie występują między jego elementami, ale tylko te, które są istotne ze względu na określony cel (rozpatruje się określony układ). Podstawowe prawo z teorii systemów określa, że *struktura systemu decyduje o jego zachowaniu się*.

Struktura systemu rzeczowego (jakim jest maszyna) składa się przede wszystkim ze sprzężeń materiałowych, energetycznych i informacyjnych. Wobec powyższego rozpatrując system można wyróżnić w nim dwie grupy struktur [141]:

- *porządkujące* (np. przynależności, przestrzenna, połączeniowa),
- *organizujące* (np.: funkcjonalna, informacyjna, hierarchiczna).

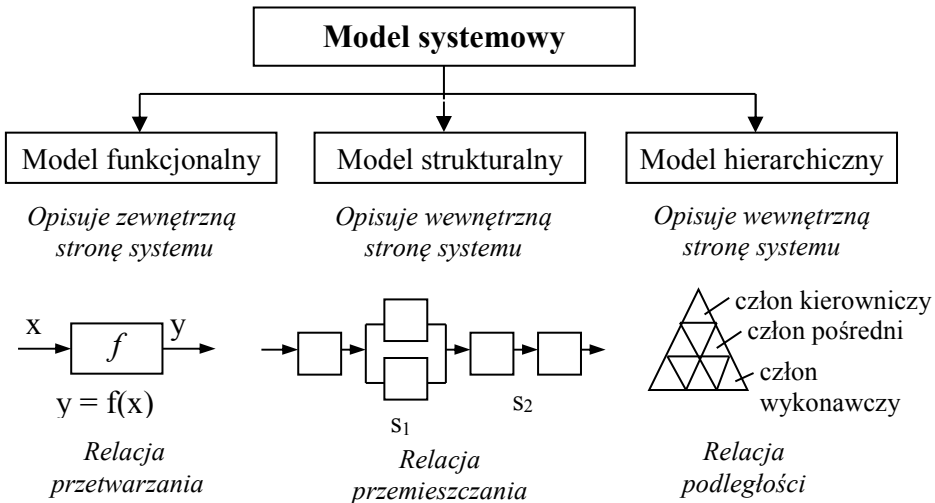
Z dotychczasowych rozważań wynika, że *system jest modelem całości*, która:

- wykazuje zależności między atrybutami (wejścia, wyjścia, stany itd.),
- składa się ze wzajemnie powiązanych części lub podsystemów,
- odgraniczona jest przez swoje otoczenie lub przez nadsystem.

Model systemowy jednoczy zatem trzy koncepcje systemowe [104]:

- *funkcjonalną* – system przedstawia się jako „czarną skrzynkę” i charakteryzuje się przez określone współzależności między swymi właściwościami, które należy obserwować z zewnątrz. Koncepcja abstrahuje wyraźnie od materialnej konkretyzacji oraz wewnętrznej budowy systemu i ogranicza się do zachowania całości w jej otoczeniu,
- *strukturalną* (model „przezroczystej skrzynki”) – polega ona na tym, że system analizowany jest jako układ wzajemnie powiązanych elementów o znanych cechach (właściwościach). Koncepcja ta zajmuje się właściwościami elementów oraz ich sprzężeniem, na ile dobrze dają się one zintegrować w jeden zadaniowy organizm (układ powiązań).
- *hierarchiczną* (model „piramidy”) – koncepcja podkreśla, że w każdym systemie jest członek nadrzędny – kierowniczy (nadsystem) oraz członki podrzędne – wykonawcze, które mogą być traktowane jako podsystemy.

Graficzny obraz tych koncepcji, które uwzględniane są w modelu systemowym, przedstawia rys. 27.



Rys. 27. Rodzaje i istota modeli systemowych



### 3.4. Model systemowy układów eksploatacji

Patrząc na rys. 27, który pokazuje złożoność opisu systemowego, można się zgodzić z metaforyczną sentencją Geralda M. Weinberga: „*System to punkt widzenia – zrozumiały dla poety, natomiast przerażający dla pracownika nauki*” [126]. Ta złożoność od pracownika nauki wymaga bowiem uwzględniania w swoich analizach wszystkich aspektów (zewnętrznych i wewnętrznych), dotyczących jakiegoś wycinka rzeczywistości. To w praktyce jest nierealne.

Stąd też badając coś złożonego, np. samochód osobowy (który złożony jest z ponad 20 tys. elementów), można traktować go w ujęciu cybernetycznym jako „czarną skrzynkę”, koncentrując uwagę na zależnościach funkcjonalnych między wejściami (bodźcami) i wyjściami (reakcjami). Można także analizować strukturę jego układów, czyli sprzężenia między częściami – tak postępuje się w symulacyjnych badaniach niezawodności. Można też koncentrować uwagę na rozwoju systemu (projektowanie), albo na zjawisku koordynacji w przestrzeni i czasie zachowań elementów w celu uzyskania efektu synergetycznego – co jest domeną logistyki.

Układy eksploatacyjne warto zatem poznawać i doskonalić nie tylko na drodze doświadczenia praktycznego, ale również korzystając z symulacji jako operacji na modelach. Modele opisują to, co jest w rzeczywistości, ale nie jest to cała rzeczywistość, lecz tylko ten aspekt, który jest ważny dla twórcy lub użytkownika modelu. Dlatego modele charakteryzują się trzema cechami [58]:

- odwzorowaniem,
- skrótem,
- pragmatycznością.

Model pokrywa tylko kawałek rzeczywistości i uwzględnia obserwatora i jego stosunek do rzeczywistości (model zawsze tworzy jakiś obserwator, wyrażając przez to określone intencje). Sama ogólna teoria systemów oferuje tylko formalne „*klocki*” (gramatykę opisu) do budowania modelu [89].

Układ to podstawowe pojęcie cybernetyki, myślowo wyodrębniony fragment rzeczywistości, rozważany jako transformator otrzymywanych bodźców na uzyskane reakcje. Wśród nich wyróżnimy, jako jedne z ważniejszych, układy techniczne, a wśród tych układy eksploatacyjne [137].

*Układy techniczne* to sztuczne obiekty skonstruowane przez człowieka. Traktując ogólnie obiekt techniczny jako proste indywiduum, będziemy mówili o *elemencie*, natomiast rozpatrując obiekt ze względu na jego złożoność z uporządkowanych elementów, będziemy mówili o nim jako o *układzie*.

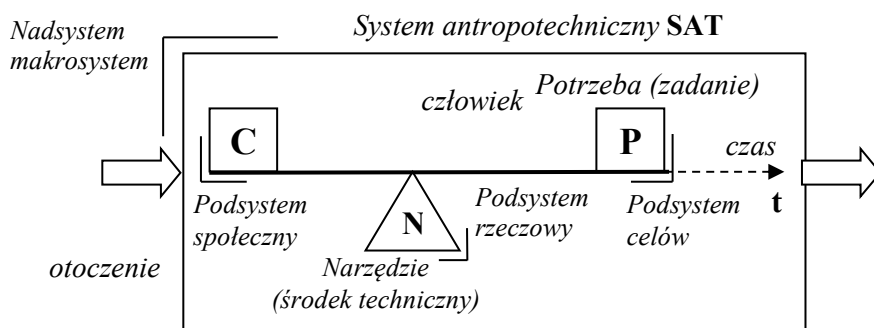
Ogólnie układy techniczne dzieli się na dwie jakościowo odrębne grupy:

- *układy informacyjne* – związane z przesyłem i przetwarzaniem informacji (obrazów, dźwięków),
- *układy transportowe (energetyczne)* – związane z przetwarzaniem i przesyłem masy i energii.

W eksploatacji „układ” może mieć dwojakie znaczenie:

- zespół współpracujących elementów, tworzących łącznie urządzenie techniczne (maszynę), które spełniają określone zadania, określane jest ogólnie jako *obiekt techniczny (OT)*.
- zbiór elementów zależnych od siebie funkcjonalnie, lecz nie tworzących jednolitej całości – *system antropotechniczny (SAT)*.

W naszych rozważaniach będziemy się koncentrować na tym ostatnim, tj. na systemie SAT. Podejście to opiera się na rozumieniu współzależności człowieka i maszyny jako relacji pomiędzy podmiotem a narzędziem (środowiskiem) pracy. Każdy obiekt techniczny kierowany przez człowieka stanowi wraz z nim układ działania i każdy układ działania, stosowany przez człowieka, może być traktowany jako system antropotechniczny (SAT). Graficznie pokazano to na rys. 28.



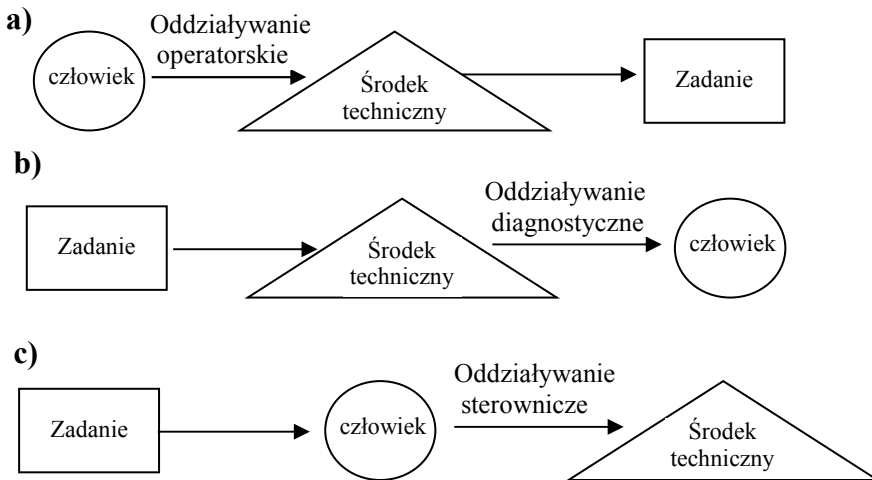
Rys. 28. *Elementarny model antropotechnicznego systemu działania (SAT)*

W tym podejściu na plan pierwszy wysuwa się działanie człowieka jako członka kierującego [103]. Jego rola w systemie jest decydująca, a jednocześnie jest on najsłabszym elementem systemu.

Twórca teorii systemów, L. von Bertalanffy, metaforycznie słabość tę określił, że „człowiek jest miękkim podbrzuszem systemu i jego najłatwiej trafić” [9]. Z punktu widzenia inżynierii eksploatacji nie można zatem pomijać człowieka, koncentrując się tylko na obiekcie technicznym (OT). Stąd jeden z istotnych

paradygmatów inżynierii eksploatacji „wiedza i umiejętności człowieka, jako operatora maszyny, są równie ważne jak jej cechy konstrukcyjne”. Poprzez swoją wiedzę integruje on bowiem dwa aspekty: „wiedzieć, aby przewidzieć, przewidzieć, aby działać” [105]. Z punktu widzenia inżynierii eksploatacji nie można zatem pomijać człowieka, koncentrując się tylko na obiekcie technicznym.

Człowiek tworzy podsystem sterowania, a maszyna (środek techniczny) tworzy podsystem wykonawczy. System działania zawiera w sobie czas  $t$  – jest więc on funkcjonalnie dynamiczny. Zachowanie (SAT) jest więc uwarunkowane czasem oraz zasadami nadsystemu. Ponadto, człowiek w systemie (SAT) może wykonywać różne funkcje: być operatorem (kierownikiem systemu), badaczem (diagnostą) lub pełnić rolę członu wykonawczego (przełożnika sygnałów sterowniczych) – rys. 29.



Rys. 29. *Przykłady funkcji wykonywanych przez człowieka w systemie (SAT): a) decydent, b) badacz, c) przełożnik*

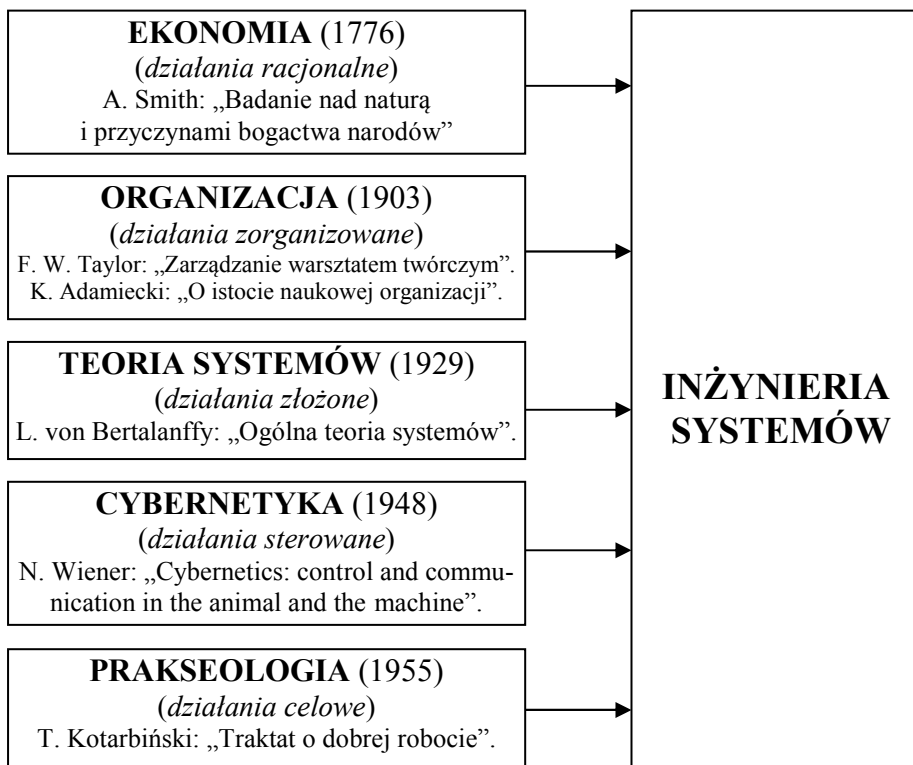
Każde z tych oddziaływań wymaga innej wiedzy i umiejętności człowieka. Stąd też należy przyjąć kolejny paradygmat, że: „poznawalność i prognozowalność układów SAT jest tylko probabilistyczna, a ich usprawnianie zależy od w pierwszym rzędzie od doskonalenia człowieka”.

Podaje się, iż 70-90% wypadków i awarii w funkcjonowaniu środków technicznych spowodowane jest przez szeroko rozumiane błędy człowieka, uwarunkowane czynnikami psychofizycznymi. Należy zatem zwrócić szczególną uwagę na te czynniki oraz sposób przetwarzania przez niego informacji i podejmowania decyzji, zwłaszcza w obiektach podwyższonego ryzyka [145].

### 3.5. Inżynieria systemów

Powszechnie utrwalil się pogląd, według którego słowo „inżynieria” utożsamia się z maszynami (stąd – inżynier mechanik), budowlami (inżynier budownictwa), itd. Nie jest to jednak słuszne, bowiem: „*inżynieria nie kryje się w maszynach czy urządzeniach, ale w głowach ludzi*” [30]. Współczesna definicja określa inżynierię jako: „*szeroko pojmowaną teorię lub praktykę poznania oraz celowego zmieniania i sterowania jakimkolwiek procesem lub systemem*” [32]. W tym ostatnim aspekcie szczególnego znaczenia nabiera inżynieria systemów.

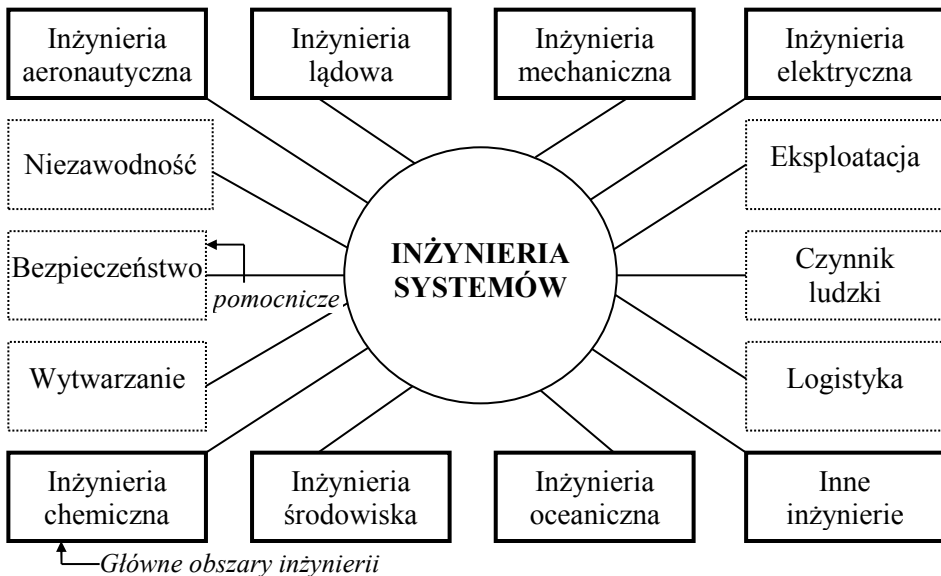
Nazwą inżynierii systemów, rozumianej jako technologia pracy na zbiorach, obejmuje się praktyczne programy działania, oparte na logice i rachunku prawdopodobieństwa [2]. Wykorzystuje w tym celu sformalizowane narzędzia matematyczne. Istotny jest również jej związek z naukami o działaniu, ponieważ system w istocie rzeczy dotyczy głównie układów działania – rys. 30 [19].



Rys. 30. Związek inżynierii systemów z naukami o działaniu [19]

Bezpośrednim zadaniem inżynierii systemów jest optymalizacja wyjścia z systemu, stosownie do zadanych kryteriów, na podstawie charakterystyki dynamicznej i analizy kosztów [19]. W tym zadaniu inżynieria systemów wiąże się z szeregiem nowoczesnych, wyspecjalizowanych już dyscyplin jak: identyfikacja, modelowanie, symulacja, automatyka, probabilistyka i statystyka, ekonomia, optymalizacja, jakość i niezawodność.

Inżynieria jest jednak bardziej działalnością niż teorią. Inżynieria (od łac. *ingenium* – *wynalazczość*) związana jest bowiem z określonym rodzajem myślenia, nastawionego na usprawnianie. Wynikiem inżynierskiego myślenia jest więc nowy wyrób, względnie jakiś proces działania doskonalszy od poprzedniego [132]. Wiedza systemowa, wsparta procedurami optymalizacji, stanowi istotny czynnik takiego myślenia nastawionego na usprawnianie. Stąd też oprócz tych ogólnych powiązań z naukami o działaniu (por. rys. 30), inżynieria systemów przejawia się w wielu dyscyplinach inżynierskich – rys. 31 [19].



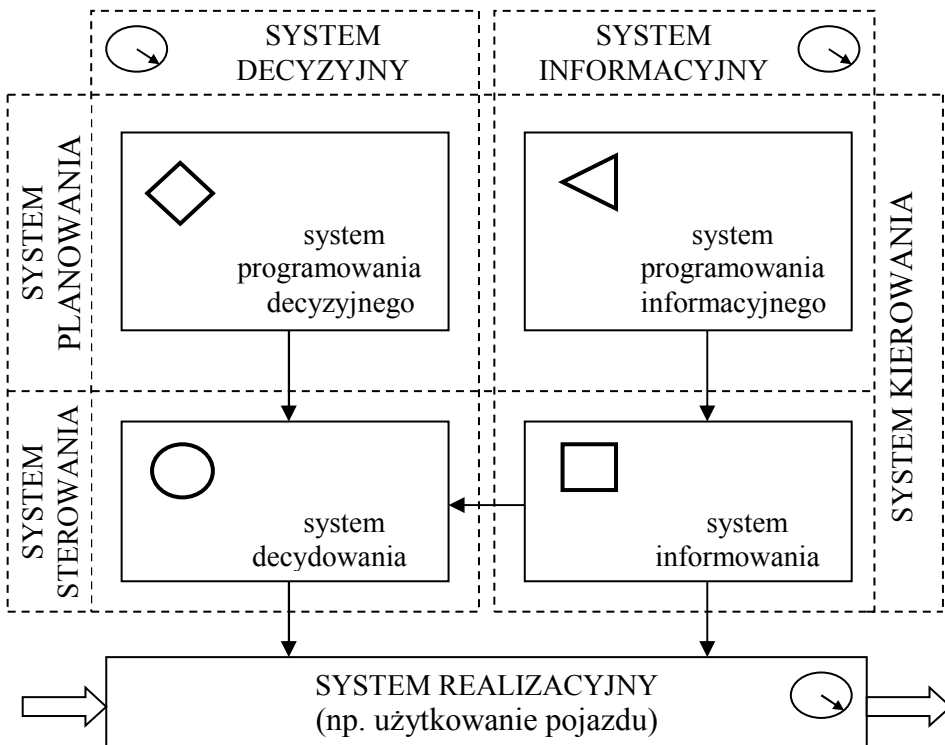
Rys. 31. *Główne i pomocnicze obszary inżynierii systemów* [19]

Podstawowym zadaniem inżynierii systemów w eksploatacji jest badanie i współdziałanie w projektowaniu dowolnego rodzaju złożonych maszyn i urządzeń technicznych za pomocą symulacji komputerowej, wykorzystując modele strukturalne. Istotę tego podejścia opisują następujące pytania [141]:

1. Jakie funkcje spełnia obiekt techniczny i jakie odpowiadają im standardy osiągnięć (np. wydajności, kosztu eksploatacji, bezpieczeństwa, itp.)?

2. Jak obiekt może zawieść w spełnianiu funkcji?
3. Co może być przyczyną każdego z uszkodzeń funkcjonalnych?
4. Jakie mogą być skutki każdego z tych uszkodzeń?
5. Jakie znaczenie ma każde z tych uszkodzeń?
6. Co można zrobić, aby zapobiec każdemu z tych uszkodzeń?
7. Co powinno być zrobione, gdy nie można znaleźć odpowiedniego działania zapobiegawczego?

Oprócz tych pytań problemowych w procesie modelowania systemu eksploatacji należy także uwzględnić aspekt jego dynamiki. W tym celu do modelu należy wprowadzić przynajmniej trzy *zegary*: zegar decyzyjny, zegar informacyjny oraz zegar roboczy. Pod pojęciem tym rozumie się „zbiór wyróżnionych chwil”. Gdy zbiór ten jest przeliczalny, mówi się, że zegar jest dyskretny. Gdy zaś zbiór ten jest nieprzeliczalny, przyjmuje się, że zegar eksploatacyjny jest ciągły. Czas eksploatacji jest kwantowany przynajmniej z dwóch punktów widzenia: czynności kierowniczych i czynności realizowania eksploatacji – rys. 32 [62].



Rys. 32. *Makrostruktura systemu opisu eksploatacji z uwzględnieniem dynamiki w postaci „zegarów” jako wyróżnianych chwil czasowych [62]*

### 3.6. Podsumowanie

Rozdział 3. dotyczy zagadnień eksploatacji ujmowanych z systemowego punktu widzenia. Podano zatem pojęcie systemu, podkreślając, iż jego istotą jest strukturalne uporządkowanie elementów. Obszar systemów dotyczy zatem „zorganizowanej złożoności”, czyli w istocie – wszystkich maszyn. Z ujęcia systemowego wynika, że właściwości systemu określane są zarówno przez własności części, z których są zbudowane, jak i sposoby powiązania tych części ze sobą.

Podejście systemowe oznacza całościowe patrzeć na maszynę uwzględniając jej przeznaczenie, elementy konstrukcji oraz ich powiązanie ze sobą. Ideą ujęcia systemowego jest dążność do wytworzenia konstrukcji, o najlepszym efekcie działania. Uzyskuje się to poprzez: analizę struktur systemowych, budowę modeli decyzyjnych oraz optymalizację działania maszyny.

Ważnym zagadnieniem w tym podejściu staje się umiejętność modelowania systemowego. Omówiono zatem elementarny model systemowy tzw. „czarnej skrzynki” oraz elementarne połączenia (sprzężenia) elementów ze sobą. Podkreślono, że model systemowy jednoczy ze sobą trzy ujęcia budowy maszyny: funkcjonalną, strukturalną oraz hierarchiczną oraz podano, jakie relacje i zachowania opisuje dany model.

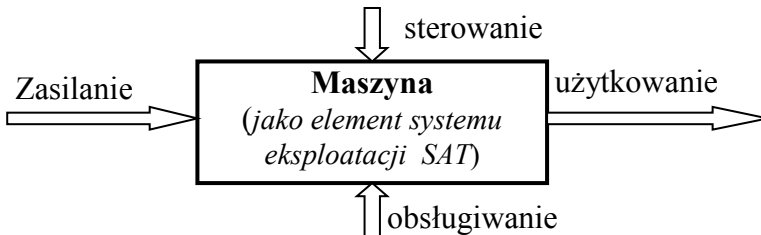
Szczególne uwagę zwrócono na model systemowy układów działania. W tym względzie zdefiniowano pojęcie układu, a następnie omówiono pojęcie systemu antropotechnicznego, wskazując na istotną rolę człowieka w systemie działania. Wychodząc z tej przesłanki, podano stwierdzenie, iż w inżynierii eksploatacji nieodzowne jest ulepszanie nie tylko samej maszyny, ale także człowieka, będącego jej operatorem.

Przeanalizowano pojęcie „inżynierii systemów”, którym to pojęciem określa się praktyczne programy działania dotyczące pracy na zbiorach, oparte na logice i rachunku prawdopodobieństwa. Inżynieria systemów wykorzystuje dorobek takich podstawowych nauk o działaniu, jak: ekonomia (działania racjonalne), teoria organizacji (działania zorganizowane), teoria systemów (działania złożone), cybernetyka (działania sterowane) oraz prakseologia (działania celowe). Istotą maszyn jest ruch, stąd też procesie modelowania systemu eksploatacji do modelu należy wprowadzić przynajmniej trzy zegary modelowania czasu: zegar decyzyjny, zegar informacyjny oraz zegar roboczy. Wskazano, że czas eksploatacji jest kwantowany przynajmniej z dwóch punktów widzenia: czynności kierowania eksploatacją i czynności realizowania eksploatacji.

## 4. UTRZYMANIE RUCHU MASZYN

### 4.1. Problemy utrzymania ruchu

Maszyna lub inne urządzenie, zastosowane do wykonania określonych zadań, wymaga różnych działań człowieka. Ogólnie działania te można poklasyfikować na cztery główne grupy – rys. 33.



Rys. 33. *Grupy działań wymagających decyzji eksploatacyjnych człowieka*

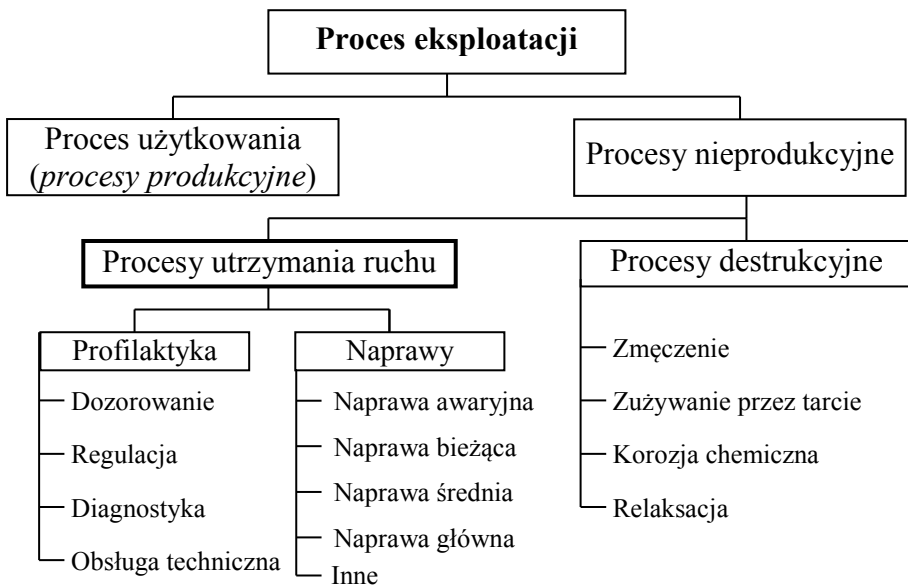
Każde z tych działań wymaga określonych decyzji człowieka, wykorzystującego tę maszynę, np.: użytkownik samochodu musi zasilić pojazd w paliwo, wymienić przepaloną żarówkę, uruchomić silnik, wyładować przywieziony towar itd. Każda z tych czynności może stwarzać też mniejszy lub większy problem – jak to zrobić? [142]. Jeden samochód – kilka lub kilkanaście problemów. Kilkanaście samochodów – kilkadziesiąt lub kilkaset różnych problemów. Dlatego też w organizacjach (przedsiębiorstwach) użytkujących grupę różnych maszyn zwykle powołuje się wyspecjalizowane jednostki, tzw. Służby Utrzymania Ruchu (UR), nazywane też działami Głównego Mechanika, które zajmują się rozwiązywaniem większości z tych problemów. Eksploatację maszyn należy traktować więc nie tylko jako trzecią fazę przemysłowego procesu realizacji, ale również jako wieloaspektowy proces utrzymania ruchu [41].

Utrzymanie ruchu nie tworzy bezpośrednio „wartości dodanej”, ale stanowi środek bez którego nie jest możliwe prowadzenie działalności produkcyjnej. Wszyscy wiemy, że nawet najnowsza maszyna czy linia technologiczna może się uszkodzić zaraz po jej „uroczystym przekazaniu do użytkowania”. Stąd też Służby Utrzymania Ruchu, bez względu na reprezentowaną branżę, są niezbędne w każdym przedsiębiorstwie. Odpowiadają bezpośrednio za utrzymanie ciągłości produkcyjnej, redukcję poziomu awaryjności, bezpieczeństwo obsługi maszyn i urządzeń oraz właściwy kierunek inwestycji, ze wskazaniem na wdrażanie nowoczesnych technologii [98].



Jednym z głównych problemów służb UR jest to, że z jednej strony powinny być one jak najbardziej niezauważalne (koszty oraz czas przeglądów i napraw), a z drugiej strony działać skutecznie w najbardziej odpowiednim momencie [141].

W warunkach ostrej konkurencji, gdy wymagane jest osiąganie coraz wyższej wydajności, stosowane urządzenia techniczne są coraz bardziej złożone i wymagają właściwego nadzoru. Rolą służb utrzymania ruchu jest utrzymanie maszyn i urządzeń w należytej sprawności. Dokonuje się tego przez wykonywanie zaplanowanych, jednorazowych lub okresowych, zadań w celu zapobiegania degradacji stanu technicznego maszyn i występowaniu awarii lub, gdy do nich dojdzie, usuwaniu ich przez naprawy – rys. 34 [41].



Rys. 34. *Profilaktyka i naprawy w procesie utrzymania ruchu maszyn i urządzeń* [41]

Nie każde przedsiębiorstwo posiada dobrze rozbudowane działy utrzymania ruchu. Większość firm zwykle ogranicza się do zatrudnienia mechaników potrzebnych do przezbrajania i utrzymania maszyn, rzadziej elektryka a jeszcze rzadziej automatyka [141]. Ma to swoje uzasadnienie ekonomiczne, ale traci się przez to wiedzę o stanie maszyn, co staje się ważnym zagadnieniem przy dozowaniu maszyn lub wystąpieniu awarii. Kiedy już nastąpi awaria, priorytetową sprawą staje się jej usunięcie. Okazuje się wtedy, że dokumentacja jest niekompletna, brak właściwych części wymiennych, itp. Wszystko to stwarza określone problemy informacyjne i decyzyjne.

Jednym z podstawowych problemów utrzymania ruchu jest zagadnienie: „*naprawiać czy wymieniać*”? (zespół lub część, która uległa awarii). Aby wybrać najlepszą opcję, należy przy podejmowaniu decyzji znać możliwości naprawy i kierować się logiką. Potrzebna jest oczywiście znajomość takich czynników, jak: możliwości naprawcze danego zakładu, czas naprawy, koszty, możliwości zakupu części, ale także ile to będzie kosztować?

W przypadku braku zamienników i wysokiej ceny oryginalnych części, można pokusić się o ich regenerację. Jeżeli decydujemy się na naprawy, należy zwrócić jednak uwagę na sposób i jakość wykonanej naprawy. Na podkreślenie zasługuje tu fakt, że zużycie części nie jest tym samym, co jej uszkodzenie. Ma to znaczenie szczególnie, kiedy mówimy o regeneracji części. Nie każda część maszyny może zostać zregenerowana. Wiele uszkodzeń próbuje się naprawiać, nie zawsze z dobrym skutkiem jakościowym. Wymiana części jest zatem korzystniejszą metodą, służącą zagwarantowaniu bezusterkowego działania sprzętu. W ostateczności zwykle decyduje rachunek ekonomiczny.

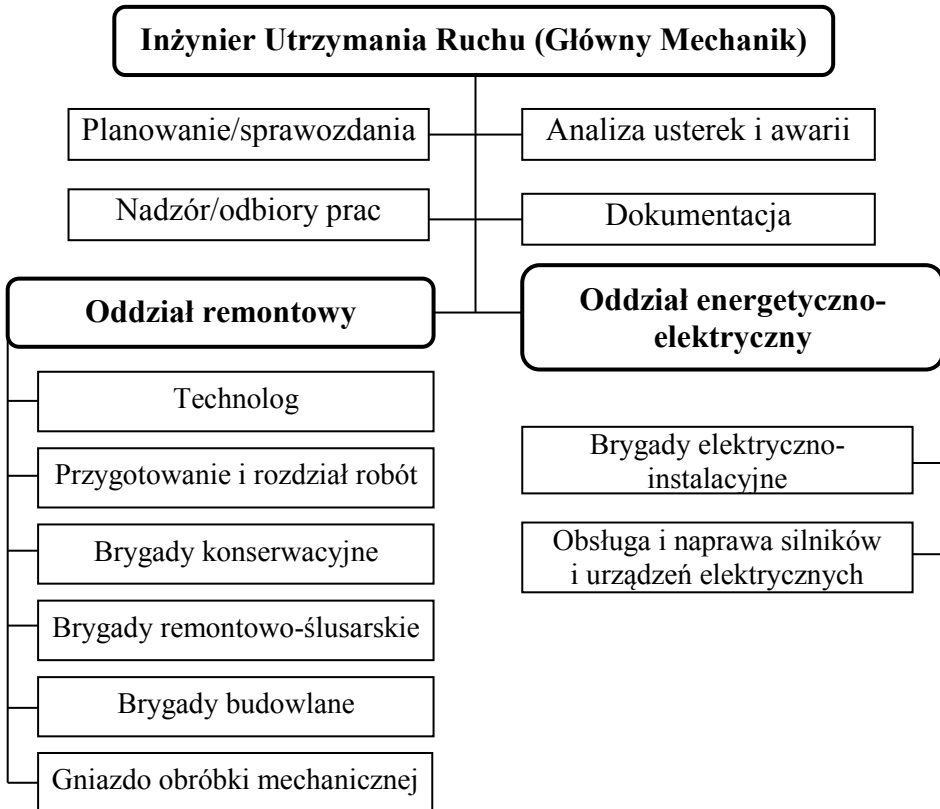
Oczywiście, nie da się regenerować i wymieniać wszystkiego. Niektóre części, np. klocki hamulcowe czy świece zapłonowe w samochodzie, tracą swoje właściwości użytkowe i muszą być wymieniane na nowe. Są to bowiem obiekty jednorazowego użytku. Inne, nawet po koniecznej wymianie, nadal mają znaczną wartość techniczną i ekonomiczną. W przypadku tej grupy produktów stosuje się naprawę (najlepiej w wyspecjalizowanych centrach technicznych), dzięki czemu naprawione podzespoły odzyskują w pełni swoje pierwotne właściwości i mogą być powtórnie zamontowane w maszynie. Do tej grupy zaliczamy wszelkiego rodzaju pompy, przekładnie itp. Aby móc poddać jakąś część (lub podzespół) procesowi regeneracji, musi ona nadawać się do naprawy, to znaczy musi być zużyta, a nie rozbita, czy np. skorodowana.

Najkorzystniej jest, kiedy uszkodzone podzespoły naprawiane są u producenta z wykorzystaniem oryginalnych elementów, urządzeń produkcyjnych i wyposażenia testowego. Każdy podzespół rozmontowuje się na poszczególne elementy i kwalifikuje, które z nich są niezniszczone. Z reguły obudowa podzespołu pozostaje ta sama, a wymieniane są elementy eksploatacyjne podlegające naturalnemu zużyciu, np. szczotki rozrusznika pojazdu.

Ogólnie rzecz biorąc zatem problemy utrzymania ruchu to w istocie problemy decyzyjne i z tej pozycji winny być przede wszystkim rozpatrywane. W większości przedsiębiorstw stosuje się model eksploatacyjny rozdzielenia zadań związanych z użytkowaniem maszyny i jej obsługą (naprawami). Stąd też rozdzielone są decyzje użytkowe od decyzji diagnostycznych. Taki układ jednak mimo swoich zalet (większa specjalizacja) jest także potencjalnym źródłem sytuacji konfliktowych – problem „dwóch kierowników” [55].

## 4.2. Zadania działu utrzymania ruchu

Do zapewnienia pełnej zdolności produkcyjnej przedsiębiorstwa niezbędny jest dobrze zorganizowany i sprawnie zarządzany dział eksploatacji, nazywany działem utrzymania ruchu. Od niego zależy wydajność, jakość, koszt produkcji, bezpieczeństwo pracy i wpływ na środowisko. Przykładowy schemat organizacyjny działu utrzymania ruchu przedstawiono na rys. 35 [75].



Rys. 35. *Schemat organizacyjny działu utrzymania ruchu dużego przedsiębiorstwa* [75]

Z powyższego schematu wynika, że struktura organizacyjno-decyzyjna działu utrzymania ruchu winna umożliwić realizację dwóch grup zadań:

- *technicznych* – utrzymanie maszyn i urządzeń w gotowości oraz sprawności,
- *dokumentacyjnych* – planowanie i gromadzenie informacji o stanie maszyn.

Sposób utrzymania ruchu określonych urządzeń i maszyn zależy od ich charakterystyki konstrukcyjnej i roli, jaką spełniają w procesie produkcyjnym. Urządzenia skomplikowane, kosztowne i pracujące w zautomatyzowanych liniach technologicznych powinny być utrzymywane bardzo starannie. Ich awaria powoduje, bowiem przestój całej linii. Rodzaj obsługi technicznej należy więc dostosować do konkretnych urządzeń oraz warunków ich eksploatacji [76]. Ogólną klasyfikację zadań w tym zakresie przedstawiono na rys. 36 [75].



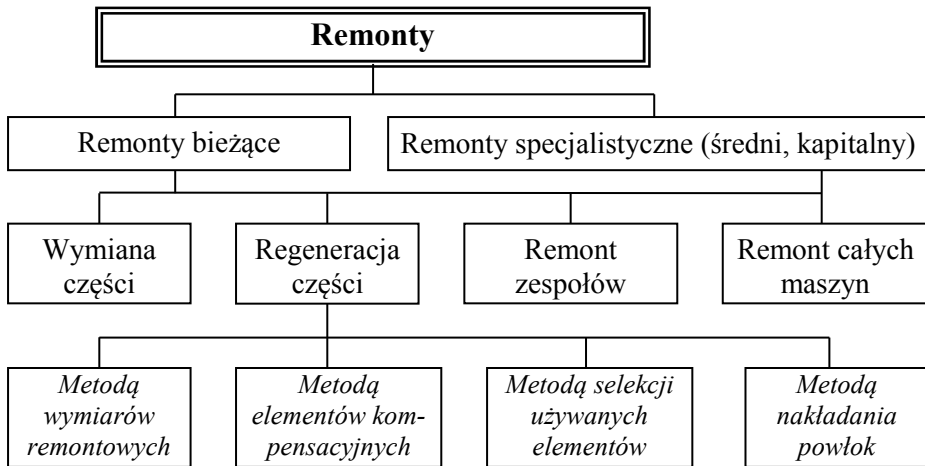
Rys. 36. *Zadania utrzymania ruchu związane z obsługą techniczną* [75]

Zgodnie z zasadą, że „*łatwiej coś utrzymać w należytym stanie, niż doprowadzić do takiego stanu*” kierownik działu utrzymania ruchu, którym najczęściej jest inżynier mechanik, winien mieć wiedzę i umiejętności, aby prowadzić działalność prewencyjną, związaną z zapobieganiem awariom podległego mu sprzętu technicznego. Ponadto, winien znać ogólne zasady dotyczące napraw i remontów maszyn. W zakresie tych pojęć występuje pewna niejednoznaczność, która wymaga komentarza.

W niektórych opracowaniach określenie *remont* jest całkowicie wyeliminowane i zastąpione – *naprawą*, w innych preferowany jest wyraz *remont*, traktując *naprawę* jako określenie pomocnicze. Opierając się na aktach normatywnych podaje się [16], że należy stosować pojęcie:

- *remont* – gdy jest mowa o całym obiekcie (maszynie),
- *naprawa* – gdy jest mowa o elementach składowych tego obiektu.

Należy się zgodzić z takim uporządkowaniem pojęć. W wyniku przyjęcia takiej terminologii, typowym zwrotem będzie: „w remontach maszyny  $x$  należy wykonać naprawę następujących zespołów..”. Remont zatem ma na celu doprowadzenie maszyny czy urządzenia do stanu gotowości technicznej przez wykrycie wszystkich niedomagań i uszkodzeń, a następnie wymianę części lub ich regenerację. Regeneracja części ma przywrócić natomiast jej pierwotne cechy. Stosuje się do tego różne metody – rys. 37.



Rys. 37. *Zadania utrzymania ruchu związane z remontami*

Zadania dotyczące remontów i napraw mieszczą się w ogólnych celach planowanego utrzymania ruchu, jakimi są [150]:

- zapewnienie utrzymania zasobów na założonym poziomie,
- zapewnienie efektywnej pracy zespołu UR poprzez odpowiednie prognozowanie i planowanie prac do wykonania,
- redukcja lub eliminacja większych napraw i kosztownych wymian urządzeń poprzez wczesne wykrywanie zmian i prace zapobiegawcze,

Aby te cele osiągnąć, wymagane jest:

- zrozumienie roli utrzymania ruchu w przedsiębiorstwie,
- rejestr wszystkich prac remontowo-zapobiegawczych,
- elektroniczny system generowania odpowiednich raportów,
- standaryzacja procedur związanych z utrzymaniem ruchu,
- przyjęcie właściwej strategii utrzymania ruchu maszyn i urządzeń.

### 4.3. Strategie utrzymania ruchu

W wielu przedsiębiorstwach produkcyjnych (i nie tylko) w odniesieniu do maszyn i innych złożonych urządzeń utrwalił się tradycyjny podział obowiązków wynikający ze stereotypu „*ja produkuję – ty naprawiasz*”. Stereotyp ten określa podejście, że „*wszelkie czynności związane z obsługą i remontami maszynami, nawet najprostsze, należą do obowiązków działu utrzymania ruchu*” [15].

Działy utrzymania ruchu wpasowując się w tę konwencję, wypracowały różne strategie postępowania. *Strategia* – w znaczeniu ogólnym oznacza naczelną orientację (gospodarczą, społeczną, militarną, itp.), która wyraża dominujący kierunek działania danego systemu. Ta naczelną orientacja jest główną linią i zarazem wytyczną postępowania kierownictwa systemu w związku z sytuacjami, jakie zachodzą w otoczeniu i przy uwzględnieniu własnego potencjału kadrowego, organizacyjnego, finansowego i techniczno-produkcyjnego [154].

Wychodząc z powyższego, *strategią utrzymania ruchu* można nazwać ciąg decyzji określających program postępowania związanego z zapobieganiem awariom maszyn oraz ich usuwaniem. U podstaw przyjęcia określonego programu leżą cztery problemy decyzyjne [91]:

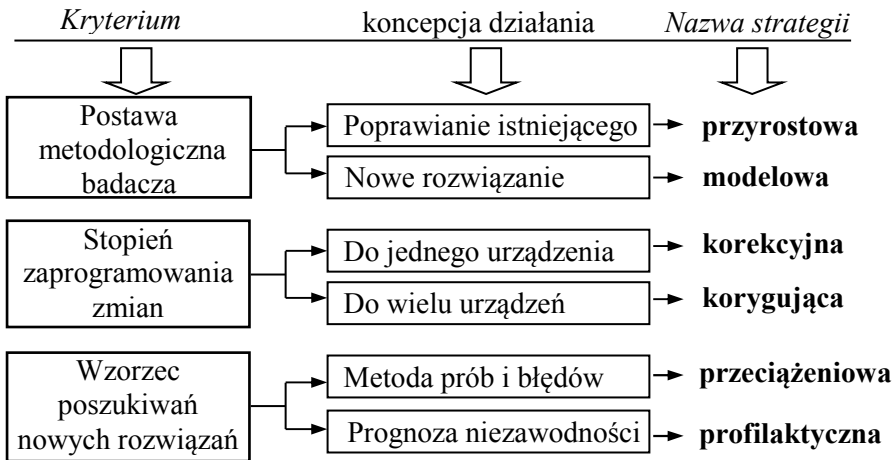
- zapobiegać czy łagodzić skutki występowania awarii?
- jak rozpoznać wcześniej symptomy możliwej awarii?
- jak rozpoznać ukryte uszkodzenia prowadzące w efekcie do awarii?
- jak postępować, kiedy brak możliwości działań zapobiegawczych?

Problemy te określają kategorie zadań nakładanych na działy utrzymania ruchu:

1. *Zadania z priorytetem czasu* – ukierunkowane bezpośrednio na zapobieganie lub opóźnienie wystąpienia awarii. Są to wszelkiego rodzaju przeglądy po określonym przebiegu czasowym maszyny lub ilości wykonanej pracy. Kluczowym kryterium jest okresowy charakter tego zadania.
2. *Zadania z priorytetem stanu* – ukierunkowane przede wszystkim na wykrycie początkowych symptomów możliwych awarii. Można dokonać tego poprzez pomiary określonych parametrów pracy urządzeń w czasie i ich porównywanie z wartościami ustalonymi wcześniej jako awaryjne.
3. *Zadania z priorytetem znalezienia uszkodzenia* – ukierunkowane na rozpoznanie powstałych uszkodzeń, zabezpieczając tym samym urządzenie przed dalszym zniszczeniem. Działalność ta zmierza głównie do wykrycia tzw. awarii ukrytych, które są zjawiskiem wysoce niepożądanym. Przykładem mogą być tu okresowe badania kontrolne pojazdów.

4. *Zadania z priorytetem pracy urządzeń* – świadoma decyzja o uruchomieniu i pracy urządzeń, aż do momentu wystąpienia awarii; uwarunkowana zwykle fizyczną niemożnością zastosowania innych działań lub brakiem środków finansowych na ten cel.

Biorąc pod uwagę różne kryteria, można ustalić określone koncepcje realizacji tych zadań i odpowiadające im strategie utrzymania ruchu – rys. 38.



Rys. 38. *Kryteria wpływające na rodzaj strategii utrzymania ruchu maszyn*

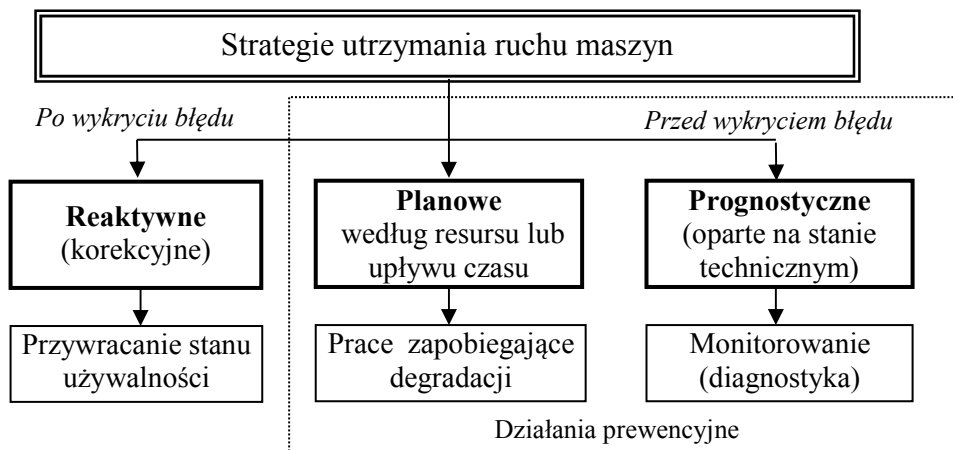
Przedstawione strategie są zróżnicowane, ponieważ dzisiejsze przedsiębiorstwa są zróżnicowane ze względu na poziom rozwoju i praktykę zarządzania. Nawet w jednym przedsiębiorstwie można dostrzec różne strategie dotyczące utrzymania ruchu maszyn i innych obiektów [106].

Wybór racjonalnej strategii utrzymania ruchu zależy oczywiście od przestrzegania zasad gospodarności. Jak pisze bowiem A. Góralczyk „w zarządzaniu dyspozycyjnością maszyn najważniejsze jest biznesowe myślenie, a nie analiza technicznych możliwości jej zapewniania” [43]. Elementami rachunku techniczno-ekonomicznego są tu: zmienne nakłady (materiałowe i pieniężne) na diagnozowanie, wymuszone i planowe zabiegi obsługowo-naprawcze oraz koszty utraconych szans (ze względu na niewykonanie pracy użytkowej).

Ten trzeci aspekt we współczesnych przedsiębiorstwach może nabierać coraz to bardziej istotnego znaczenia, zwłaszcza w przypadku automatycznych linii produkcyjnych lub samochodów (w przypadku przedsiębiorstw transportowych). Nie należy też tracić z uwagi faktu, że wszelkie wyliczenia pieniężne są wtórnym efektem zabiegów i działań o charakterze technicznym, czyli przyjętej w praktyce strategii utrzymania ruchu.

Przed przystąpieniem do wyboru i wdrażania strategii najbardziej stosownej dla określonego przedsiębiorstwa, trzeba być więc świadomym, która z nich jest najwłaściwsza ze względu na różnorodne uwarunkowania wewnętrzne i zewnętrzne tego przedsiębiorstwa. Przykładowo: inna strategia będzie najlepsza dla przedsiębiorstwa o produkcji ciągłej, a inna dla przedsiębiorstwa o produkcji seryjnej lub jednostkowej [92].

W praktyce występują dwa rodzaje strategii utrzymania ruchu – rys. 39.



Rys. 39. *Typowe strategie utrzymania ruchu*

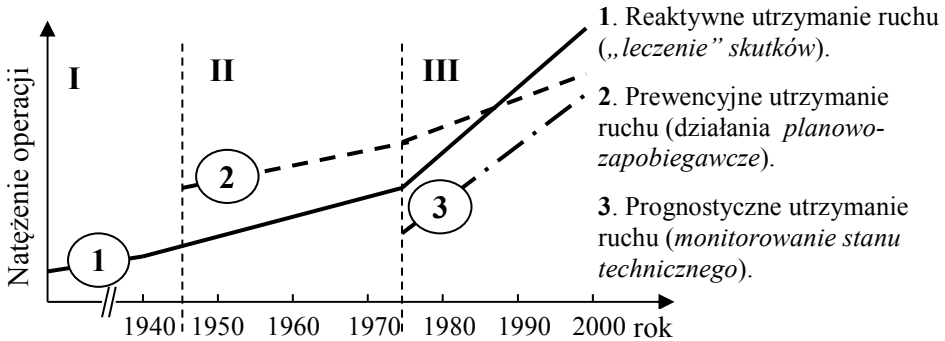
- **strategie reaktywne** – utrzymanie ruchu wg tej strategii zakłada możliwość wystąpienia usterki, lecz nie są podejmowane żadne specjalne działania, mogące kontrolować i przeciwdziałać jej wystąpieniu. Przykładem może być żarówka, którą się użytkuje, aż do momentu uszkodzenia a następnie wymienia się na nową,
- **strategie prewencyjne** (profilaktyczne) – oparte na zapobieganiu awariom i uszkodzeniom maszyn. U podstaw tych strategii leży założenie dotyczące cyklu życia urządzenia i możliwego ryzyka uszkodzenia. Profilaktyka obsługowa może przybierać przy tym trzy różne formy:
  - *okresowa* (planowa – według upływu określonego czasu),
  - *resursowa* (planowa – według wykonania określonej pracy),
  - *diagnostyczna* (uwarunkowana rzeczywistym stanem maszyny).

W strategii utrzymania ruchu opartej na diagnostyce, dzięki zastosowaniu odpowiednich technik, można osiągnąć to, co w przypadku planowego utrzymania ruchu leży w zakresie domysłów. Bada się rzeczywisty stan elementu maszyny i dopiero po tym fakcie podejmuje decyzje związane z ewentualną jego wymianą, np. wymiana opon samochodowych po określonym zużyciu bieżnika.



## 4.4. Trendy utrzymania ruchu

Według S. Legutko [76], analiza strategii utrzymania ruchu, dokonywana w perspektywie czasowej (historycznej), pozwala na wyróżnienie trzech okresów ich powstawania i rozwoju – rys. 40.



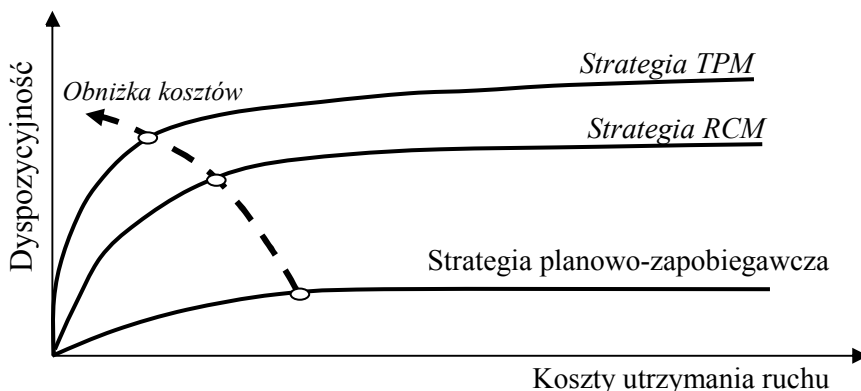
Rys. 40. Trzy okresy rozwoju i odpowiadające im trzy koncepcje (trendy 1, 2, 3) utrzymania ruchu maszyn i urządzeń [76]

- *Okres pierwszy* (I) – od zarania stosowania urządzeń i maszyn do mniej więcej początku drugiej wojny światowej – charakteryzował się doraźnym reagowaniem na wystąpienie uszkodzeń. Dominowało więc *reaktywne podejście do utrzymania ruchu*. W tym czasie, z uwagi na stosunkowo niski poziom mechanizacji, wystąpienie awarii nie miało dużego wpływu na ciągłość produkcji. Urządzenia i maszyny były proste w konstrukcji i łatwe w utrzymaniu, dlatego nie było potrzeby wykonywania działań zapobiegawczych z wyjątkiem czyszczenia i smarowania. Ważniejsze czynności obsługowe, takie jak: remont maszyn, naprawa zespołów czy regeneracja części, wykonywane były jako reakcja na pojawianie się uszkodzeń. Przedsiębiorstwa zorientowane były przede wszystkim na produkt i produkcję, uznając utrzymanie ruchu jako działalność pomocniczą,
- *Okres drugi* (II) – od lat pięćdziesiątych wiele typów maszyn było już sterowanych numerycznie, a ich konstrukcja stawała się coraz bardziej złożona. Wpływ znaczenia niesprawnego urządzenia na utrzymanie ciągłości produkcji znacznie wzrósł. Istotne były wówczas pytania, czy można przeciwdziałać wystąpieniu uszkodzenia i w jaki sposób powinno się to czynić. Pojawiła się *koncepcja systemu planowo-zapobiegawczych remontów*, którego istotą jest podejmowanie czynności obsługowych w ustalonych odstępach czasu lub po wykonaniu okre-

ślonej ilości pracy (strategia według resursu). Charakterystycznymi cechami tego przełomu w myśleniu na temat utrzymania ruchu w tamtym czasie było: powstanie koncepcji zapobiegania uszkodzeniom (prewencyjne utrzymanie ruchu), spowodowane zwiększeniem zależności procesów wytwarzania od stanu urządzeń i maszyn oraz zmiana poglądów na intensywność uszkodzeń – wzrost znaczenia systemów planowania i sterowania utrzymaniem ruchu.

- *Okres trzeci (III)* – połowa lat siedemdziesiątych XX wieku to początek kolejnego okresu rozwoju metod utrzymania ruchu. Kluczowym elementem stało zapewnienie bezuszkodzeniowej pracy maszyn w całym okresie ich użytkowania. Strategia prewencyjnego utrzymania ruchu nie sprawdza się bowiem w przypadkach występowania znaczącej liczby uszkodzeń we wczesnej fazie życia maszyny. Pojawiły się więc nowe koncepcje, m.in. takie jak:
  - *RCM (Reliability Centered Maintenance)* – utrzymanie ruchu skierowane na niezawodność (strategia wg niezawodności),
  - *TPM (Total Productive Maintenance)* – całościowe utrzymanie ruchu zorientowane na produktywność (lub ściślej – utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją [76]).

Taki trend rozwojowy utrzymania ruchu maszyn i innych urządzeń technicznych wynika z dążenia do zwiększenia dyspozycyjności maszyny przy jednoczesnym zmniejszaniu (a przynajmniej chęci działań w tym kierunku) ponoszonych kosztów. Z praktyki inżynierskiej znany jest fakt, że osiągnięcie zadanego celu (dyspozycyjność maszyny) jest na ogół możliwe poprzez stosowanie bardziej zaawansowanych strategii. Obrazuje to rys. 41 [84].



Rys. 41. *Konkurencyjność strategii utrzymania ruchu maszyn* [84]

Linia przerywaną pokazano cel nadrzędny, przyświecający zarządom przedsiębiorstw: uzyskać jak największą dyspozycyjność środków technicznych przy minimum nakładów ponoszonych na ich utrzymanie w ruchu. Najkorzystniej jest zatem stosować utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją (*TPM*). Według tej strategii sprawne utrzymanie ruchu wymaga jednak zwiększonego udziału operatorów maszyn i pracowników linii produkcyjnych w dozorowaniu maszyn oraz przekazania im odpowiedzialności i uprawnień, dotyczących działań prewencyjnych. Podobne wymagania występują w przypadku wdrażania strategii skierowanej na niezawodność maszyn (*RCM*) [76].

Jeśli spełnienie tych wymagań nie jest możliwe, należy dążyć do utrzymania ruchu opartego na monitorowaniu stanu technicznego. Gdy to jest niewykonalne, z przyczyn technicznych lub finansowych, należy wdrożyć utrzymanie planowo-zapobiegawcze. W takiej sytuacji mamy do czynienia z zadaniami z kategorii priorytetu czasowego. Stosowanie *strategii planowo-zapobiegawczej* jest właściwe głównie w przypadkach [92]:

- rutynowych inspekcji,
- podstawowej opieki nad maszynami (czyszczenie, smarowanie, regulacja, itp.),
- kalibracji instrumentów (narzędzi pomiarowych),
- użycia jako narzędzia do analizy, planowania i harmonogramowania prac utrzymania, przestrzegania wymagań dyrektyw uregulowanych prawem,
- gdy dane statystyczne wskazują, że urządzenie ulega uszkodzeniom w sposób powtarzalny, który można powiązać ze stopniem zużycia.

W innych sytuacjach stosowanie tej strategii nie jest właściwe ponieważ [98]:

- intensywność zużywania elementów maszyn nie jest stała w czasie użytkowania,
- charakterystyki niezawodnościowe producentów maszyn nie uwzględniają specyficznych warunków eksploatacji, które mogą wystąpić u konkretnego użytkownika,
- czas poprawnej pracy maszyn między uszkodzeniami ulega skróceniu w miarę upływu czasu eksploatacji,
- zakres obsługi i napraw wzrasta wraz z czasem eksploatacji.

Przy braku możliwości utrzymania zapobiegawczego, pozostaje utrzymanie reaktywne, czyli od uszkodzenia do uszkodzenia. Strategia „od awarii do awarii” stosowana jest zwykle dla uszkodzeń o małych skutkach ekonomicznych i bez następstw zagrożenia bezpieczeństwa sprzętu [111]. Z rys. 40 można zaobserwować jednak, że w ostatnich czasach następuje renesans tego typu strategii. Wpływa na to coraz to doskonalsza konstrukcja maszyn i ich komputeryzacja.

## 4.5. Systemy wspomagające utrzymanie ruchu

Proces decyzyjny, dotyczący wielu działań związanych z utrzymaniem ruchu, może być skutecznie wykonywany jedynie z wykorzystaniem odpowiednich systemów komputerowych. Komputerowy system obsługi procedur i zapisów eliminuje potrzebę budowania manualnego systemu do śledzenia obiegu dokumentów i pilnowania, czy ich wersje są aktualne. Możliwe zadania utrzymania ruchu, realizowane przy użyciu wsparcia komputerowego, to m.in. [92]:

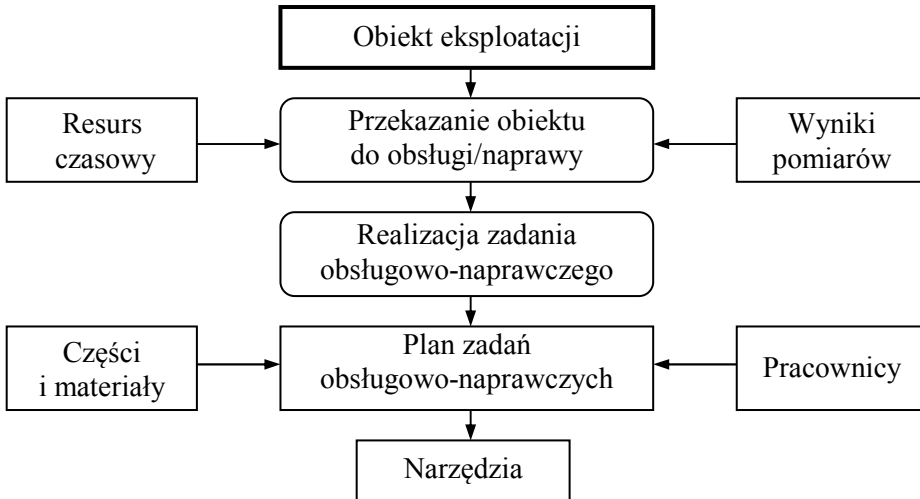
- zbieranie i analiza historii stanów maszyn i urządzeń,
- analiza kosztów obsługowo-naprawczych,
- optymalizacja przydziału zasobów do działań naprawczo-obługowych (analiza Pareto),
- koordynacja działań utrzymania ruchu z planem produkcyjnym,
- centralna administracja zgłoszeń awarii,
- rutynowe planowanie i harmonogramowanie (90% wszystkich prac utrzymania ruchu),
- standaryzacja metod utrzymania ruchu,
- połączenie z magazynem części, pozwalające na skoordynowane zamówienia,
- koordynacja między pracami utrzymania, monitorowaniem stanu oraz prognozami.

Systemy informatyczne przeznaczone do tego rodzaju zadań określane są skrótem *CMMS* (ang. *Computer Aided Maintenance Management Systems*). Systemy te z reguły pracują na transakcyjnych bazach danych, w których gromadzona jest informacja o obiektach eksploatacji oraz o ich otoczeniu [55]. Systemy *CMMS* występują najczęściej jako samodzielne programy do kompleksowej obsługi maszyn i urządzeń, ale mogą też być odpowiednimi modułami systemów ERP (ang. *Enterprise Resource Planning*) [31].

Systemy klasy *CMMS* należą do najbardziej złożonych pod względem informatycznym systemów przedsiębiorstwa. Działają na styku wielu procesów biznesowych, dotyczących zarówno przepływów rzeczowych, jak i finansowych. Ich głównym celem jest automatyzacja prac związanych z zarządzaniem środkami trwałymi infrastruktury technicznej. Systemy te często współpracują z czujnikami umieszczonymi w maszynach, liniach technologicznych lub transportowych [31]. Wyposażone są więc w różnego rodzaju interfejsy, automatyzujące zbieranie danych: (urządzenia automatyki pomiarowej, specjalne znaczniki, m.in. RFID (*Radio-frequency identification*)). Zawierają też zaawansowane narzędzia analityczne, związane z optymalizacją, planowaniem i przewidywa-

niem skutków podejmowanych przedsięwzięć (do których należą m.in. narzędzia matematyczne ujmujące statystykę i rachunek prawdopodobieństwa).

Z uwagi na swe walory użytkowe systemy *CMMS* zyskują coraz więcej zwolenników. Systemy te pozwalają bowiem nie tylko zapanować nad parkiem maszynowym, ale też szerzej pojętym majątkiem trwałym, zyskując funkcjonalność systemów *ERP*. Ogólny schemat funkcji realizowanych w systemie *CMMS* przedstawiono na rys. 42 [55].



Rys. 42. *Ogólny schemat funkcji realizowanych w systemie CMMS* [55]

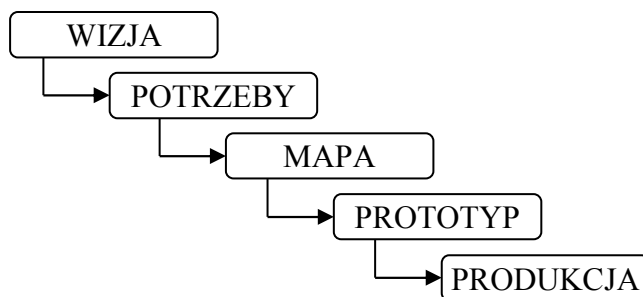
Z badań wynika, że obecnie oferowanych jest w Polsce ponad dwadzieścia programów typu *CMMS*, począwszy od niewielkich, przeznaczonych do pojedynczych urządzeń (np. *Maszyna*), na kompleksowych systemach kończąc (np. *SAP*, *Maximo*, *Aretics*) [31]:

- **SAP** – to najpopularniejszy systemem *CMMS* w Polsce. Jednak nie jest to w pełni system *CMMS*, a jedynie system finansowo-księgowy z rozbudowaną funkcjonalnością ułatwiającą nadzór nad środkami trwałymi w firmie i gospodarką remontową,
- **Maximo** jest podstawowym rozwiązaniem w dziedzinie systemów *CMMS* oferowanym przez IBM (drugie miejsce pod względem popularności). System zapewnia kompleksową obsługę zasobów niezbędnych do prowadzenia działalności biznesowej,
- **CMMS MASZYNA** – to godny polecenia program zarządzający maszynami i wspomagający utrzymanie ruchu. Obejmuje takie aspekty jak: ewidencja, historia awarii i eksploatacji, harmonogramy, rejestry części, osprzętu, dokumentacji, zasobów, generator dokumentów itp. Program

napisany został przez automatyka, dobrze umocowany w realiach małej i średniej firmy. Dostępne są wersje: jedno- i wielostanowiskowa,

- **ARETICS** – to jeden z mniej rozpowszechnionych, ale cenionych systemów CMMS. Został skonstruowany dla firm chcących budować efektywną organizację utrzymania ruchu i uzyskać pełną kontrolę nad wydajnością swoich systemów produkcyjnych.

Wdrożenie systemu *CMMS* nie jest projektem informatycznym czy technicznym (choć pierwsze etapy dotyczą właśnie tego zakresu). Dlatego też wiele wdrożeń często kończy się wraz z zapisaniem na dyskach ostatnich plików instalacyjnych. To przede wszystkim projekt organizacyjny, często zmieniający dotychczasowe zasady, przyzwyczajenia czy kulturę techniczną nie tylko zespołu Działu Utrzymania Ruchu, ale organizacji w ogóle. Ogólną procedurę postępowania przy wdrażaniu systemów klasy *CMMS* przedstawia rys. 43 [140].



Rys. 43. *Fazy wdrażania systemów klasy CMMS* [140]

- *wizja* – identyfikacja celów strategicznych korzyści biznesowych,
- *potrzeby* – zrozumienie problemów, które wdrażany system ma rozwiązać,
- *mapa zależności* – opis aktualnego stanu procesów oraz możliwości osiągnięcia oczekiwanych udoskonaleń, wynikających z przeprowadzonej informatyzacji,
- *sparametryzowany prototyp systemu* – zestaw modułów pod kątem potrzeb klienta,
- *wersja produkcyjna systemu* – zawierająca wprowadzone dane.

Każda z faz składa się z kilkunastu etapów. Szczegółowa specyfikacja zadań oraz zasobów wymaganych do ich realizacji stanowi podstawę do uruchomienia wdrożenia systemu. Stąd wynika, że wartość systemowi *CMMS* tak naprawdę nadaje użytkownik przez akceptację zastosowanych formuł oraz ułożenie wewnętrznych procedur firmy z algorytmem systemu.

## 4.6. Podsumowanie

Rozdział 4. dotyczy zagadnień związanych z utrzymaniem ruchu maszyn. Utrzymanie ruchu nie tworzy bezpośrednio wartości dodanej (przychodu), ale stanowi środek, bez którego nie jest możliwe prowadzenie działalności produkcyjnej w przedsiębiorstwie. Zadania w tym zakresie są w gestii służb utrzymania ruchu. W rozdziale tym omówiono zatem rolę i zadania wyspecjalizowanych działów eksploatacji, nazywanych działami utrzymania ruchu lub głównego mechanika.

Podkreślono, że w większości przypadków problemy utrzymania ruchu to w istocie problemy decyzyjne, np.: wymienić część czy naprawiać?, wykonać to we własnym zakresie czy też zlecić wyspecjalizowanemu przedsiębiorstwu? Wszystko to zależy od wielkości przedsiębiorstwa i stopnia zorganizowania działów utrzymania ruchu. Omówiono rodzaje obsługi technicznych i remontów. Zwrócono uwagę na różnice terminologiczne pomiędzy pojęciami „remont” i „naprawa”. Podkreślono wymagania, jakie są stawiane przed służbami utrzymania ruchu, aby właściwie prowadzić działalność obsługowo-naprawczą w przedsiębiorstwie. Wychodząc z tej przesłanki omówiono kategorie zadań nakładanych na działy utrzymania ruchu, będące podstawą formułowania strategii w zakresie użytkowania i obsługi maszyn.

Przybliżono pojęcie strategii eksploatacyjnej oraz podano rodzaje działań i kryteria klasyfikacji w tym zakresie. Ogólnie wyróżnia się dwie podstawowe klasy strategii utrzymania ruchu: przed wykryciem błędu (profilaktyka czynna, profilaktyka planowo-zapobiegawcza i profilaktyka prognostyczna) oraz po wykryciu błędu (strategia korekcyjna i strategia „od awarii do awarii”). Scharakteryzowano zatem te rodzaje strategii. Zwrócono uwagę także na trendy w zakresie utrzymania ruchu i podano krótką charakterystykę poszczególnych okresów.

Podkreślono, że proces decyzyjny w zakresie utrzymania ruchu może być skutecznie wykonywany jedynie przy użyciu techniki komputerowej. Opisano zatem, w jakim zakresie możliwe jest stosowanie wsparcia informatycznego do działań związanych z utrzymaniem ruchu. Scharakteryzowano stosowane w tym zakresie systemy komputerowe klasy CMMS oraz omówiono proces wdrażania takich systemów w praktykę przemysłową. Podkreślono, że wdrażanie takiego systemu nie jest projektem informatycznym ani technicznym, ale przede wszystkim organizacyjnym, a jako taki wymaga często zmiany wielu przyzwyczajeń, nawyków i istniejącej kultury organizacyjnej w przedsiębiorstwie. Stąd wynika, że wartość systemowi CMMS tak naprawdę nadaje użytkownik.

## 5. TRWAŁOŚĆ I ZUŻYCIE MASZYN

### 5.1. Dyspozycyjność maszyn i urządzeń

Chcąc wydać ocenę o właściwościach eksploatacyjnych maszyny bądź jakiegokolwiek innego urządzenia, należy najpierw ustalić zbiór cech funkcjonalnych według których ocena ta jest wystawiana. *Cecha funkcjonalna* – to właściwość obiektu charakteryzująca wykonywanie przez obiekt funkcji (zadań), do których jest on przeznaczony. Cechy funkcjonalne mogą być obserwowane tylko w czasie działania obiektu [162]. Zbiór cech funkcjonalnych maszyny tworzy jej charakterystykę eksploatacyjną. Czynniki eksploatacyjne i procesy destrukcyjne elementów maszyny powodują niekorzystne zmiany wartości istotnych cech funkcjonalnych i tym samym pogorszenie jej właściwości eksploatacyjnych.

Jedną z najbardziej istotnych cech funkcjonalnych maszyny jest jej dyspozycyjność [151]. Ogólnie „dyspozycyjność” (ang. *availability*) oznacza tyle, że „coś” (człowiek bądź urządzenie techniczne) jest gotowe do pracy na każde skinienie. We współczesnej neoliberalnej gospodarce „dyspozycyjność” urosła do rangi kardynalnej cnoty: pracodawcy poszukują dyspozycyjnych pracowników, a producenci dyspozycyjnych (stale gotowych do pracy) urządzeń technicznych. Można więc powiedzieć, że synonimem dyspozycyjności urządzeń jest ich stała gotowość do pracy.

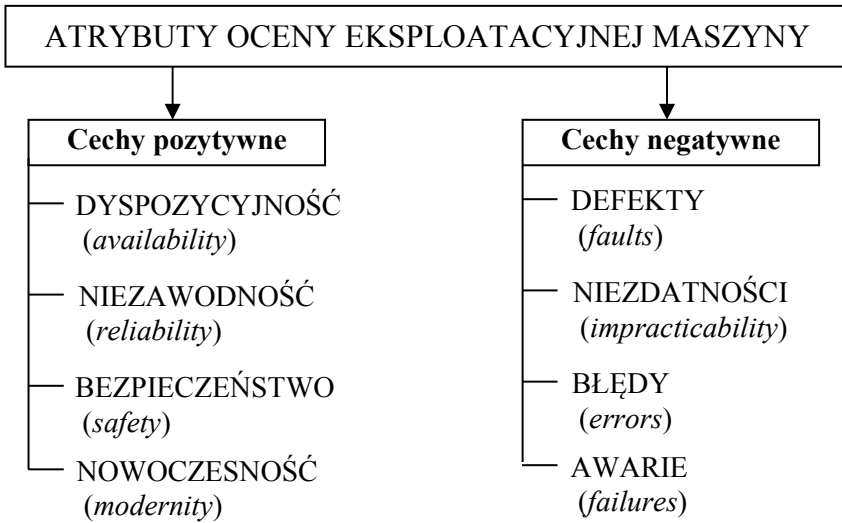
*Dyspozycyjność (gotowość)* jest właściwością odnoszącą się do zdolności bycia zdatnym (niekiedy podkreśla się: gdy występuje potrzeba jego użytkowania) do wypełniania określonych funkcji. Aby urządzenie techniczne było zdadne musi być:

- odpowiednio zasilone,
- sprawne technicznie.

Ten pierwszy aspekt jest poza dyskusją. Ten drugi można zwiększyć przez odpowiednie strategie eksploatacyjne oraz działania w zakresie niezawodności.

Niskie koszty eksploatacji oraz duża dyspozycyjność maszyn, pojazdów lub też innych urządzeń technicznych, to podstawowe czynniki wpływające nie tylko na rentowność przedsiębiorstwa, ale także na realizowane procesy. Stąd też w kierunku poprawy tych czynników zmierza świadoma polityka eksploatacyjna [135]. Dyspozycyjność najczęściej charakteryzuje procent czasu, w ramach którego maszyna jest zdolna do świadczenia oczekiwanych usług. Stanowi więc, obok niezawodności, bezpieczeństwa i nowoczesności, istotny atrybut pozytywnej oceny eksploatacyjnej maszyny – rys. 44.





Rys. 44. *Atrybuty oceny eksploatacyjnej maszyny*

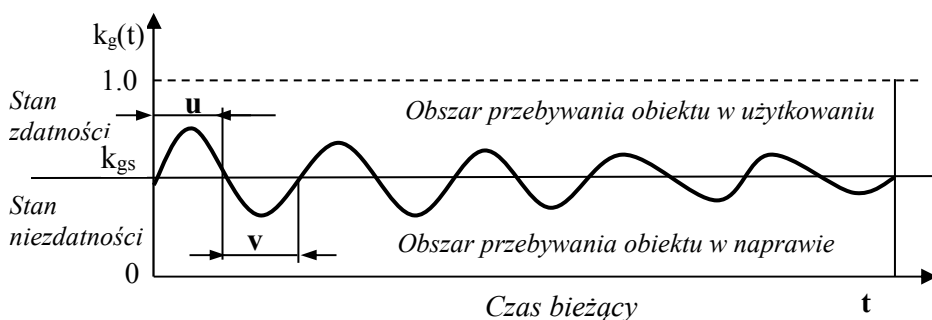
Wysoka dyspozycyjność maszyn i urządzeń jest nierozzerwalnie związana z ich niezawodnością. Zgodnie z rys. 44 nie jest jednak jej tożsamością, mimo że niekiedy tak się przyjmuje (por. *Słownik naukowo-techniczny angielsko-polski*, red. S. Czerni i M. Skrzyńska, WNT 1983, s. 51). Według normy terminologicznej PN-93/N-50191 „niezawodność obiektu to zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi”. Z tego wynika, że gotowość (dyspozycyjność) jest pojęciem nadrzędnym nad niezawodnością.

Przedmiotem badań i analiz niezawodności jest każde uszkodzenie, każdy błąd i defekt powodujący awarię urządzenia, natomiast przedmiotem analiz dyspozycyjności jest stosunek czasu użytkowania urządzenia do całego potencjalnego czasu jego pracy. Odpowiednikiem dyspozycyjności jest zatem bardziej efektywność niż niezawodność.

Większa niezawodność poszczególnych elementów maszyny zapewnia dłuższy okres ich pracy, a tym samym decyduje o sprawności (dyspozycyjności) całej maszyny. Wobec powyższego, aby maszyna była dyspozycyjna winna być:

- niezawodna,
- przygotowana do pracy (zasilona w materiały eksploatacyjne i odpowiedni osprzęt),
- dopuszczona do użytku (w świetle określonych przepisów, np. ruchu drogowego).

Celem oceny gotowości technicznej maszyny lub innego urządzenia jest najczęściej wyznaczenie prognozy, czy dany obiekt techniczny będzie znajdował się w stanie zdadności w przyszłości i czy umożliwi to realizację danego zadania. W przyszłości obiekt może być zdadnym (wykonywać pracę) lub jej nie wykonywać. Z punktu widzenia dyspozycyjności istotna jest relacja pomiędzy tymi okresami. Ilościowo relację tę można opisywać odpowiednim wskaźnikiem. Charakterystyką ilościową tak rozumianej gotowości (dyspozycyjności) jest *współczynnik gotowości*  $k_g$ , definiowany jako udział czasu w stanie gotowości do pracy w całym rozpatrywanym okresie eksploatacji. Jest to funkcja, której wartości ze wzrostem czasu bieżącego  $t$  dążą do granicy zwanej stacjonarną wartością współczynnika gotowości  $k_{gs}$  – rys. 45.



Rys. 45. *Przebieg współczynnika gotowości dla obiektów naprawialnych*

Gotowość do pracy obiektów nienaprawialnych wiąże się tylko z wartością  $u$ . Dla obiektów naprawialnych wartość tzw. stacjonarnego współczynnika gotowości technicznej  $k_g$  opisuje średni czas do uszkodzenia – ang. *MTTF* (*Mean Time To First Failure*) – określony wzorem [133]:

$$k_g = \frac{u}{u + v} \quad 0 \leq k_g \leq 1 \quad (6)$$

gdzie:

$u$  – średni czas między uszkodzeniami – *MTBF* (*Mean Time Between Failures*),  
 $v$  – średni czas przywrócenia zdadności – *MTTR* (*Mean Time To Repair*).

Wynika z powyższego, że współczynnik gotowości określa efektywność techniczną posiadanych przez przedsiębiorstwo maszyn, pojazdów lub innych urządzeń technicznych. Szczególnie istotny jest on w ekonomice transportu [46]. Jego miarą jest prawdopodobieństwo, tego, że w danym czasie obiekt naprawialny znajduje się w stanie gotowości do użytkowania (dla obiektów nienaprawialnych  $v = 0$ , współczynnik  $k_g$  ma wartość równą 1).

## 5.2. Zmiana stanu technicznego maszyn

Charakterystyki obiektu technicznego związane z atrybutami negatywnymi dotyczą w głównej mierze tego, co wynika z fizycznego starzenia się maszyny. Pojęciem tym nazywa się proces naturalnych zmian, zachodzących w materiałach części maszyn na skutek wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych, powodujących nieodwracalne zmiany właściwości użytkowych tych części [159]. Część z tych zmian można wyeliminować, części zapobiegać, ale (niestety) wraz z upływem czasu zmiany te stają się coraz intensywniejsze.

Na każdym obiekcie technicznym czas odciska bowiem swoje piętno w wymiarze historycznym i bieżącym [130]:

- w wymiarze historycznym – obserwowany jako proces unowocześniania obiektów,
- w wymiarze bieżącym – jako proces degradacji stanu przez zużycie i uszkodzenia.

W skali bieżącej „historia życia obiektu technicznego” wyznaczana jest więc ciągiem zmieniających się jego stanów technicznych. Kolejne momenty, w których śledzimy obiekt, nazywamy krokami. *Stanem* jakiegoś obiektu  $a$  w chwili  $t$ , nazwiemy więc zbiór liczb  $x$ :

$$a(t) = (x_1, \dots, x_n) \quad (7)$$

Zbiór uporządkowany stanów obiektu  $a$ , wziętych w tej kolejności w jakiej się one realizują w czasie  $t$ , nosi nazwę *historii stanów*  $S$  [134]:

$$S = a(k), a(k+1), a(k+2), \dots, a(k+n) \quad (8)$$

Możemy powiedzieć, że dla danego obiektu, czas jest ciągiem jego stanów technicznych lub (w sferze informacyjnej) ciągiem stanów naszej świadomości o istotnych cechach  $F$  tego obiektu (np. mocy, wydajności, prędkości, itp.).

Przyjmijmy np., że mamy do czynienia ze zjawiskiem  $k$ , które występuje w obiekcie technicznym i przejawia się w postaci różnych jego charakterystyk:

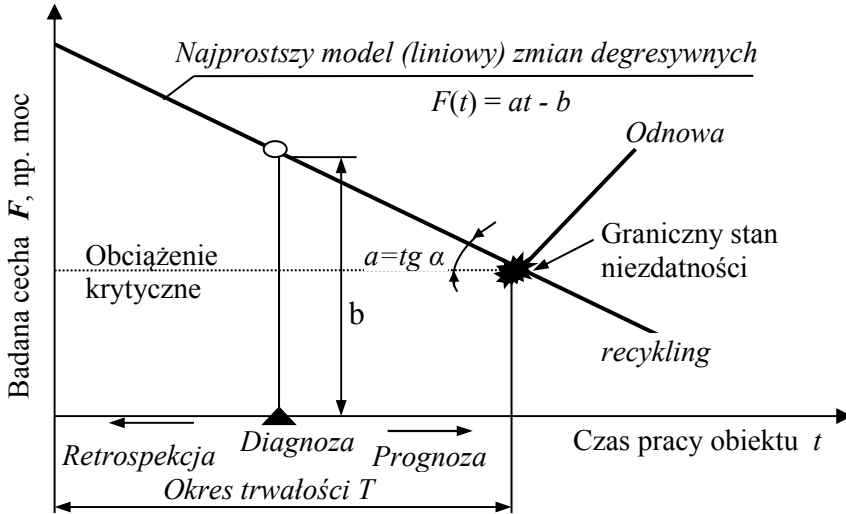
$$k \{a, F_1, F_2, F_3, F_4, F_n\} \quad (9)$$

przy czym:

- $a$  – pewien dowolny obiekt techniczny,
- $F_1 \dots F_n$  – wielkości charakteryzujące obiekt  $a$ , zależne tylko od czasu  $t$ .

To, jaki jest stan techniczny tego obiektu w danej chwili  $t$ , możemy ustalić w wyniku działania określanego jako *diagnoza* (gr. *diagnosis* – *rozpoznanie*).

Chwila jest jednak tylko pewnym, bardzo krótkim momentem czasu i w rzeczywistości stale będziemy mieli do czynienia, albo z przeszłością, którą rozpoznajemy w wyniku *retrospekcji*, albo z przyszłością, którą przewidujemy w wyniku *prognozy* – rys. 46 [130].

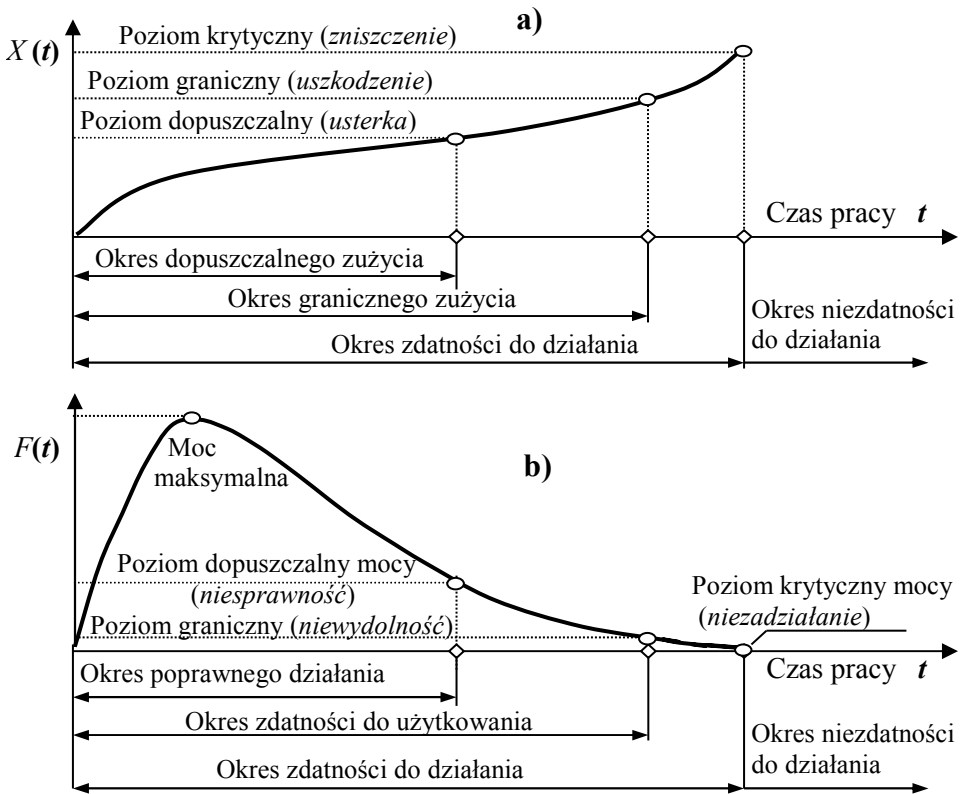


Rys. 46. *Działania eksploatacyjne dotyczące stanu technicznego maszyny* [130]

W stosunku do przeszłości jesteśmy bezradni (możemy co najwyżej domniemywać „dlaczego tak się stało?”). Natomiast jaki będzie w przyszłości stan techniczny obiektu, w określonym momencie czasu, możemy określić z prognozy. Potrzebny jest tylko model przebiegu zmian (najczęściej zakładamy liniowy  $F(t) = at - b$ ; gdzie  $a$  jest kątem nachylenia linii trendu) oraz wartość  $b$ , którą uzyskujemy w wyniku pomiaru diagnostycznego.

Jak wynika z retrospekcji, stany techniczne maszyn z upływem czasu ulegają degresywnym zmianom. Zmiany te przejawiają się w postaci rozmaitych procesów strukturalnych  $X$ , takich jak np.: starzenie, zużycie zmęczeniowe, zużycie udarowe itp. Procesy te wywołują plastyczne i sprężyste odkształcenia, przepalenia, stopienia oraz utratę wewnętrznej spoiwości tworzywa elementów.

Zmiany wymiarów powodują zmianę wzajemnego rozmieszczenia elementów, obserwowane jako luzy. Te zaś z kolei są przyczynami określonych *niedomagań*, obserwowanych jako: niesprawności, niewydolności, lub niezadziałania, itp. Występuje więc ściśle powiązanie pomiędzy parametrami strukturalnymi a parametrami użytkowymi. Schematycznie pokazano to na rys. 47 [62].



Rys. 47. Schemat powiązania parametrów strukturalnych (a) i użytkowych (b) [62]

Dla parametru strukturalnego  $X$  (rys. 47a) wyróżniamy pewne stany techniczne:

- *dopuszczalne* – np. z uwagi na kojarzone wymiary (pasowanie),
- *graniczne* – ze względu na możliwość dokonania zabiegu naprawczego,
- *krytyczne* – ze względu na nagły (niekontrolowany) wzrost intensywności zużywania się elementu, stwarzający zagrożenie dla całej maszyny.

Zaistnieć w tym względzie mogą więc: *usterki, uszkodzenia i zniszczenia*.

Dla parametru użytkowego  $F$  (rys. 47b) wyróżnić można również pewne stany:

- *dopuszczalne* – w ramach dopuszczalnej tolerancji, np. mocy,
- *graniczne* – ze względu na niedopuszczalny spadek wartości danego parametru użytkowego,
- *krytyczne* – ze względu na uruchomienie maszyny.

Zdarzenia występujące w tym zakresie określane są jako: *niesprawności, niewydolności i niezadziałania*.

### 5.3. Trwałość maszyn i jej rodzaje

Współczesne maszyny i inne urządzenia techniczne odznaczają się wysoką użytecznością, ale ze względu na cenę stanowią znaczącą inwestycję dla większości nabywców. Nabywcy uważają więc, że urządzenie techniczne powinno im służyć przez dostatecznie długi czas, czyli mówiąc inaczej – mieć wysoką trwałość [73]. *Trwałość* to zdolność obiektu do wypełnienia wymaganej funkcji w danych warunkach użytkowania i obsługiwanania aż do osiągnięcia stanu granicznego (patrz rys. 46). Określona jest dla normalnych, czyli założonych przy projektowaniu, warunków eksploatacji [131]. Trwałość maszyny lub urządzenia jest to zatem kategoria czasu, która charakteryzuje dopuszczalny proces zużycia się urządzenia podczas jego eksploatacji.

Zagadnienie trwałości, jako jedno z podstawowych kryteriów oceny funkcjonalności urządzeń, od wielu dziesiątek lat nurtuje środowiska naukowe oraz konstruktorów, wytwórców i użytkowników tych urządzeń. Odnosi się to zwłaszcza do tych przypadków, gdzie wymagane jest bezwzględne spełnienie kryterium wymaganej trwałości urządzenia w danych warunkach eksploatacyjnych. W warunkach tych ustala się bowiem *trwałość rzeczywista* [56].

Przy urządzeniach użyteczności publicznej (rynkowych) użytkownik nabywając jakieś urządzenie, np. telewizor, czułby się poszkodowany przez dostawcę, gdyby urządzenie to nie pracowało chociaż przez jakiś czas. To założenie jest jednym z aspektów gry rynkowej. Trwałość tę określa się pewnymi rygorami prawnymi, znanymi ogólnie pod postacią gwarancji [73].

Producent wie, że nieodzowną częścią jego gwarancji jest pewna długo-trwałość pracy urządzenia, sięgająca znacznie poza prawnie zagwarantowany okres gwarancji, do której zobowiązał się umową. Dlatego zgadza się niejednokrotnie wydłużyć ten okres. Granicę wyznacza: kalkulacja handlowa, badania niezawodności oraz informacje o trwałości konkurencyjnych wyrobów [137].

Z punktu widzenia inżynierii eksploatacji ważne jest to powiązanie pomiędzy trwałością a niezawodnością. Istnieje pomiędzy nimi związek, ale nie są to pojęcia tożsame. Jedno i drugie pojęcie dotyczy zmian w czasie, ale opisywane jest inną funkcją i odnosi się do różnej liczności badanych obiektów [133]:

- *trwałość  $T$*  – to właściwość dotycząca jednego (konkretnego) obiektu i opisywana jest funkcją czasu,
- *niezawodność  $R$*  – to właściwość dotycząca zbioru obiektów danego typu i opisywana jest poziomem prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia.

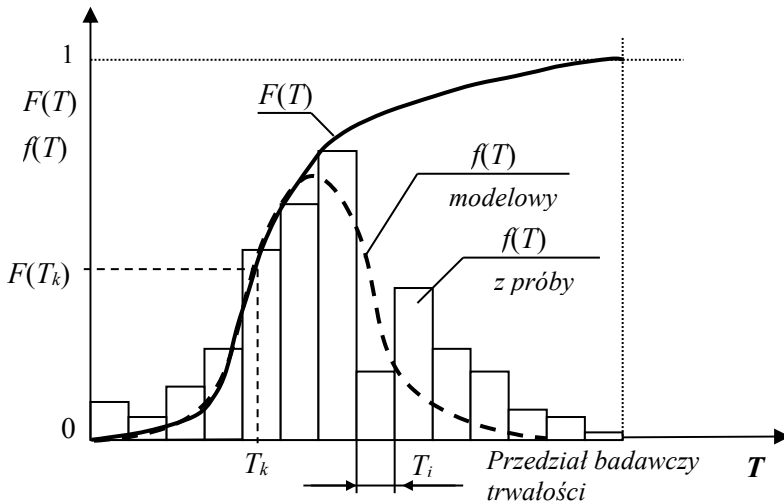
Ze względu na miarę trwałości wyróżnia się [29]:

- *trwałość użytkową* – mierzona czasem użytkowania obiektu,
- *trwałość obsługową* – mierzona czasem obsługiwanego obiektu,
- *trwałość eksploatacji* – mierzona czasem bieżącym (eksploatacji).

Właściwości obiektu technicznego, podatne na konsekwencje zużycia fizycznego, stanowią o jego wartości użytkowej lub inaczej o *trwałości technicznej* (fizycznej). Natomiast właściwości podatne na konsekwencje zużycia ekonomicznego stanowią o wartości wymiennej lub inaczej o *jego trwałości ekonomicznej* [73].

Trwałość urządzeń, które budujemy, podobnie jak długość ludzkiego życia, nie jest więc określona *a priori* (przed doświadczeniem). W porównaniu ze skalą ludzkiego życia, jest ona zawarta między zerem a nieskończonością. Urządzenia techniczne mogą ożywiać lub znikać na zawsze przez samą magię ludzkiego intelektu, np. gdy przestają się podobać (tzw. *zużycie moralne*), lub zostały wymyślone nowe, lepsze od dotychczasowych. Oczekowaną trwałość można zawsze oszacować, co jest konieczne ze względu na odnawianie i amortyzację. Do tego celu służą badania niezawodnościowe [133].

Mając informacje o trwałości  $T$  pewnej liczby obiektów można wyznaczyć rozkład trwałości  $f(T)$ , tj. funkcję gęstości prawdopodobieństwa tych uszkodzeń. Łącząc wartości prawdopodobieństw z poszczególnych przedziałów tego rozkładu, można otrzymać łączny rozkład uszkodzeń, czyli dystrybuantę trwałości  $F(T)$  tych obiektów – rys. 48.



Rys. 48. Rozkład trwałości  $f(T)$  oraz dystrybuanta trwałości  $F(T)$

Znając dystrybuantę trwałości, pokazaną przykładowo na rys. 48, można określić populację  $F(T_k)$ , obiektów o okresie trwałości  $T_k$ , czyli zbiór obiektów, które ulegną uszkodzeniom do czasu  $T_k$ . Dystrybuanta  $F(T)$  wskazuje również na fakt, że istnieje taki moment, w którym uszkodzeniu ulegną wszystkie obiekty.

Badania trwałości nabierają coraz większego znaczenia nie tylko jako podstawa do doskonalenia konstrukcji maszyn i doskonalenia procesu produkcyjnego, lecz również jako jedna z możliwości uzyskania wiarygodnych informacji niezbędnych do interpretacji i prognozowania zjawisk, czyli tworzenia teorii naukowych. Teoria może być zatem traktowana jako pewna doktryna, motywująca podejmowanie na jej podstawie określonych działań praktycznych [78]. Przykładowo zadane są określone parametry trwałości lub niezawodności węzła kinematycznego i trzeba znaleźć realizację konstrukcyjną węzła, tj. określić w jakich warunkach obciążenia i prędkości względnej oraz smarowania może on zrealizować założenie wyjściowe.

Nauką zajmującą się tymi zagadnieniami, dotyczącymi ustalania różnych czynników wpływających na trwałość, jest *tribologia* (czasami spotykana też pod nazwą trybologia). Jest to nauka o procesach zachodzących w ruchomym styku ciał stałych. Tribologia jest ważna przy konstruowaniu i eksploatacji maszyn, bowiem w zakresie jej zainteresowań leżą takie zagadnienia jak [141]:

- ustalenie racjonalnych (ze względów technicznych) granic trwałości,
- opracowanie metod badań eksploatacji maszyny i urządzeń,
- badanie warunków eksploatacji,
- określenie zależności między trwałością a okresem użytkowania,
- opracowanie metod badań w zakresie trwałości maszyny, itp.

Większa trwałość kosztuje. Można więc rozróżnić urządzenia o oczekiwanej *średniej trwałości* i o *wysokiej trwałości*. W tym drugim przypadku może być ona ważniejsza od ceny, np.: satelity, wzmacniacze w kablu ułożonym na dnie oceanu, czy też sprzęt wojskowy. Na ogół krzywa ceny obiektu w zależności od jego trwałości jest sumą krzywej rosnącego obciążenia inwestycyjnego i malejącego obciążenia eksploatacyjnego (zawierającego koszty utrzymania w ruchu i przestoju). Osiąga ona często minimum w operacyjnym przedziale czasu. Będzie to *trwałość ekonomiczna* wyrobu pod warunkiem, że występująca częstość uszkodzeń umożliwi w miarę znośną eksploatację [73].

Z punktu widzenia ekonomii długowieczność wyprodukowanego wyrobu (duża trwałość) nie jest pożądana sama przez się ani dla wytwórcy, ani dla użytkownika. Dla wytwórcy nie tylko dlatego, że chce on oczywiście otrzymywać nowe zamówienia, lecz również ze względu na realizowany przez niego postęp techniczny, skutek którego dane urządzenie staje się przestarzałe, a dla użytkownika z powodu np.: utraty sprawności, zmiany upodobań, mody itp.



## 5.4. Techniczne procesy zużywania części maszyn

Zużywanie się części elementów czy mechanizmów jest nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym pracy maszyn i innych urządzeń. Zużycie jest wynikiem normalnej pracy elementów a przede wszystkim długotrwałego wzajemnego oddziaływania współpracujących ze sobą części, wysokiej temperatury oraz korozji. Zużywanie pogarsza stan techniczny tych urządzeń, a w krańcowym przypadku uniemożliwia ich prawidłową eksploatację.

Procesy niszczenia maszyn i urządzeń rozpoczynają się w wierzchniej warstwie materiału. Stąd *zużywaniem* nazywamy procesy zmian zachodzących w obszarze warstwy wierzchniej ciała stałego wskutek współpracy z innymi częściami bądź oddziaływaniem środowiska. Czynniki wywołujące zużycie są powiązane bądź z samą maszyną (w tym realizowanymi przez nią działaniami), bądź też z środowiskiem – korozja [55].

Zużywanie może być normalne lub przyśpieszone. Zdecydowanie gorsze jest *zużycie przyśpieszone*, którego przyczyną są niewłaściwe warunki eksploatacji, nieprawidłowa obsługa techniczna, wadliwie wykonywane naprawy, błędy w konstrukcji lub wykonaniu. *Zużywanie normalne* jest głównie następstwem procesu tarcia. Zużywanie wywołane tarcie ma charakter mechaniczno-fizyczno-chemiczny i występuje zawsze podczas tarcia suchego i mieszanego. Zużywanie mechaniczne jest zasadniczym czynnikiem wpływającym na trwałość zespołów maszyn, chociaż występuje ono w połączeniu z innymi rodzajami procesów zużywania, np.: adhezyjnego, dyfuzyjnego, zmęczeniowego [16].

Ogólnie przyjmuje się, że oddzielanie materiału w procesie zużywania jest wynikiem doraźnego (tj. w czasie trwania jednego cyklu) oddziaływania mechanicznego stykających się elementarnych obszarów, bądź też jest poprzedzone przez inne zjawiska. Zjawiska te determinują wówczas mechaniczne oddzielenie materiału (lub znacznie ułatwiają je) przez zmniejszenie wytrzymałości wierzchnich obszarów materiału i ich spójności z położonymi w głębi warstwami materiału trącego się ciała. Mechaniczne procesy zużywania polegają zatem na stratach materiałowych, które są wynikiem oddzielania cząstek ze współpracujących powierzchni przez mikroskrawanie. Skutkiem tego jest zużycie, które można mierzyć objętościowo, liniowo lub wagowo.

Proces niszczenia powierzchni dzieli się zatem na dwie grupy [80]:

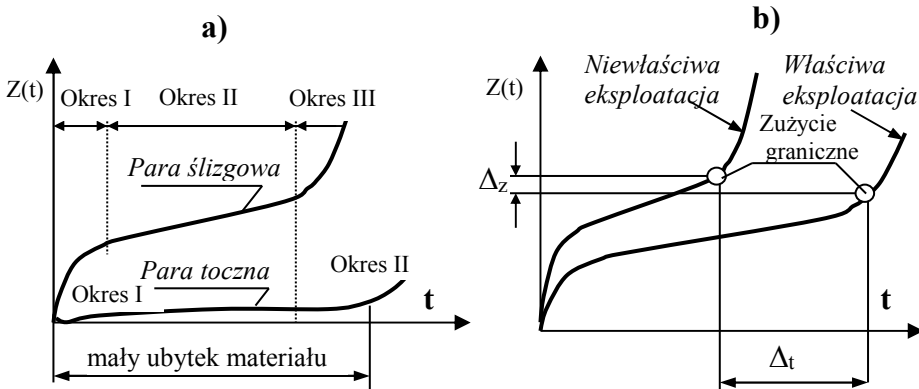
- *doraźne* – mikroskrawanie, odrywanie, bądź ścinanie nierówności,
- *przygotowane* – zmęczenie tarciove, powstawanie połączeń tarcio-  
wych.

Podział taki, oprócz aspektu poznawczego, ma także znaczenie praktyczne, ponieważ określa on metody przeciwdziałania procesom niszczenia. W pierwszym przypadku odporność na oddzielanie się materiału jest pewną funkcją jego własności mechanicznych; przeciwdziałanie polega zatem na odpowiednim podwyższaniu tych własności. W drugim przypadku powiększanie odporności na oddzielanie polega na hamowaniu zjawisk je przygotowujących, np. przez odpowiednie smarowanie pary ciernej [164].

Para cierna opisywana jest własnościami materiałowymi, konstrukcyjnymi i geometrycznymi, zaś oddziaływanie zewnętrzne – rodzajem ruchu, tarcie, środowiskiem, obciążeniem, jakością obsługi. Efekt oddziaływań tego środowiska na parę cierną może być użyteczny, bądź szkodliwy. Konsekwencją oddziaływań użytecznych, np. w trakcie docierania, jest lepsze wypełnianie przez nią swojej funkcji, efektem szkodliwym jest natomiast zużywanie. Rodzaj występującego w parze ciernej zużywania stanowi podstawę jego klasyfikacji, i tak [80]:

- *zużywanie mechaniczne* – procesy przebiegają wskutek oddziaływań mechanicznych,
- *zużywanie fizykomechaniczne* – zużycie mechaniczne połączone z procesami fizycznymi,
- *zużywanie chemiczno-mechaniczne* – mechaniczne połączone z procesami chemicznymi,
- *zużywanie kompleksowe* – połączenie wszystkich rodzajów zużycia.

Przebieg krzywej Lorentza, opisującej zużywanie techniczne, zależy nie tylko od charakteru procesu tarcia, ale także od warunków eksploatacji. Zwiększone obciążenie powoduje przyspieszone o  $\Delta_z$  zużywanie pary ciernej – rys. 49 [141].



Rys. 49. Przebieg krzywej Lorentza w czasie eksploatacji [141]:

a) par o różnym charakterze tarcia, b) par eksploataowanych w różnych warunkach

Z tego przeglądowego spojrzenia na zachowanie się obiektu technicznego podczas eksploatacji wynika, że problematyka tarcia i zużywania par ciernych w procesach tribologicznych jest bardzo złożona. Świadczy o tym fakt, że liczba istotnych czynników, które należałoby uwzględnić podczas modelowania procesu, mieści się w granicach od 50 do 100, w zależności od poziomu szczególności rozważań. Przyjmując tylko dwuwartościowe wielkości wejść i wyjść (tj. pojawianie się czynnika lub jego brak), otrzymuje się liczbę możliwych stanów tej pary  $s = 2^n$  równą  $1,13 \cdot 10^{13}$  do  $1,27 \cdot 10^{30}$  [80]. Już same te liczby te świadczą o złożoności problemu; w rzeczywistości istnienie uwikłanych oddziaływań pomiędzy czynnikami sprawia, że liczba możliwych stanów, które należałoby rozpatrywać jest nieporównywalnie większa.

Z punktu widzenia inżynierii eksploatacji ważniejsze jest zatem poznanie istoty problemu, a następnie stosowanie w praktyce działań prowadzących do zmniejszenia zużywania się maszyn. Działania w tym kierunku prowadzi się na wszystkich etapach istnienia maszyn: projektowania i wytwarzania oraz szeroko rozumianej eksploatacji – przykładowo odpowiednio smarując oraz filtrując media robocze (np. oleje, powietrze w silniku spalinowym, powietrze doprowadzone do sprężarki). Przykład ważniejszych sposobów postępowania, prowadzących do mniejszego zużywania części maszyn, przedstawia rys. 50 [74].



Rys. 50. Czynniki i działania zmniejszające zużywanie części maszyn [74]

## 5.5. Zużywanie ekonomiczne maszyn

W zakresie czynników powodujących utratę wartości maszyny i urządzeń technicznych, wyróżnia się nie tylko ten jeden, ale trzy rodzaje zużywania [155]:

- *zużywanie z przyczyn technicznych* – powodowane wyłącznie wewnętrznymi czynnikami fizycznymi (tarcie),
- *zużywanie z przyczyn funkcjonalnych* – powodowane wewnętrznymi czynnikami wpływającymi na sprawność (energochłonność),
- *zużywanie z przyczyn ekonomicznych* (starzenie moralne) – powodowane czynnikami zewnętrznymi, np. utratą nowoczesności maszyny.

Ekonomiczność eksploatacji zależna jest z jednej strony od energetycznej sprawności maszyny, czyli od stosunku mocy wykorzystanej do mocy pobranej, z drugiej strony od rentowności maszyny, czyli różnicy pomiędzy wartością produkcji, a kosztami eksploatacji i amortyzacji. Wymagania ekonomiczne uwzględniają ekonomiczność budowy samej maszyny, procesu jej eksploatacji oraz procesu wytwarzania.

O ekonomiczności wytwarzania świadczy przede wszystkim koszt własny maszyny, przy założeniu, że spełnia ona wszystkie przewidziane funkcje [127]. Niezależnie zatem od zaprzestania eksploatacji maszyny z powodu zużycia technicznego (któremu można przeciwdziałać), może nastąpić to również z powodów ekonomicznych [28]. Tego rodzaju zużywanie jest konsekwencją starzenia się maszyny, głównie na skutek postępu technicznego i technologicznego (nowoczesność rozwiązań konstrukcyjnych podyktowana jest również względami ekologicznymi i ergonomicznymi).

Stare maszyny na ogół mają niską wydajność, co zwiększa koszty wytworzenia. Nowe maszyny i urządzenia, bardziej wydajne i efektywne, powodują, że dalsze stosowanie posiadanych dotychczas staje się nieopłacalne. Przykładem może być wprowadzenie trakcji elektrycznej w transporcie kolejowym, które sprawiło, że eksploataowanie parowozów stało się niecelowe, mimo że zachowały one swą sprawność techniczną, a więc nie były zużyte fizycznie.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że cechą charakterystyczną zużywania ekonomicznego jest to, że odnosi się ono do ściśle określonych warunków. Zmiana miejsca użytkowania lub zmiana przeznaczenia może uczynić eksploatację danego urządzenia opłacalną. Na przykład wspomniany parowóz, który w eksploatacji na kolei jest nieopłacalny, może być opłacalny w transporcie wewnętrznym lub przetaczaniu wagonów. W praktyce zużywanie ekonomiczne przebiega wolniej dla maszyn konwencjonalnych, a szybciej dla elektronicznych [97].

Zużywanie ekonomiczne środka trwałego występuje również w wypadku [57]:

- braku zapotrzebowania na wyroby produkowane z zastosowaniem danego urządzenia,
- wyczerpania się złóż, gdyż zainstalowane tam urządzenia nie mogą być już eksploatowane, np. szyby kopalniane, wieże wiertnicze,
- zmiany technologii, np. zastosowanie płyt gipsowych w budownictwie, powodujące zaniechanie używania maszyn do tynkowania.

Podobnie jak przy zużywaniu technicznym, również przy zużywaniu ekonomicznym następuje obniżenie wartości maszyn i urządzeń. Inny jest jednak charakter stosowanych działań. Nie występuje tu ich naprawa ale wymiana. Likwiduje się je, drogą kasacji lub sprzedaży, a w ich miejsce kupuje nowe.

Uzasadniona wymiana środków trwałych (substytucja) jest wówczas, gdy w wyniku zastąpienia użytkowanego obiektu na inny (wykorzystywany do tych samych celów) eksploatator urządzenia otrzyma korzystniejsze parametry użytkowe. Obiekt wymieniony jest zatem substytutem obiektu wymienianego [141].

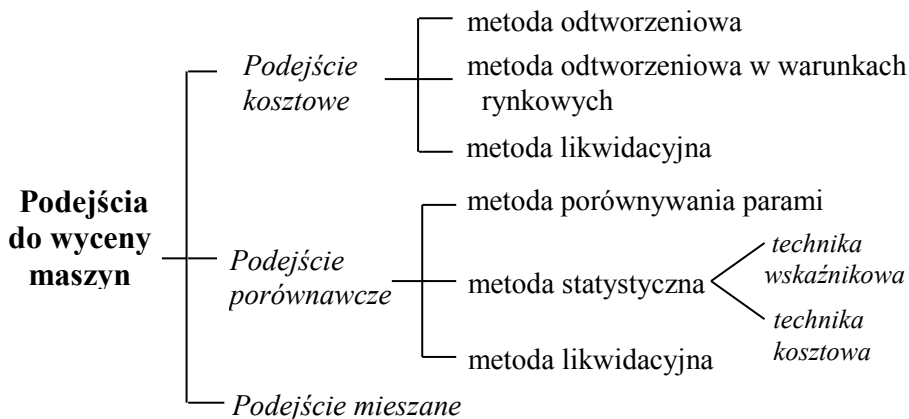
Zużywanie ekonomiczne maszyn i urządzeń powoduje, że zakłady zmuszone są do ich wymiany, jeśli chcą utrzymać swoją zdolność produkcyjną, a w konsekwencji pozycję na rynku. Prowadzi to do modernizacji, czyli do inwestycji na odnowienia [155]. Odzwierciedleniem procesu zużycia ekonomicznego infrastruktury technicznej w przedsiębiorstwie są zatem następujące działania:

- *umorzenie środków trwałych*, polegające na corocznym zmniejszeniu ich wartości o wyliczoną kwotę i tym samym ustaleniu ich wartości bieżącej,
- *amortyzacja środków trwałych*, polegająca na sukcesywnym, na ogół comiesięcznym, ustalaniu kwoty (odpisu) ich zużycia i wliczaniu jej w koszty działalności gospodarczej.

Zwykle jest tak, że z upływem czasu koszty eksploatacji rosną (przeeglądy, konserwacja, naprawy i remonty), a wartość środka trwałego maleje. Próbuje się zatem ustalić optymalny okres jego użytkowania. Funkcja opisująca minimalizację kosztów użytkowania środka trwałego, tzw. *wartość rezydualna*, jest uzależniona od dwóch zmiennych decyzyjnych: kosztów eksploatacji i kosztów amortyzacji. Do wyznaczania optymalnego momentu wymiany urządzenia na nowe (czyli optymalnej wartości rezydualnej) potrzebne są następujące dane:

- wartość nowego urządzenia (ewentualnie funkcja zmiany ceny nowego urządzenia w czasie),
- funkcja spadku wartości netto w czasie lub model amortyzacji.

Trzecim, ale równie istotnym, czynnikiem jest sama metoda wyceny. W tym zakresie można wyróżnić bowiem kilka różnych podejść – rys. 51 [97].



Rys. 51. *Metody stosowane do wyceny zużycia ekonomicznego maszyn* [97]

Najczęściej stosuje się metodę odtworzeniową lub odtworzeniową w warunkach rynkowych [97]:

– przy metodzie odtworzeniowej korzysta się z zależności:

$$W_o = W_p (1 - Z_p) \cdot K \quad (10)$$

gdzie:

$Z_p$  – zużycie potencjału eksploatacyjnego,

$W_p$  – wartość początkowa maszyny,

$K$  – współczynnik nowoczesności konstrukcji, uwzględniający zużycie ekonomiczne (moralne) i stopień przydatności.

– przy metodzie odtworzeniowej w warunkach rynkowych do powyższego wzoru wprowadza się współczynnik rynkowy  $E$  i wtedy zależność (10) przyjmuje postać:

$$W_o = W_p (1 - Z_p) \cdot K \cdot E \quad (11)$$

Samo zużycie ekonomiczne ujmuje się przez współczynnik nowoczesności  $K$ :

$$K = 1 - \alpha(t_e - 1) \quad (12)$$

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik empiryczny (eksperycki), zawarty w przedziale od 0,01 do 0,03; z wyjątkiem urządzeń elektronicznych,

$t_e$  – liczba lat eksploatacji urządzenia.

## 5.6. Podsumowanie

Rozdział 5. obejmuje pogłębienie zagadnień związanych z trwałością i zużyciem części maszyn. Są to jedne z najistotniejszych aspektów eksploatacji urządzeń mechanicznych, które określają ich dyspozycyjność, czyli gotowość do pracy. Przeanalizowano zatem pojęcie dyspozycyjności, jako charakterystyki systemu eksploatacyjnego, i porównano je z pojęciem niezawodności. Omówiono także podstawowy wskaźnik liczbowy dyspozycyjności, jakim jest współczynnik gotowości i podano jego postać matematyczną.

Dyspozycyjność maszyny zmienia się wraz upływem czasu. Przeanalizowano zatem proces tych zmian, zarówno w wymiarze makro jak i mikro. Zmiany w skali mikro określają „historię życia urządzenia technicznego”. Przyjęto, że jest ona ciągiem stanów naszej świadomości o istotnych cechach tego urządzenia. Pojedynczy element tego ciągu opisuje termin stan techniczny obiektu. Przybliżono zatem postępowania eksploatacyjne związane z opisem tego stanu. Wyróżnia się tu: diagnozę, retrospekcję i prognozę. Omówiono także klasyfikację stanów ze względu na parametr strukturalny oraz użytkowy.

Z graniczną wartością parametrów opisujących zmianę stanu technicznego wiąże się pojęcie trwałości. Przybliżono definicję tego pojęcia i jego powiązanie z niezawodnością. Podkreślono, że pojęcie trwałości dotyczy pojedynczego (konkretnego) obiektu, a pojęcie niezawodności – zbioru tych obiektów. Oczekiwaną trwałość można zawsze zbadać, co jest konieczne ze względu na odnawianie i amortyzację. Do tego celu służą badania niezawodnościowe.

Scharakteryzowano podstawowe rodzaje zużywania, które kwantyfikują trwałość maszyn, tj.: starzenie fizyczne wynikające z technicznych procesów zużycia oraz zużywanie „moralne”, wynikające z przyczyn ekonomicznych. To pierwsze jest wynikiem głównie procesów tarcia w parach kinematycznych. Pokazano zatem przebieg zużywania technicznego przykładowej pary kinematycznej w funkcji czasu oraz przy właściwej i niewłaściwej eksploatacji.

Z punktu widzenia inżynierii eksploatacji istotne są sposoby zapobiegania nadmiernemu zużywaniu technicznemu. Zestawiono zatem je i dokonano klasyfikacji. W zakresie zużywania wynikającego z przyczyn ekonomicznych omówiono podstawowe pojęcia ekonomiczne, związane z jego charakterystyką oraz metodami stosowanymi do wyceny. Podano klasyfikacje takich metod oraz przybliżono sposób postępowania w metodach najbardziej rozpowszechnionych.

## 6. ELEMENTY DIAGNOSTYKI MASZYN

### 6.1. Diagnostyka techniczna i jej rodzaje

Współczesne maszyny to złożone układy dynamiczne zarówno pod względem funkcjonalnym, konstrukcyjnym jak i przestrzennym. Ich sprawne użytkowanie wymaga informacji dotyczących bieżącego stanu technicznego. Pozyskiwanie tych informacji jest podstawowym zadaniem diagnostyki [71].

Termin „**diagnostyka**” pochodzi z j. greckiego, gdzie *diagnosis* – oznacza *rozpoznanie, rozróżnianie, osądzanie*. Współcześnie diagnostyka to „uznana już dziedzina wiedzy, która zajmuje się rozpoznawaniem badanego stanu rzeczy przez zaliczenie go do znanego typu lub gatunku, przez przyczynowe i celowe wyjaśnienie tego stanu rzeczy, określenie jego fazy obecnej oraz przewidywanego dalszego rozwoju” [162].

Ukształtowana w obrębie nauk eksploatacyjnych diagnostyka techniczna i wynikająca z niej inżynieria diagnostyki maszyn [161], ma swoje źródła, paradygmaty i metodologię. Zagadnienia te doczekały się już szczegółowych opracowań, zwłaszcza w pracach B. Żółtowskiego [158, 159, 160, 161, 162].

Diagnostyka techniczna w ostatnich latach podlega burzliwemu rozwojowi. Nowym impulsem stymulującym rozwój tej dyscypliny było zintegrowanie wysiłków dwóch grup naukowców, których punkty startowe były znacząco od siebie różne. Jedna z tych grup, związana z diagnostyką wspartą modelowo, wywodzi się z dziedziny *automatyki i robotyki*. Druga z grup ma swoje korzenie w dziedzinie *budowa i eksploatacja maszyn* [94]. W tej dziedzinie czynnikiem bezpośrednio stymulującym rozwój diagnostyki jest odpowiedzialność realizowanej funkcji. Odpowiedzialność ta może być definiowana w trudno wymierzalnych kategoriach bezpieczeństwa ludzi lub też w kategoriach ekonomicznych wydajności i efektywności produkcji [161].

*Diagnozowanie techniczne* – jest to proces mający na celu określenie aktualnego (w momencie pomiaru) stanu technicznego urządzenia, czyli o jego sprawności lub niesprawności, stopniu zużycia podzespołów, wielkości uszkodzeń itp. Konkretyzując ten proces, są to takie działania jak [159]:

- badanie, identyfikacja i klasyfikacja rozwijających się uszkodzeń oraz ich *symptomów* (symptom to objaw – czynna cecha sygnału diagnostycznego, odwzorowująca określony typ uszkodzenia [162]),
- opracowanie metod i środków do badania i selekcji symptomów,



- wypracowanie decyzji diagnostycznych o stanie obiektu (na podstawie symptomów), i wynikających z niego możliwości wykorzystywania lub rodzaju i zakresie koniecznych czynności profilaktycznych.

Diagnostyka techniczna nie ogranicza się jednak tylko i wyłącznie do powyższych zadań. Jej cele są znacznie szersze, i dotyczą całego okresu istnienia maszyny lub innego złożonego urządzenia technicznego. Syntetycznie wyrażone cele oraz miejsce stosowania diagnostyki technicznej przedstawia rys. 52 [159].



Rys. 52. *Podstawowe cele stosowania diagnostyki maszyn i urządzeń oraz miejsce jej stosowania* [159]

Wynika stąd, że na każdym z etapów istnienia obiektu występują działania diagnostyczne o różnym charakterze, odpowiednie do zadań jakie mają być realizowane. Stąd wyróżnia się cztery rodzaje diagnostyki – rys. 53 [161].



Rys. 53. Rodzaje diagnostyki technicznej i jej zadania [161]

Diagnostyka maszyn w fazie eksploatacji określana jest jako *diagnostyka eksploatacyjna*. Maszyna wprowadzona do eksploatacji ma strukturę zdeterminowaną zbiorem cech techniczno-eksploatacyjnych, ulegających zmianom destrukcyjnym w procesie eksploatacji. Bieżące wartości tych cech charakteryzują jej stan techniczny i są przedmiotem badań diagnostyki eksploatacyjnej. Obejmuje ona następujące formy działań [162]:

- *diagnozowanie* – rozpoznanie stanu rzeczy (lokalizacja uszkodzenia),
- *dozorowanie* – bieżąca obserwacja stanu zadanej maszyny,
- *genezowanie* – poszukiwanie przyczyn zaistniałego uszkodzenia,
- *prognozowanie*, które może być wynikiem:
  - *predykcji*, czyli wnioskowania o przyszłym stanie maszyny na podstawie odpowiedniego modelu z uwzględnieniem pojawiania się w przyszłości czynników wpływających na zmianę jej stanu,
  - *projekcji*, czyli wnioskowania o przyszłym stanie maszyny na podstawie odpowiedniego modelu z uwzględnieniem znanych w przeszłości trajektorii zmian jej stanu technicznego.

Efektom opracowania procesu diagnozowania dla okresu eksploatacji są zwykle odpowiednie rozdziały w instrukcjach użytkowania i obsługi, traktujące o zasadach wykorzystania diagnostyki podczas tych faz istnienia maszyny.

## 6.2. Identyfikacja stanu jako zadanie diagnostyki

Urządzenia techniczne to obiekty złożone z wielu setek, a poprawniej byłoby jeszcze, z wielu tysięcy części. Przykładowo: samochód – to około 20 000 części, samolot – 4 000 000, rakieta Atlas – to  $18 \cdot 10^{10}$  [12]. W trakcie użytkowania tych części zachodzą w nich różne procesy zużyciowe, które zmieniają początkowe (zaprojektowane) właściwości eksploatacyjne urządzenia.

Użytkownicy powinni zatem mieć możliwość oceny wielkości tych zmian, by określić *stan techniczny urządzenia*. Pojęcie to oznacza zbiór właściwości technicznych obiektu, które opisują wszystko to, co się dzieje z obiektem w danej chwili  $t$  [75]. Stan ten jest skutkiem przeszłości urządzenia, a jego znajomość jest potrzebna do ustalenia zachowania się tego urządzenia obecnie i w przyszłości, czyli potrzeby podejmowania decyzji dotyczących dalszego postępowania z nim. Może to być decyzja o jego użytkowaniu, o podjęciu przedsięwzięć profilaktycznych (regulacji, wymianie części lub całych zespołów), względnie też wprowadzeniu zmian w konstrukcji, bądź eksploatacji.

Stan techniczny urządzenia zmienia się nieustannie, co oznacza, że można wyróżnić nieskończenie wiele jego stanów [75]. W praktyce nie ma potrzeby określania tych wszystkich stanów. W najprostszym przypadku celem badania może być rozróżnianie dwóch alternatywnych klas stanów: „zdatności” i „niezdatności” [12]:

- ❖ *stan zdatności* wystąpi jeżeli urządzenie poprawnie wykonuje postawione zadania,
- ❖ *stan niezdatności* będzie kiedy takich zadań nie może wykonać.

Klasy te są odpowiednikiem dwóch zdarzeń: „sprawności” i „niesprawności” (należy tu zaznaczyć, że pojęcia: sprawny i niesprawny opisują konkretne zdarzenia, a zdatny i niezdatny określają stany wynikające ze sprawności).

W teorii i praktyce eksploatacji (zwłaszcza pojazdów samochodowych) występuje też podział na trzy stany [46]:

- *zdatności* – samochód jest w pełni sprawny,
- *częściowej zdatności* (stan dopuszczalny chwilowo, np. funkcjonowanie 2 z 3 cylindrów silnika),
- *niezdatności* (stan niedopuszczalny, np. jazda bez smarowania silnika).

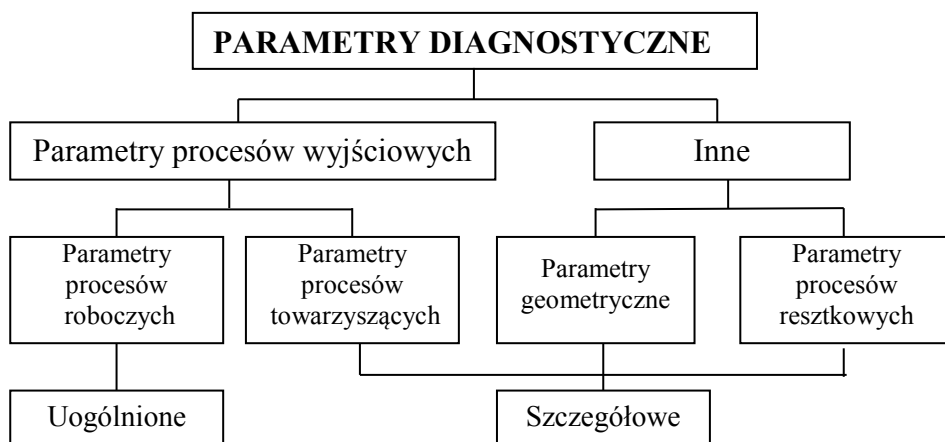
Rozpoznanie tych stanów jest zatem sprawą szczególnie ważną z utilitarnego punktu widzenia. Specyfiką diagnostyki eksploatacyjnej jest jednak to, że nie może ona dokonywać bezpośrednio pomiarów stanu jakiejś części, np. odchyień wymiarów. Gdy maszyna jest już zmontowana nie można też dokony-

wać pomiaru: luzów, naprężenia sprężyn itp. Możliwe jest zidentyfikowanie tego drogą pośrednią poprzez badanie „całościowe” urządzenia (maszyny). Procedura postępowania diagnostycznego jest następująca [161]:

- a) *w przypadku maszyny zdatnej*: badanie stanu – wykonanie niezbędnie koniecznych zabiegów obsługowych – prognozowanie stanu – ustalenie terminu następnego badania;
- b) *w przypadku maszyny niezdatnej*: ustalenie przyczyn niezdatności (rozregulowanie, uszkodzenie, wykonana praca do naprawy głównej lub likwidacji) usunięcie uszkodzenia – ocena jakości wykonanej naprawy – wykonanie niezbędnych czynności obsługowych – prognozowanie – ustalenie terminu następnego badania.

Jak wcześniej nadmieniono, spośród cech charakteryzujących urządzenie i jego stan wyróżnia się czasem takie, które występują tylko w czasie, gdy obiekt jest uszkodzony. Cechy te nazywa się *symptomami*. Występowanie tych cech nie jest wynikiem świadomych działań konstruktora, lecz związane jest z naruszeniem zasad pracy urządzenia, przekroczeniem dopuszczalnych granic obciążalności, wytrzymałości itp. Symptomami uszkodzenia są np.: wzrost temperatury przewodów zasilających, nadmierne drgania silnika, zmiana barwy rezystora.

Cechy, które wyznaczają stan zdatności nazywane są *parametrami*. Wartości liczbowe tych cech, zwykle dotyczących podstawowych właściwości urządzenia umieszczane są w dokumentacji technicznej pozwalają na identyfikację urządzenia, jak i jego stanu [161]. Wśród parametrów diagnostycznych wyróżnia się – rys. 54 [163].

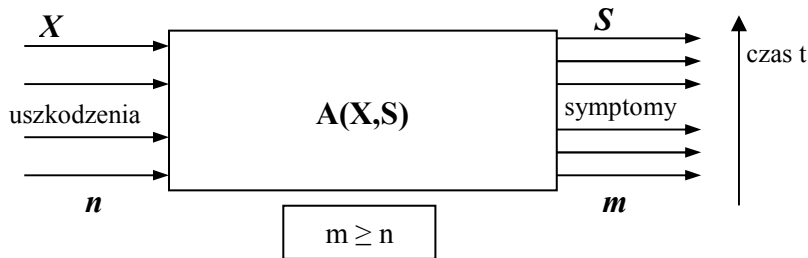


Rys. 54. *Klasyfikacja parametrów diagnostycznych* [163]

Parametry diagnostyczne można pozyskiwać z trzech różnych ocen:

- *ocena przez obserwacje procesów roboczych*, monitorując ich parametry w sposób ciągły (moc, moment, prędkość, ciśnienie);
- *ocena przez badanie jakości wytworów* – zgodności wymiarów, pasowań, połączeń itp. Wychodzi się tu z założenia, że im lepszy stan techniczny maszyny, tym lepsza jakość produkcji;
- *ocena przez badanie procesów towarzyszących* – wykorzystująca różne symptomy fizykochemiczne, zawarte w procesach wyjściowych z funkcjonującej maszyny (drżania, hałas, emisja akustyczna itp.) i będąca źródłem wielu metod diagnozowania, np.: wibroakustyka, termowizja itp.

Ogólne postępowanie diagnostyki eksploatacyjnej, zakładające poszukiwania związków między stanem maszyny  $X_n$  a generowanymi sygnałami diagnostycznymi, rozpoznawanymi w postaci symptomów  $S_m$ , można przedstawić, w uproszczeniu, na schemacie „czarnej skrzynki” – rys. 55 [161].



Rys. 55. *Obserwacja stanu maszyny X za pomocą symptomów S* [161]

Stan maszyny w określonej chwili czasu można zatem scharakteryzować za pomocą zbioru wartości symptomów ( $S_m$ ). W wielu przypadkach jest tak, że o jednym uszkodzeniu może informować wiele symptomów, np. o uszkodzeniu łożyska może świadczyć zwiększone nagrzanie się obudowy, drżania, itp. Jest to dosyć ważne, bowiem rozwiązanie zadania diagnostycznego wymaga spełnienia warunku:  $m \geq n$ , czyli aby symptomów było więcej niż uszkodzeń [161].

Zbiór symptomów  $S$ , po odpowiednim przetworzeniu, zostaje przedstawiony w postaci miar wartości lub przebiegów (intensywności) mierzonych wielkości. Na podstawie tych miar operator  $A$  sporządza informację diagnostyczną, która prezentuje sądy lub twierdzenia o stanie  $X$  maszyny. Na ogół nie dotyczy one całej maszyny, ale zwykle tylko jej określonego układu (zespołu); cała maszyna nie psuje się, tylko jej określony zespół i ten jest diagnozowany.

### 6.3. Procedury diagnozowania maszyn i urządzeń

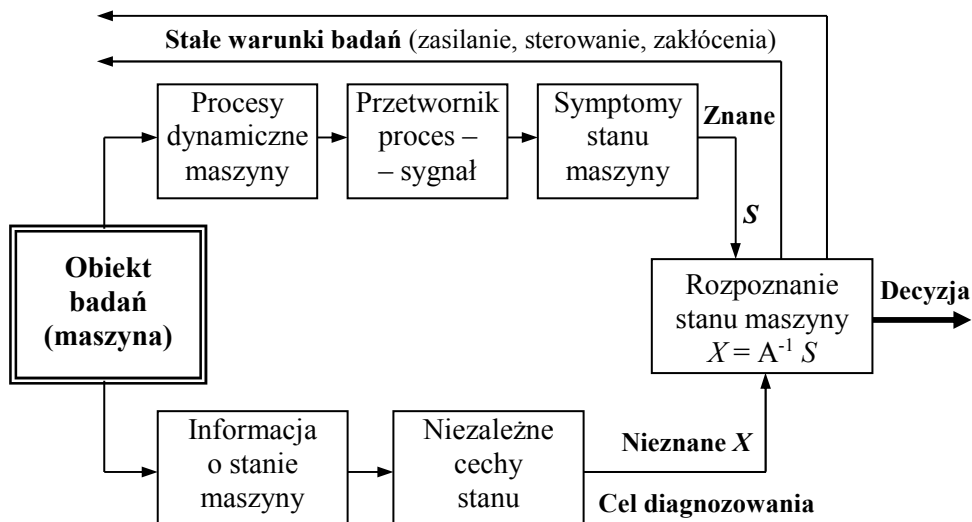
Stan techniczny można ocenić na podstawie mierzonych wartości parametrów diagnostycznych, pod warunkiem, że znane są związki pomiędzy parametrami struktury lub rozróżnianymi stanami i parametrami diagnostycznymi. Charakter tych zależności, i zawarte w nich informacje, wyznaczają procedurę postępowania podczas diagnozy [160].

Procedura (za normą terminologiczną ISO 9000) to określone reguły postępowania w odniesieniu do działań lub procesów, czyli jest to swoistego rodzaju przepis: *co?*, *kto?* i *jak?* ma robić w ramach czynności objętych procedurą.

Procedura diagnostyczna obejmuje 3 główne czynności:

- 1) odebranie sygnału emitowanego przez maszynę,
- 2) wydzielenie w nim cech charakterystycznych,
- 3) porównanie ich z cechami sygnałów odpowiadających możliwym stanom maszyny rozróżnianym podczas badania.

Procedurę diagnostyczną w odniesieniu do maszyn można przedstawić w postaci schematu obrazującego elementy postępowania badawczego – rys. 56 [161].

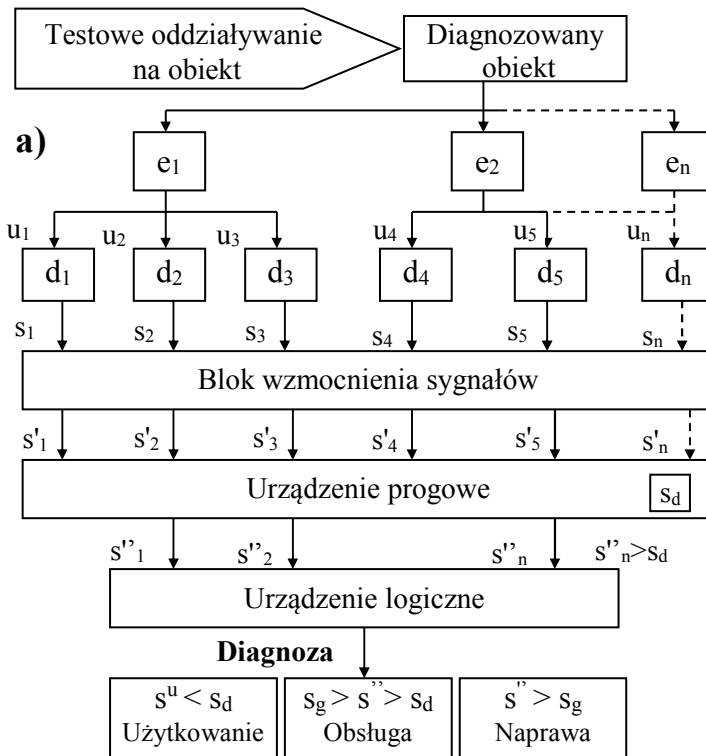


Rys. 56. *Elementy procedury diagnostycznej* [161]

Do diagnozowania ogólnego najbardziej przydatne są parametry procesów wyjściowych (moment obrotowy, moment tarcia, moc efektywna, zużycie paliwa, ciśnienie czynnika roboczego itp.). Opisują one podstawowe, funkcjonalne

właściwości obiektów technicznych i zawierają uogólnioną informację o ich stanie. Dlatego też są wykorzystywane przede wszystkim do oceny stanu technicznego maszyny w całości. Inne parametry niosą bardziej szczegółową informację (np. temperatura łożyska świadczy tylko o funkcjonowaniu głównie tego łożyska), stąd też wykorzystywane są do oceny zespołów lub podzespołów.

W przypadku określania stanu technicznego prostego zespołu, sformułowanie diagnozy polega na porównaniu zmierzonej wartości jednego lub kilku parametrów diagnostycznych z ustalonymi wartościami dopuszczalnymi bądź granicznymi. Natomiast w procesie diagnozowania całego obiektu (maszyny) z reguły wykorzystuje się znaczną liczbę parametrów diagnostycznych. W tym zakresie stosuje się 2 metody: syntezy (rys. 57) lub analizy (rys. 58) [163].

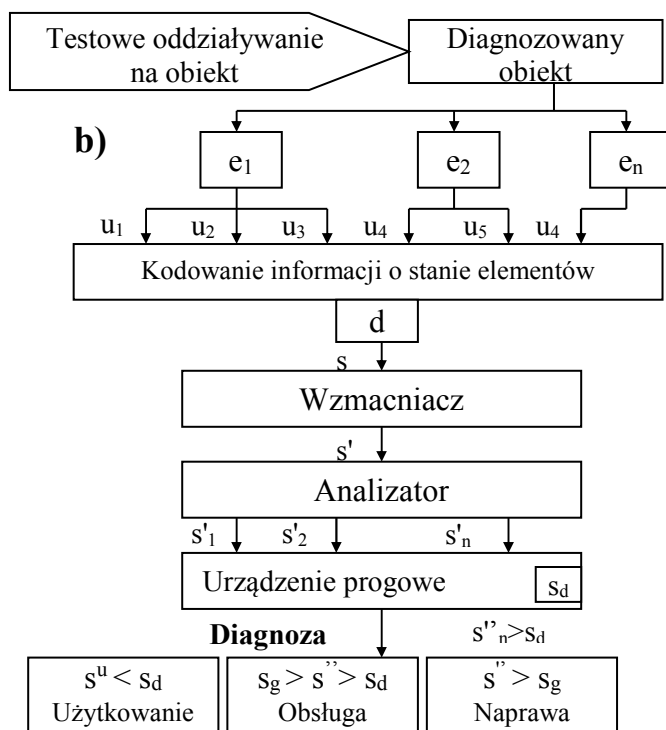


Rys. 57. Procedura diagnozowania stanu technicznego obiektu metodą syntezy [163]

W metodzie syntezy przetworniki  $d_1, d_2, \dots, d_n$  rejestrują sygnały o stanie  $u_1, u_2, \dots, u_n$ , każdego elementu  $e_1, e_2, \dots, e_n$ . Rejestrowane wielkości  $s_1, s_2, \dots, s_n$  (z reguły przetransformowane na sygnały elektryczne), po wzmoc-

nieniu do wartości  $s'_1, s'_2, \dots, s'_n$ , kierowane do urządzenia progowego. Przepuszcza ono tylko te sygnały, których wartości przekroczyły wartości dopuszczalne  $s_d$ . Dalej sygnały  $s'_1, s'_2, \dots, s'_n$  docierają do urządzenia logicznego, w którym następuje synteza informacji od szeregu czujników i postawienie diagnozy. Diagnozowanie tą metodą wymaga stosowania znacznej liczby czujników oraz urządzeń dodatkowych, co utrudnia normowanie i nie zapewnia wystarczającej dokładności z powodu dużej różnorodności wykorzystywanych parametrów diagnostycznych oraz wydłuża czas pomiaru.

Diagnozowanie *metodą analizy* (rys. 58) różni się od poprzedniej metody tym, że sygnały charakteryzujące parametry struktury  $u_1, u_2, \dots, u_n$  grupy elementów obiektu rejestruje się za pomocą jednego przetwornika  $d$  (np. czujnika piezoelektrycznego). Po wzmocnieniu sygnał  $s'$ , zawierający ogólną informację o stanie technicznym obiektu, jest kierowany do analizatora, w którym zostają wydzielone najbardziej charakterystyczne, użyteczne, jego składowe. Następnie składowe sygnały docierają do urządzenia progowego, w którym porównywane są ich wartości z wartościami dopuszczalnymi, co w konsekwencji prowadzi do postawienia właściwej diagnozy



Rys. 58. *Procedura diagnozowania stanu technicznego metodą analizy* [163]



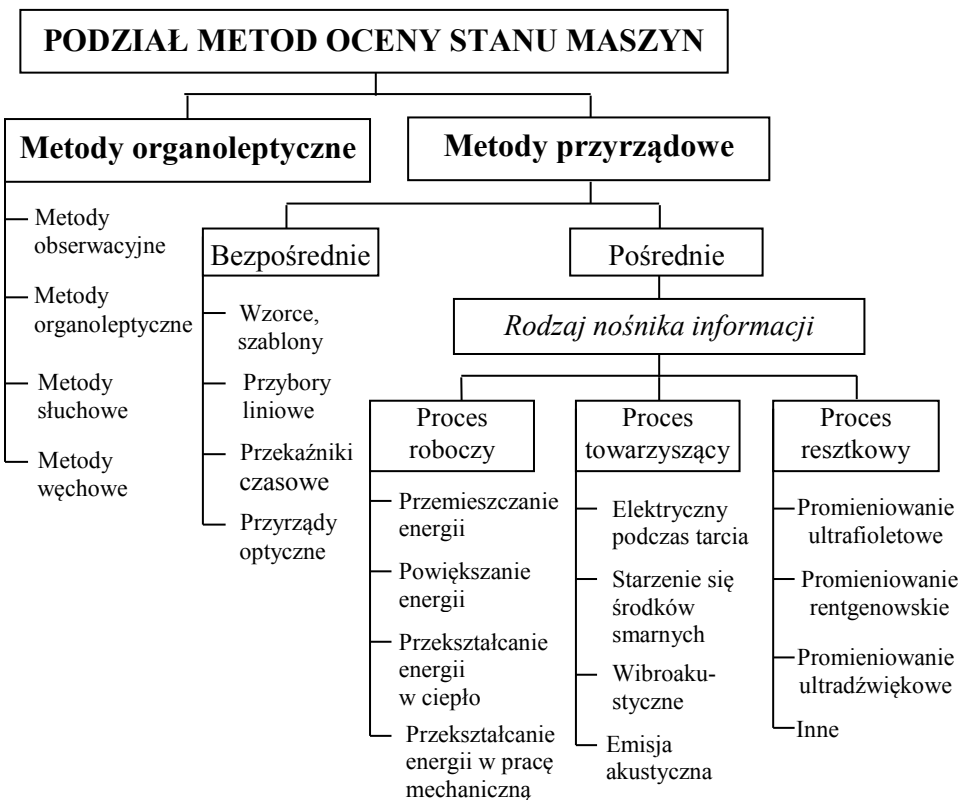
## 6.4. Metody diagnozowania maszyn i urządzeń

Przy wyborze jednej z wymienionych metod należy uwzględniać charakterystyczne właściwości obiektu, jak również cel diagnozowania. Obie metody są wykorzystywane od oceny stanu technicznego złożonych obiektów technicznych, jakimi są maszyny, przy czym czasem zachodzi konieczność zastosowania ich kombinacji; jest to wówczas *metoda mieszana (syntetyczno-analityczna)*.

U podstaw dalszego podziału metod diagnozowania leżą trzy kryteria [160]:

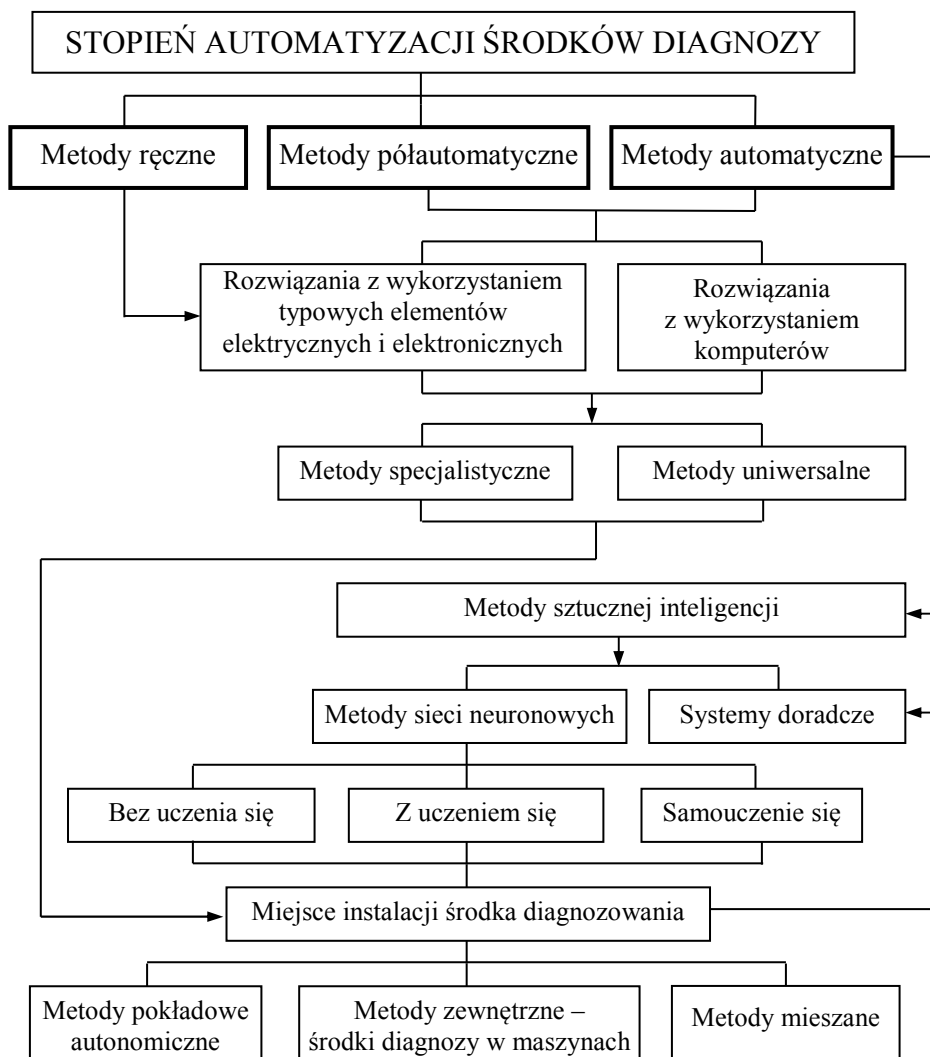
- stopień subiektywizmu badań diagnostycznych,
- rodzaj modelu diagnostycznego,
- stopień automatyzacji.

Podział metod diagnozowania maszyn ze względu na stopień subiektywizmu badań (większego lub mniejszego udziału człowieka) obrazuje rys. 59 [160].



Rys. 59. Podział metod diagnozowania według stopnia subiektywizmu badań [160]

*Metody organoleptyczne*, nazywane też sensorycznymi, to metody oceny za pomocą narządów zmysłu, tj. wzroku, smaku, węchu lub dotyku. Pozwalają szybko i kompleksowo ocenić stan badanej maszyny, ale mało dokładnie. Stąd też współczesna diagnostyka dąży do zastąpienia ich metodami wykorzystującymi różnego rodzaju przyrządy. Trendem w tym zakresie jest stosowanie badań nieniszczących [105]. Przyjmując stopień automatyzacji jako kryterium podziału, wyróżnia się metody przedstawione na rys. 60 [159].



Rys. 60. Podział metod diagnozowania maszyn wg kryterium automatyzacji [159]

*Diagnozowanie przyrządowe* – to najczęściej diagnozowanie pośrednie, które daje się ująć w trzy grupy:

- diagnostyka przez obserwacje procesów roboczych, polegająca na monitorowaniu jej parametrów w sposób ciągły lub prowadzeniu badań sprawnościowych (moc, moment, prędkość, ciśnienie, itp.) na specjalnych stanowiskach,
- badania jakości wyrobów produkowanych na tej maszynie,
- obserwacja procesów towarzyszących, np. drgań, hałasu, ciepła itp.

Biorąc natomiast pod uwagę rodzaj stosowanego modelu, wydziela się [141]:

- *metody diagnostyczne zdeterminowane* – są to metody oparte na modelach wykorzystujących jednoznacznie określony związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy parametrami stanu i wielkością sygnałów diagnostycznych,
- *metody diagnostyczne niezdedeterminowane* – podstawą tego rodzaju metod, określanych też jako probabilistyczne [85], uwzględniających zasady nieoznaczoności, nieliniowości, losowości i teorii chaosu, jest losowy charakter wymuszeń i odpowiedzi, co prowadzi do poszukiwania związków przyczynowo-skutkowych w kategoriach prawdopodobieństw.

*W ręcznych metodach diagnozowania* maszyn kolejność i jakość wykonywanych sprawdzeń zależy bezpośrednio od użytkownika. Badanie i ocena stanu maszyny trwa długo i jest mało efektywna.

*Metody półautomatyczne* charakteryzują się mniejszym udziałem człowieka w procesie diagnozowania, chociaż nie wykluczają go z tego procesu, szczególnie w zakresie sterowania i wnioskowania diagnostycznego.

Współcześnie nowe techniki pomiarowe i sposoby realizacji urządzeń diagnostycznych w technice mikroprocesorowej pozwoliły na szybki rozwój urządzeń sterująco-diagnostycznych, coraz częściej zabudowywanych bezpośrednio w maszynach (diagnostyka pokładowa).

Automatyzacja badań diagnostycznych i wspomaganie ich techniką komputerową jest coraz powszechniejsza. Powoduje bowiem m.in. [161]:

- zwiększenie wiarygodności i pewności uzyskiwanych wyników,
- skrócenie czasu realizacji i kosztów badań,
- zmniejszenie wymagań co do liczebności i kwalifikacji diagnostów.

Metody jak i urządzenia diagnostyczne projektuje się na etapie konstruowania maszyn, gdzie równolegle z powstającą koncepcją rozwiązań funkcjonalnych można zaplanować strukturę kontrolno-pomiarową [159].

## 6.5. Kontrola stanu wg modelu diagnostycznego

Współczesne systemy diagnostyczne są coraz bardziej niezawodne, proste w obsłudze, a co ważniejsze, dokładne, m.in. z tego powodu, że u ich podstawy leży dobrze rozpoznany model zjawiska oraz algorytm kontroli stanu.

*Modelowanie* stanowi pierwszy etap formalnego ujęcia zagadnień, związanych z analizą działania oraz syntezą diagnozowania. Pozwala ona z określonym przybliżeniem odtworzyć zasady organizacji i funkcjonowania obiektu, co dalej umożliwi uzyskanie informacji o samym modelowanym obiekcie [159].

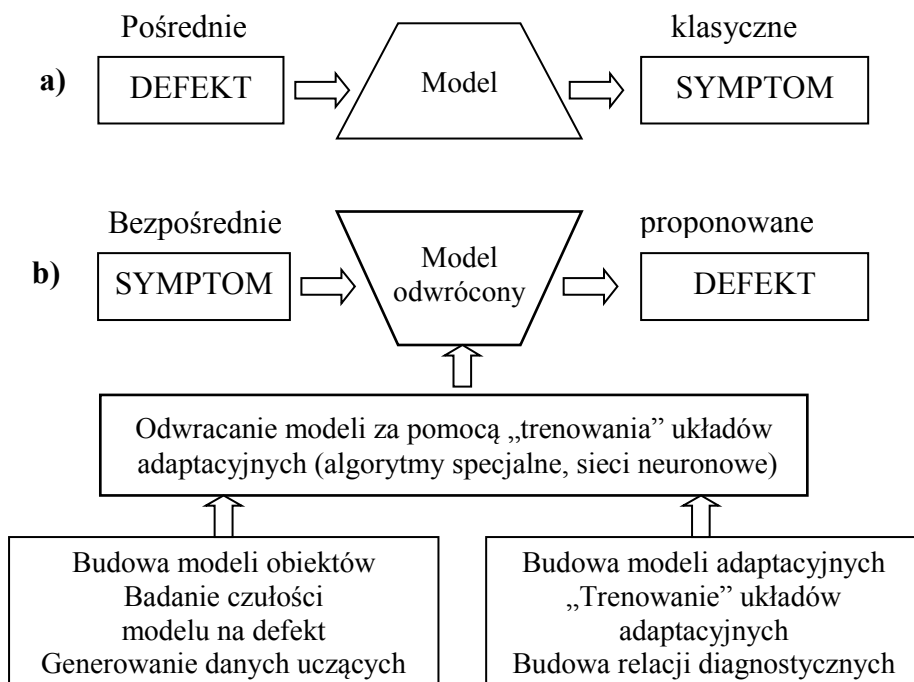
*Kontrolę stanu* prowadzi się w celu ustalenia, w jakim z możliwych (różnych) stanów znajduje się obiekt w chwili kontroli. Prostym przykładem jest tu kontrolka rezerwy paliwa w samochodzie. Lampka kontrolki zapala się wówczas, jeżeli pojazd, pod względem tego podstawowego zasobu, znajduje się w sferze zagrażającej jego użytkowaniu. Według modelu ustalone jest np., że po jej zapaleniu się mamy jeszcze (teoretycznie) zapas paliwa na około 100 km. Pojazd jest zdolny do użytkowania, ale znajduje się w stanie ograniczonej zdatności. Stany ograniczonej zdatności wyznacza się przy założeniu, że obiekt, mimo utraty swojego potencjału użytkowego może być dalej użytkowany według decyzji użytkownika.

Diagnostyka eksploatacyjna w ocenie stanu technicznego korzysta głównie z metod nieinwazyjnych, takich jak magnetyczne, radiograficzne, termowizyjne, a przede wszystkim wibroakustyczne [160].

*Kontrola funkcjonowania* prowadzona jest z wykorzystaniem modelu niezawodnościowego i jej celem jest ocena funkcjonalnego stanu niezawodnościowego obiektu, z zadaniem wydania orzeczenia o zdatności obiektu do realizacji danych zadań (zdalny – niezdalny). Nie musi natomiast ona umożliwiać identyfikowalności rzeczywistego stanu fizycznego (*na ile jest zdalny?*), co jest zadaniem kontroli stanu [159]. Kontrola stanu różni się od kontroli funkcjonowania głównie tym, że stosuje się w niej metody badania umożliwiające uzyskanie ilościowych wyników pomiarów.

Rozważając głębiej to zagadnienie (po przyjęciu tych założeń formalnych), możemy powiedzieć, że stan maszyny określony jest zbiorem właściwości, względnie parametrów diagnostycznych, istotnych dla jednoznacznego opisanie tego stanu w danym momencie czasu. Ogólnie można to zapisać w postaci:  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ . Parametry te tworzą zbiór liczb rzeczywistych, które mogą być traktowane jako baza określonego obszaru, w którym każdy punkt jest





Rys. 62. *Techniki pozyskiwania symulacyjnych relacji diagnostycznych* [160]:  
 a) klasyczne, b) metodą odwrócenia modelu

Przy budowaniu modeli diagnostycznych należy jednak przede wszystkim mieć na uwadze, że maszynę traktuje się jako obiekt dynamiczny, którego parametry charakterystyczne zmieniają się w czasie. Stąd przy opisie pojęcia „stan maszyny” należy uwzględnić trzy sytuacje [141]:

- gdy znany jest stan początkowy maszyny w chwili  $t$  [ $x(t_0)$ ] i podany będzie sygnał wejściowy  $u(t_0, t)$ , określony w przedziałach  $(t_0, t)$ , to dla wyznaczenia  $y(t)$  lub  $x(t)$  wystarczy znać  $x_0(t_0)$  i  $u(t_0, t)$ ,
- przestrzeń stanu posiada dostateczną liczbę elementów, aby każdej parze wielkości, charakteryzujących wejście i wyjście, wprowadzić odpowiedni stan początkowy  $x(t_0)$ ,
- nieznaczne zmiany sygnału wejściowego powodują nieznaczne zmiany sygnału wyjściowego.

Sytuacje te pozwalają na postawienie dwóch wniosków ogólnych [161]:

- Stan maszyny w danej chwili czasu  $t$  przedstawia sobą sumę informacji o jej przeszłych stanach.
- Błąd wielkości sygnału wejściowego nie ma wpływu na stan maszyny w danym momencie czasu.

## 6.6. Podsumowanie

Rozdział 6. obejmuje zagadnienia związane z diagnostyką maszyn. Jest to zagadnienie niezwykle obszerne, np. „Inżynieria diagnostyki maszyn” autorstwa B. Żółtowskiego i Cz. Cempela liczy ponad 1100 stron druku. Stąd też zwrócono w nim uwagę na niektóre, wybrane, elementy z zakresu badania stanów maszyn. Omówiono zatem pojęcie diagnostyki technicznej i jej rodzaje, szczególną uwagę zwracając na diagnostykę eksploatacyjną.

Podkreślono, że konieczność badania stanu technicznego maszyny wynika z potrzeby podejmowania właściwych decyzji eksploatacyjnych, zgodnie z ideą, że „*to jest sterowalne – co jest mierzalne*”. Pozyskiwanie informacji o stanie maszyny jest domeną diagnostyki technicznej. Zdefiniowano jej pojęcie, podano rodzaje oraz cele poszczególnych rodzajów diagnostyki, zwracając szczególną uwagę na specyfikę diagnostyki eksploatacyjnej.

Omówiono procedurę diagnozowania maszyn i urządzeń, zwracając szczególną uwagę na rodzaj parametrów diagnostycznych i ich przydatność do diagnozowania. Opisano metody postępowania diagnostycznego określane jako: *metoda syntezy* oraz *metoda analizy*. Podano, że istotnym elementem różnicowania procedur postępowania z wykorzystaniem tych metod jest to, że w metodzie analizy sygnały charakteryzujące parametry diagnostyczne rejestruje się za pomocą jednego zbiorczego przetwornika (najczęściej czujnika piezoelektrycznego), a diagnozowanie metodą syntezy wymaga stosowania znacznej liczby czujników oraz urządzeń dodatkowych dopiętych do badanych elementów. Utrudnia to badanie i powoduje wzrost kosztów badań.

Przybliżono także nazwy innych metod diagnozowania technicznego i ich klasyfikację ze względu na różne kryteria, w tym zwłaszcza na stopień subiektywizmu badań oraz kryterium automatyzacji. Opisano dokładniej diagnozowanie przyrządowe z uwzględnieniem szczególnie stopnia automatyzacji badań.

Wychodząc z założenia, że współczesne systemy diagnostyczne w coraz większym stopniu bazują na opracowanym modelu badanego zjawiska, przybliżono bardziej szczegółowo ten rodzaj diagnozowania. Zwrócono uwagę na podstawowy problem tego podejścia (diagnostyki według modelu), jakim jest niejednoznaczność związków defekt-symptom. Podkreślono jednak, że dynamiczny rozwój systemów komputerowych i oprogramowania pozwala minimalizować ten problem. Szczególnie przydatne są tu badania symulacyjne, oparte na metodzie odwracanych modeli. Krótco zatem scharakteryzowano ten sposób postępowania przy pozyskiwaniu wiedzy diagnostycznej.

# 7. PODSTAWY BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

## 7.1. Źródła wiedzy eksploatacyjnej

Żeby „coś” sprawnie działało, musi być pod każdym względem bez zarzutu, również w zakresie wiedzy o tym „czymś”. W ogólnym ujęciu wiedza to „ogół tego, co dany człowiek wie”. *Wiedza eksploatacyjna* dotyczy obiektów (maszyn i ich zespołów), ustalania klasyfikacji tych obiektów oraz ich właściwości i stanów. Obejmuje także umiejętności, rozumienie praw ogólnych i procedury postępowania [94]. Wiedza jest nabywana poprzez uczenie się w systemach skodyfikowanych (szkoła) lub przez doświadczenie własne. Należy tu jednak wskazać na istotną różnicę pomiędzy rodzajami wiedzy, bowiem:

- *wiedza szkolna (akademicka)* – to wiedza dziedzinowa, która polega na przetwarzaniu tego, co powiedzieli inni,
- *wiedza użytkowa* – to wiedza proceduralna (wielodyscyplinarna) i dotyczy rozwiązywania problemów wynikających z realizacji określonych celów.

Wiedza szkolna na ogół ma niską przydatność. Wynika to bądź z braku określonych informacji, bądź też ich małej wartości poznawczej i procesowej [36].

Wiedza jest pojęciem związanym z danymi i informacją. Zazwyczaj terminem „*informacja*” określa się wiadomość o czymś, zakomunikowanie czegoś, pouczenie. Każda wyemitowana wiadomość to komunikat zawierający pewną liczbę bitów informacji. Proces przekazywania, przekształcania, przyjmowania i przechowywania informacji zachodzi pod postacią znaków i symboli [70]. Użytkowanie maszyny (oprócz wielu innych aspektów) można traktować jako proces produkcji informacji [94]. Informacja może istnieć niezależnie od tego, czy ją ktoś weźmie (odkryje w postaci danych), czy też nie.

Podstawą informacji są odpowiednie dane. Nie ma jednak wątpliwości, że z tych samych danych, w zależności od sposobu interpretacji, można wyprowadzić różne, nieraz krańcowo odmienne informacje. Stąd też niesłuszne jest zamienne stosowanie terminów „wiedza” i „informacja”, bowiem jak pisze G. Bellinger (wg Cz. Cempela [19]):

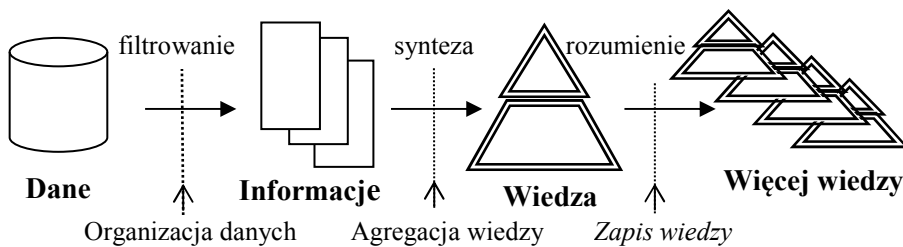
- *zbiór danych to nie informacja,*
- *zbiór informacji to nie wiedza,*
- *zbiór wiedzy nie stanowi mądrości,*
- *zbiór mądrości nie daje prawdy.*



Dane, to są fakty wyrażone są za pomocą liczb i symboli. Fakty samodzielnie nie mają znaczenia. Nabierają go dopiero przez ich łączenie, agregację, filtrowanie itp. Wiedza to „*przetworzenie faktów oraz umiejętność ich wykorzystania*” [70]. Informacja z wiedzą wchodzi więc w skomplikowane i niejednoznaczne relacje. Fakty przeistaczają się w informacje tylko wtedy, gdy zwrócimy na nie uwagę, i tylko wtedy informacja nabiera cech wartościujących – może być użyteczna, bądź nie [94]. Zgodnie z powiedzeniem H. Poincaré [154]:

„*Wiedzę buduje się z faktów, jak dom z kamienia; ale  
zbiór faktów nie jest wiedzą, jak stos kamieni nie jest domem*”.

Odpowiednia synteza różnych informacji prowadzi do wiedzy, a ta dalej do mądrości. Określa się ją jako umiejętność praktycznego wykorzystania posiadanej wiedzy. Mądrość i wiedza zarezerwowane są tylko dla ludzi, natomiast informacja zawiera się w dokumentach, procedurach, procesach, praktykach i normach. Twórczą transformację informacji w wiedzę definiuje się jako cykl tworzenia wiedzy – rys. 63 [19].

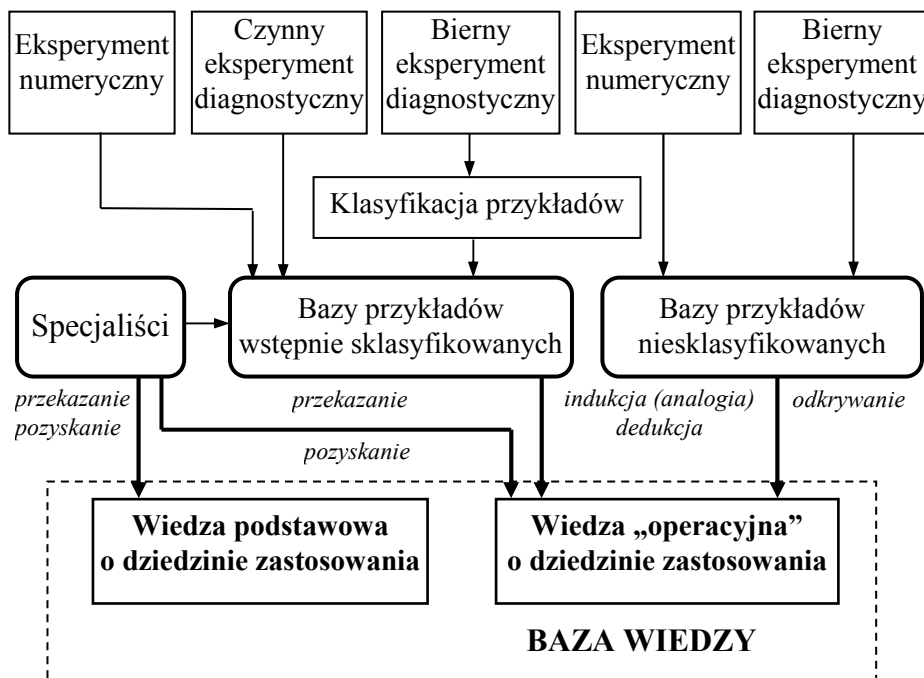


Rys. 63. *Graficzna ilustracja cyklu tworzenia wiedzy* [19]

Dane mogą być pozyskiwane z różnych źródeł; od użytkownika, z pracy samej maszyny, z jej dokumentacji, procesu wytwarzania, bądź specjalnie zaprogramowanych badań. Dane zamieniane są w informacje przez specjalistów (znawców danej tematyki). Jest to tzw. *wiedza „ukryta”*, bowiem rodzi się i istnieje w umysłach ludzi. Ten rodzaj wiedzy jest wysoce indywidualny i trudny do sformalizowania, co sprawia, że bardzo trudno ją przekazywać czy komunikować innym. Treścią tej wiedzy jest subiektywny wgląd, intuicja i przeczucia oraz idee, wartości, uczucia, wyobrażenia i symbole. Gromadzi się ona w każdym człowieku w wyniku jego doświadczeń [94].

Wiedza ludzka tworzy się i rozbudowuje poprzez interakcje między wiedzą ukrytą i jawną. *Wiedza „jawna”* (zawarta np. w bazach danych, procedurach, normach, zaleceniach, itp.) jest formalna i uporządkowana. Może być wyrażona w słowach i liczbach, jest łatwo komunikowana i upowszechniana, łatwo ją zapisać i wyrazić w liczbach czy zbiorze reguł. Jest to wiedza pragmatyczna.

Zbiór źródeł pozyskiwania wiedzy „ukrytej” przedstawiono na rys. 64 [94].



Rys. 64. Źródła wiedzy ukrytej [94]

Wiedza ukryta nie jest odpowiednia dla potrzeb eksploatacyjnych. Dopiero bowiem umiejętność jej przekształcenia w wiedzę jawną (operacyjną) tworzy kompetencje wykonawcze (operatywność). W tym celu należy kontekstowo powiązać uzyskiwane informacje z celami, do których jest ona zbierana. Powstaje wtedy wiedza praktyczna, która daje odpowiedzi na pytania:

- *wiem co? (mam robić)* – znajomość celu wykonywania określonej czynności,
- *wiem jak? (to robić)* – umiejętności wykonywania tej czynności,
- *wiem dlaczego? (to mam robić)* – oczekiwany efekt z wykonania tej czynności.

Należy jednak zwrócić uwagę, że wiedza jawna jest dziś coraz częściej zastępowana przez systemy informatyczne. Obserwuje się formalizację i automatyzację jej funkcji informacyjnych. Staje się ona przez to mniej wartościowa, a często nawet zbędna. Przykładem może być samochód prowadzony po określonej trasie według systemu GPS (*Global Positioning System*) [132].

## 7.2. Planowanie badań eksploatacyjnych

Do określenia czynności (przedsięwzięć) ukierunkowanych na pozyskiwanie informacji używa się różnych pojęć i terminów. Najczęściej mówi się o badaniach, ale występują także: pomiary, doświadczenia i eksperymenty [55]:

- *pomiar* jest pojęciem najbardziej podstawowym. Rozumie się go jako czynność polegającą na dokonaniu ilościowej oceny pewnej wielkości, najczęściej przez porównanie z wzorcem, np. określonym przez jednostkę miary danej wielkości,
- *doświadczenie* obejmuje pewną liczbę pomiarów różnych wielkości, związanych z celem doświadczenia,
- *eksperyment* jest określeniem serii doświadczeń, których rezultatem jest wyznaczenie modelu (opisanego najczęściej równaniem matematycznym). Z uwagi na to, ważnym zagadnieniem staje się teoria planowania eksperymentu, która pozwala zoptymalizować badania, wyznaczyć model matematyczny oraz zminimalizować liczbę pomiarów.

Całość przedsięwzięcia, w którym dla zdefiniowanego obiektu i celu badań przeprowadza się eksperyment, a uzyskane wyniki poddaje się odpowiedniej analizie w celu sformułowania wniosków, nazywa się zadaniem badawczym, w skrócie określanym jako „*badanie*” [55].

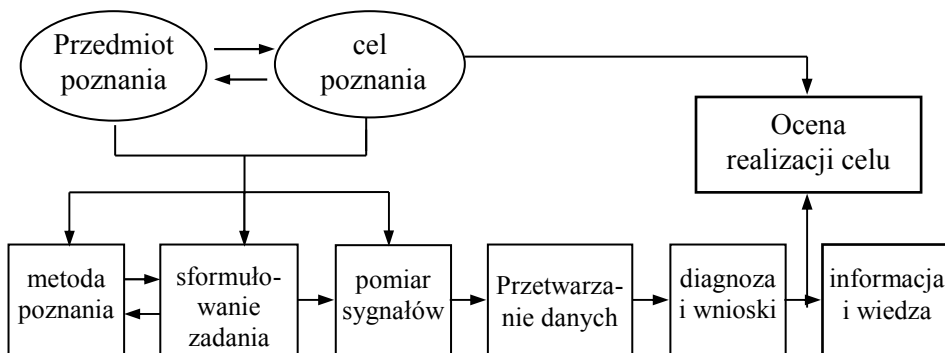
Pod pojęciem „*badania eksploatacyjne*” (field test) najczęściej rozumie się badania zgodności lub badania określające, prowadzone w naturalnych warunkach użytkowania badanego obiektu (bądź też w warunkach, które zostały w sposób celowy zmienione, np. w celu przyspieszenia oddziaływania na dany obiekt czynników warunkujących przebieg badanych procesów) z rejestrowaniem wszystkich występujących w trakcie badań warunków i zdarzeń [55].

Postępowanie badawcze (metodykę badań) określa się pojęciem *teoria eksperymentu*. Obejmuje ona zespoloną w całość trzy elementy – rys. 65 [160].



Rys. 65. Schemat struktury teorii eksperymentu [160]

Teoria eksperymentu umożliwia na początku określenie celu i metod analizy wyników pomiarów, a następnie przyjęcie odpowiedniego planu eksperymentu i realizacji pomiarów. Dobrze zaplanowany eksperyment jest podstawowym źródłem informacji o obiekcie badań. Obserwacje działań poznawczych wykonywanych podczas badań, pozwalają wyodrębnić pewne typowe elementy postępowania. Elementy te, po odpowiednim pogrupowaniu i uszeregowaniu, można przedstawić w postaci ogólnej procedury postępowania badawczego. Schemat blokowy algorytmu tej procedury przedstawiono na rys. 66 [71].



Rys. 66. *Algorytm procedury badań eksploatacyjnych* [71]

Termin „algorytm” w odniesieniu do przedstawionego schematu postępowania poznawczego należy traktować umownie, przedstawia on bowiem zapis pewnej ogólnej postaci modelu operacyjno-informacyjnego, który został nakreślony na poziomie metodologii i metodyki badań diagnostycznych [71]. W zależności od celu i przedmiotu poznania poszczególne bloki prezentowanego algorytmu powinny zostać wypełnione odpowiednią treścią.

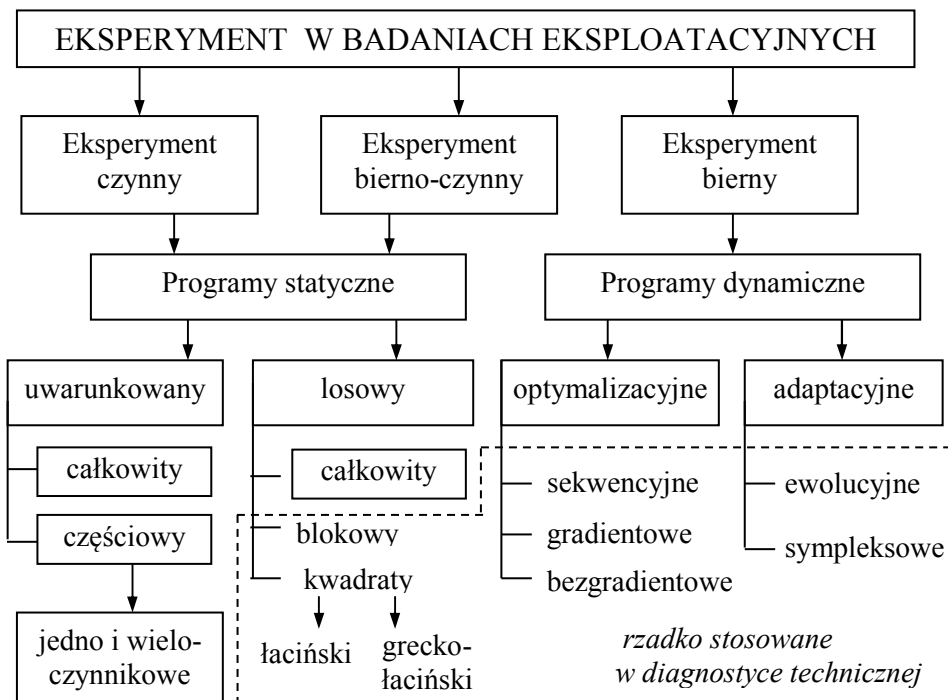
Ogólnie biorąc dobrze zaprojektowany plan badań, prowadzący do rozwiązywania problemów badań eksploatacyjnych, obejmuje [159]:

- *charakterystykę obiektu badań*; opracowując ją należy ustalić stan wiedzy, czyli określić problem badawczy (brak problemu jest równoznaczny z brakiem potrzeby badań!), określić zbiory wielkości wejściowych, wyjściowych i zakłóceń oraz określić relacje między wielkościami, które należy rozpoznać w wyniku badań doświadczalnych,
- *cel badań*; dobrze określony cel stanowi podstawę powodzenia i najczęściej dotyczy jednej z możliwości: wyznaczenia funkcji modelu, wyznaczenia stanu granicznego symptomów lub granic dla klasyfikacji zdatności i niezdatności, bądź też weryfikacji istotności wpływu wielkości wejściowych na wyjściowe,

- *metodę badań*; dotyczy to: wyboru właściwego planu doświadczenia, określenia sposobu jego realizacji i liczby powtórzeń, opisu stanowiska badawczego i pomiarowego,
- *realizację badań*; przeprowadzenie badań doświadczalnych na przygotowanym stanowisku,
- *analizę wyników i wnioskowanie*; prowadzone w zależności od realizowanego celu badania, dostępnymi metodami wnioskowania i narzędziami wizualizacji wyników,
- *wnioski z badań*; formułuje się je w postaci: wniosków poznawczych, wniosków utylitarnych (praktycznych) oraz rozwojowych, tj. określających kierunki dalszych badań.

Podstawowym źródłem informacji o stanie badanego obiektu jest właściwie zaplanowany eksperyment. Eksperyment (*indukcyjna metoda badań*) polega na czynnej modyfikacji zjawiska bądź obiektu badań, celem poznania zależności między osobnymi składnikami bądź warunkami przebiegu badanego zjawiska lub zmian cech obiektu.

Wyróżnia się następujące rodzaje eksperymentów – rys. 67 [159].



Rys. 67. *Systematyka eksperymentów w badaniach eksploatacyjnych* [159]

### 7.3. Modelowanie w badaniach eksploatacyjnych

Poznanie stanu dynamicznego obiektu wymaga w ujęciu eksperymentalnym jednoznacznego skojarzenia cech obiektu ze zbiorem miar i ocen generowanych procesów wyjściowych – czyli najczęściej symptomów. Algorytmy przyporządkowujące sobie oba zbiory cech (konstrukcji i symptomów) są podstawą tworzenia modeli obiektów [159].

Pojęcie „*model*” pochodzi od łacińskich słów (*modus, modulus*) oznaczających: makietę, wzorzec i w pierwotnym zastosowaniu definiowane było jako każde materialne odwzorowanie jakiegoś obiektu za pomocą innego obiektu mniejszego w wymiarach, przy czym obiekt odwzorowujący mógł być wykonany z innego materiału niż obiekt odwzorowywany [78].

W technice modele tworzy się dla następujących celów [160]:

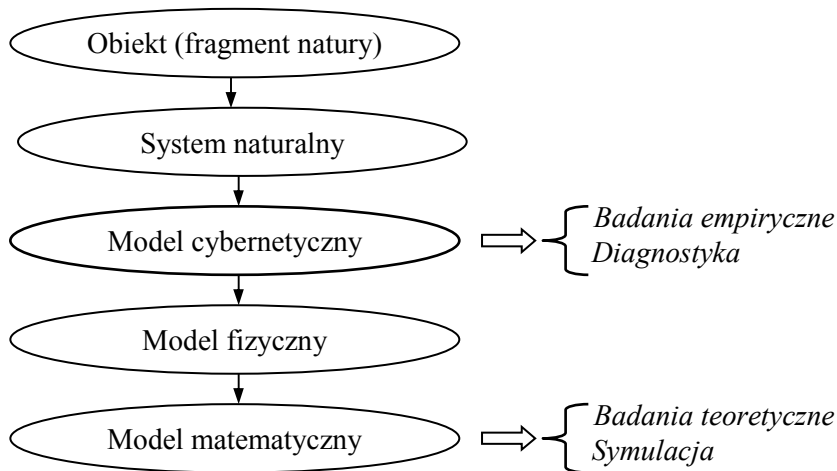
- *na potrzeby projektowania*, gdzie model służy do optymalizacji struktury i parametrów konstruowanego obiektu i jest narzędziem oceny „jakości” konstrukcji, eliminacji słabych ogniw, projektowania układów nadzoru (modele funkcjonalne i niezawodnościowe),
- *na potrzeby diagnozowania*, gdzie model jest podstawą ustalenia algorytmu diagnozowania, który prowadzi do określenia stanu aktualnego i przeszłego obiektu,
- *na potrzeby użytkowania i sterowania*, gdzie wykorzystuje się model do podejmowania decyzji z działającym lub obsługiwanym obiektem (tzw. modele decyzyjne).

*Modelowanie na potrzeby diagnozowania* traktowane jest obecnie jako metoda badania pośredniego. Stosowana jest w przypadku, kiedy bezpośrednie badania na obiekcie nie są możliwe lub niecelowe. Wynikać to może ze złożoności obiektu, charakteru procesów i zjawisk zachodzących w tym obiekcie, bądź zagrożeń, jakie dla badacza lub samego obiektu stanowi proces badawczy.

Istota *modelowania* polega na tym, że obiekt interesujący badacza (oryginał) zastępuje się innym obiektem (modelem), na którym wykonuje się wszelkie działania związane z procesem badawczym, przy czym model powinien być wolny od wszystkich tych cech oryginału, które uniemożliwiają lub utrudniają bezpośrednio jego badanie [78]. Z tego też względu najbardziej pożądanymi są *modele analityczne*, które istnieją w świecie czystej idei (matematyki).

Procesy i zjawiska opisane w takim modelu mogą być zatem wolne od przypadkowych wpływów ubocznych niż w przypadku materialnego oryginału. Pozwala to na obserwowanie ich w bardziej wyraźnej „czystej” postaci.

Aby utworzyć model obiektu technicznego, który będzie traktowany jako przedmiot poznania, trzeba zatem wykonać szereg działań, polegających na wytwarzaniu kolejnych uproszczeń badanego urządzenia, postrzeganego początkowo jako fragment natury. W rezultacie tych działań uzyskuje się jego różne modele, właściwe dla określonej procedury badawczej – rys. 68 [71].



Rys. 68. *Modelowanie urządzeń technicznych* [71]

Najogólniej zgodność między modelem a oryginałem może polegać na [159]:

- *podobieństwie strukturalnym*, odbijającym wspólne cechy budowy wewnętrznej modelu i oryginału (bardzo ważne w teorii niezawodności),
- *podobieństwie funkcjonalnym* – istotna jest zbieżność ich właściwości.

*Model strukturalny* (podobieństwo strukturalne) zapewnia najwięcej informacji o oryginale na podstawie badań modelu, ponieważ zależność między strukturą i funkcją obiektu jest analogiczna do zależności między przyczyną a skutkiem. Model ten nie opisuje jednak właściwości obiektu (maszyny).

*Model funkcjonalny* może pokazywać nieznanne jeszcze właściwości maszyny, ale nie pozwala na wydawanie wiarygodnych sądów o jej strukturze, ze względu na to, że dotyczy innego obszaru zagadnień. W modelu tym obiekt przedstawia się systemowo jako „czarną skrzynkę” i charakteryzuje się przez określone współzależności wejściem a wyjściem czarnej skrzynki.

Ten rodzaj postępowania badawczego (*systemowy*) abstrahuje wyraźnie od materialnej konkretyzacji i wewnętrznej budowy obiektu i ogranicza się do badania zależności funkcyjnych. Rozpatruje więc nie rzeczy, lecz sposoby zachowania; nie pyta „czym jest ta rzecz?”, lecz „co robi ta rzecz?” [88].

Biorąc po uwagę dynamikę zdarzeń wyróżnia się dwie grupy modeli [160]:

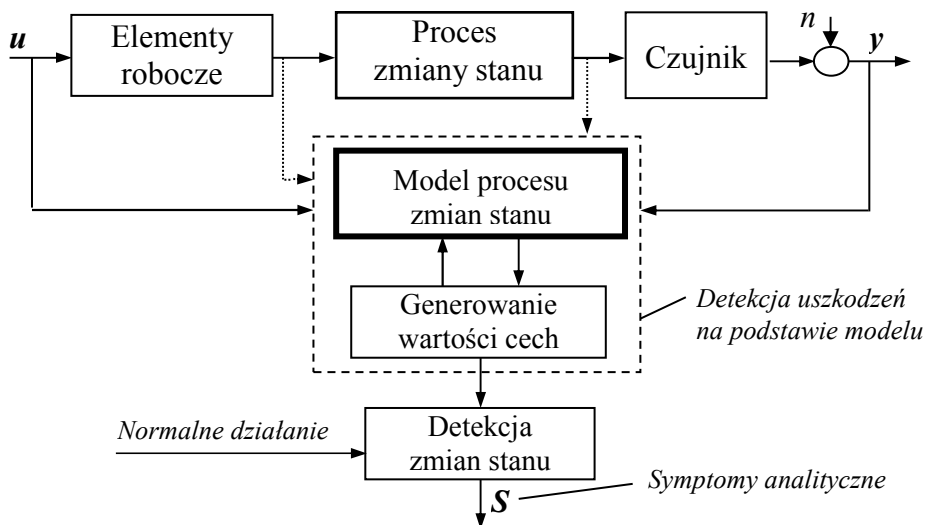
- *modele symptomowe*, które opisują stan techniczny obiektu w kategoriach obserwowanych sygnałów diagnostycznych, nie zawierających czasu dynamicznego „ $t$ ”, lecz tylko czas życia „ $\tau$ ”.
- *modele holistyczne*, które ujmują łącznie dynamikę systemu i procesy zużyciowe (uszkodzenia).

W tym drugim przypadku budowa wewnętrzna modelu może być znana i różnić się od budowy wewnętrznej oryginału lub obie budowy wewnętrzne mogą być nieznane i zachować podobieństwo reakcji na wzbudzenie zewnętrzne (np. jeżeli coś wzrasta na modelu, to i będzie wzrastać na oryginale [88]).

Diagnozowanie z zastosowaniem modelu symptomowego to typowe podejście stosowane w diagnostyce technicznej. Rozpatruje się tu dwa zadania [94]:

- *detekcję uszkodzenia*, gdzie celem postępowania jest stwierdzenie, czy w nadzorowanym układzie występuje niesprawność (uszkodzenie),
- *diagnozę uszkodzenia* – postępowanie obejmujące *lokalizację uszkodzenia*, czyli określenie rodzaju, miejsca i czasu wystąpienia uszkodzenia oraz *identyfikację uszkodzenia*, która dotyczy określenia rozmiaru uszkodzenia i charakteru jego zmienności w czasie.

*Detekcja uszkodzenia* jest możliwa na podstawie znajomości różnych zależności pomiędzy pomiarowo dostępnymi sygnałami  $u$  oraz  $y$ , niosącymi informacje odpowiednio o wejściu i wyjściu diagnozowanego obiektu – rys. 69 [94].



Rys. 69. Schemat graficzny detekcji uszkodzenia z uwzględnieniem modelu [94]



## 7.4. Projektowanie badań eksploatacyjnych

W większości eksperymentów decydującą rolę w powodzeniu odgrywają  *pomiary*. Podstawowym zagadnieniem związanym z pomiarami jest zapewnienie zgodności techniki pomiarowej z celem eksperymentu, jakim jest weryfikacja hipotezy. Z charakteru pomiarów wynika, że mogą być one niszczące i nieniszczące. Trendem we współczesnej diagnostyce technicznej jest stosowanie badań nieniszczących i takie też są współcześnie zalecane do stosowania.

Przez pojęcie  *badań niszczących* należy rozumieć nie tylko pomiary, w wyniku których ulega całkowitej lub częściowej destrukcji obiekt eksperymentalny, lecz również pomiary związane z nieodwracalną zmianą sytuacji eksperymentalnej. Oznacza to, że maszyna lub inne urządzenie po rozłożeniu na elementy, które poddawane są badaniom po ponownym złożeniu, nie może wykonywać tych funkcji, do których była pierwotnie przeznaczona [78].

Ogólnie biorąc, przystępując do projektowania badań eksploatacyjnych badacz ma dwie możliwości:

- zastosować metodę przyjmowaną zwykle w analogicznych badaniach przez innych,
- opracować własną, oryginalną, metodę pomiaru.

Decyzja o wyborze jednej z wymienionych możliwości powinna być oparta na krytycznej analizie metod stosowanych przez innych badaczy dla uzyskania pożądaných przez nas wyników. Nie należy ukrywać, że w zdecydowanej większości badaczy (a na pewno początkowych) dominuje ta pierwsza droga postępowania. Warto więc mieć na uwadze aspekty, na które należy zwrócić uwagę analizując metodyki postępowania innych badaczy. Według [78] są to takie aspekty:

- czy istnieje zbieżność celów badań opisywanych w piśmiennictwie z projektowanymi?,
- czy istnieje analogia w badanych obiektach lub zjawiskach?,
- jak jest skala trudności metod opisywanych i czy jest możliwe ich uniknięcie?,
- jakie błędy i uproszczenia wprowadzono i czy to jest konieczne?,
- czy opisywane metody odpowiadają poziomowi rozwoju współczesnej nauki?,
- jakich modyfikacji należy dokonać, aby zastosować dane metody badań?

Decyzja o opracowaniu własnej, oryginalnej, metody badawczej wynika z tego, że dotychczasowe metody badawcze są nieprzydatne. Opracowując wła-

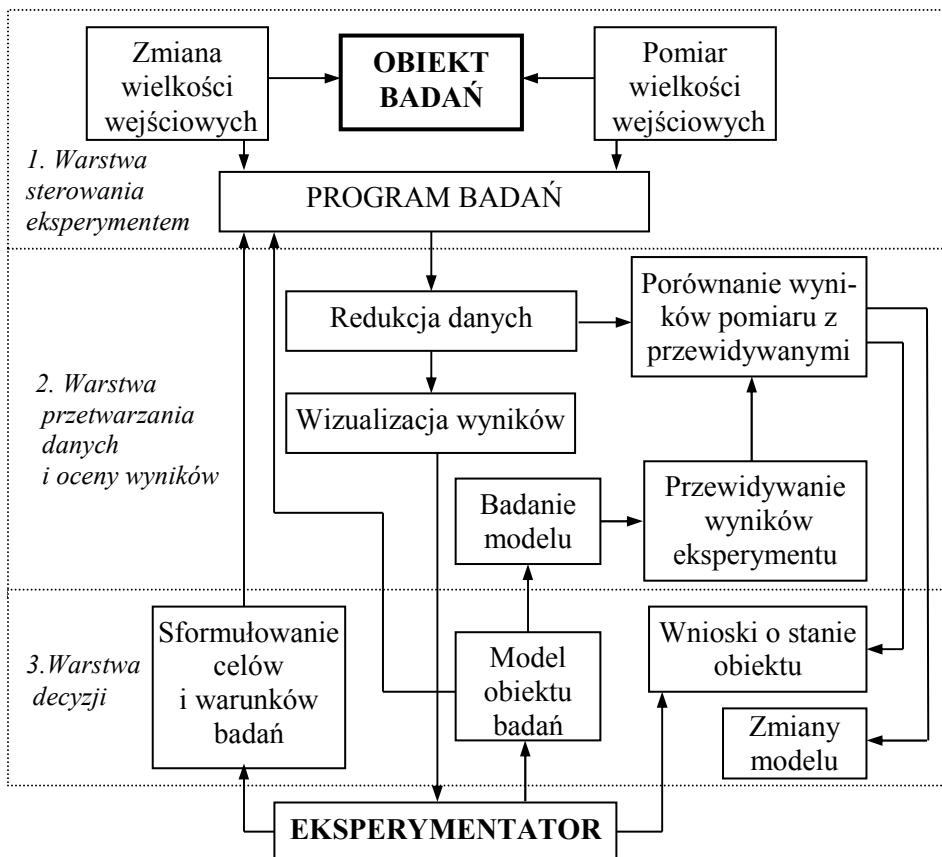
sną metodę badań warto mieć na uwadze pewne zasady ogólne, właściwe do poprawności metodycznej i technicznej projektowanej metody.

Każda metoda badawcza powinna spełniać trzy podstawowe zasady:

- 1) zasadę odtwarzalności,
- 2) zasadę intersubiektywnej powtarzalności.
- 3) zasadę zgodności z prawami naukowymi.

Projektowana metoda badawcza ma więc „pokazywać to, co jest badane”. Nie może być oparta na założeniu unikalności i niedostępności przez innych badaczy (intersubiektywna powtarzalność). Idea metoda musi także logicznie wynikać z określonej teorii i jako taka musi mieć teoretyczne uzasadnienie [78].

Niezależnie od poprawności metody, istnieje pewna ogólna struktura organizacyjna badań eksperymentalnych (rys. 70), którą trzeba przestrzegać [159].



Rys. 70. Organizacja prac badawczych [159]

- *warstwa sterowania* – obejmuje uzmiennianie wielkości wejściowych i wykonywanie pomiarów zgodnie z planem badań,
- *warstwa przetwarzania* – obejmuje oceny wyników i badanie modelu,
- *warstwa decyzji* – obejmuje korekty eksperymentu i zmiany modelu przez badacza.

*Realizacja* badań eksperymentalnych wymaga zatem kilku procesowo ustalonych zespołów czynności. Są to:

- sformułowanie celów i programu badań,
- zaplanowanie badań (metody badawczej),
- przygotowanie stanowiska badawczego (aparatury pomiarowej),
- realizacja badań według przyjętego planu eksperymentu,
- opracowanie wyników pomiarów (najczęściej statystycznie),
- uogólnienie wyników w postaci wniosków.

W badaniach eksploatacyjnych weryfikuje się określone *hipotezy* (hipoteza – twierdzenie badawcze stawiane przed rozpoczęciem doświadczenia). Hipotezy te mogą obejmować zarówno badania związane z problemem badawczym (np. czy istnieje związek pomiędzy jakimś czynnikiem i jakimś symptomem?), jak również z samym systemem pomiarowym (np.: ustalenie precyzji metody).

*Wybór planu badań zależy* od charakteru postawionej hipotezy, dla weryfikacji której eksperyment jest przeznaczony. Zależy również od przewidywanego położenia tego eksperymentu w cyklu badawczym. Może to być bowiem eksperyment czynny, bierny lub bierno-czynny.

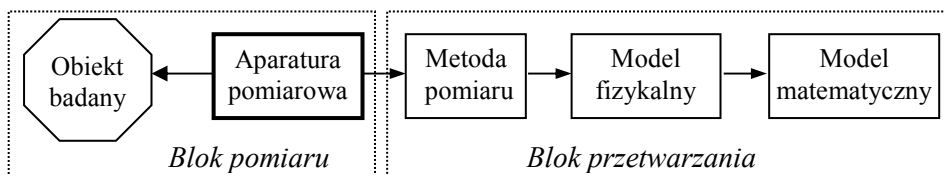
Przy wstępnej ocenie można ograniczyć się do ogólnych jakościowych sformułowań zależności między zmiennymi (model jakościowy). W przypadku, kiedy służy on ilościowemu określeniu związków ujętych hipotezą (model ilościowy), niezbędne jest opracowanie precyzyjnego planu eksperymentu (planowania badań), ponieważ ten rodzaj postępowania wymaga dokładności i powtarzalności przebiegu eksperymentu [78].

*Wśród warunków*, jakie składają się na pojęcie sytuacji eksperymentalnej, są warunki, które w szczególnie sposób determinują przebieg eksperymentu oraz takie, których wpływ na eksperyment jest nieznaczny. W poszczególnych eksperymentach proporcje między tymi grupami warunków są różne. Ponadto, ten sam eksperyment powtórzony w różnym czasie może być narażony na zmienione proporcje między tymi czynnikami. Wiadomo równocześnie, że nie ma możliwości wpływania na charakter i zasięg wszystkich czynników, tworzących sytuację eksploatacyjną. Stąd niezmiernie ważne jest opisanie przyjętych *założeń* oraz *uproszczeń*, które powinny być wyartykułowane przy każdym badaniu.

## 7.5. Aparatura do badań eksploatacyjnych

U podstaw każdego rzetelnego badania eksploatacyjnego leży pomiar. Pomiar umożliwia wyrażenie praw i teorii naukowych precyzyjnym językiem matematyki i dlatego jest szczególnie istotny w działalności technicznej – określa bowiem dokładność [50].

Dla procesu mierzenia istotne znaczenie mają zastosowane metody pomiarowe i wykorzystywane przy tym środki techniczne (aparatura pomiarowa). Rzadko kiedy można traktować aparaturę pomiarową jako urządzenie wykonane samo dla siebie. Niezbędna jest zawsze znajomość celu pomiaru i model fizyczny zjawiska. Aspekty te są ze sobą sprzężone – rys. 71.



Rys. 71. *Miejsce aparatury pomiarowej w ogólnym schemacie procesu badawczego*

Celem diagnozowania w badaniach eksploatacyjnych jest, najczęściej, wykrycie niepożądanych czynników, obniżających trwałość badanego obiektu. Sformułowana z badań diagnoza jest dla decydenta podstawą podjęcia czynności usuwających lub osłabiających oddziaływanie czynników niepożądanych.

Wymienia się przy tym dwa podstawowe wymagania w odniesieniu do procesów diagnostycznych i w konsekwencji do zastosowanej aparatury [10]:

- *dostatecznie wczesne i wiarygodne wykrycie niepożądanych czynników*, co oznacza spełnienie warunku:

$$T + T_{rdec} < T_n \quad (14)$$

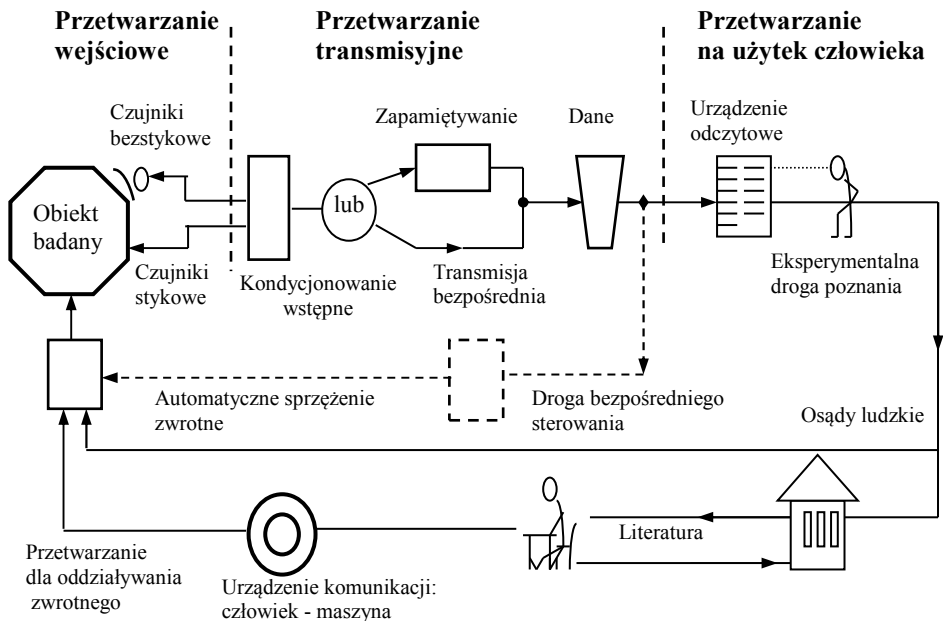
czyli suma czasu  $T$  (między pojawieniem się niepożądanego czynnika, a dostarczeniem decydentowi diagnozy) i czasu reakcji decydenta  $T_{rdec}$  powinna być mniejsza od czasu  $T_n$  niepożądanego czynnika wpływającego na istotne zmniejszenie trwałości obiektu. Czas  $T$  zależy od natury i postaci sygnałów diagnostycznych. Oprócz tego, czas  $T$  oraz czas  $T_{rdec}$  zależą od metody diagnozowania (aparatury pomiarowej i kwalifikacji diagnosty). W rezultacie spełnienie podstawowego warunku badań zależy w dużym stopniu od użytej aparatury pomiarowej.

- utworzenie diagnozy w postaci selektywnie dobranej do percepcji decyzyjno-wykonawczych decydena. Sprowadza się to do odpowiedzi na pytanie: do kogo adresowana jest diagnoza lub jaka ma być diagnoza? Informacja powinna być odpowiednio selekcjonowana, a podstawą selekcji powinna być zasada: „*tylko tyle informacji, ile potrzeba*”.

W badaniach eksploatacyjnych pomiar powinien trwać stosunkowo krótko, jego wykonanie nie powinno przerywać procesu działania danej maszyny, a wyniki pomiaru powinny być formułowane w sposób ciągły. Ze względu na te kryteria, urządzenia pomiarowe dzieli się na [161]:

- ręczne,
- półautomatyczne – pokładowe (integralne z maszyną) i zewnętrzne,
- automatyczne – pokładowe, zewnętrzne i mieszane,
- ze sztuczną inteligencją (sterowane komputerowo).

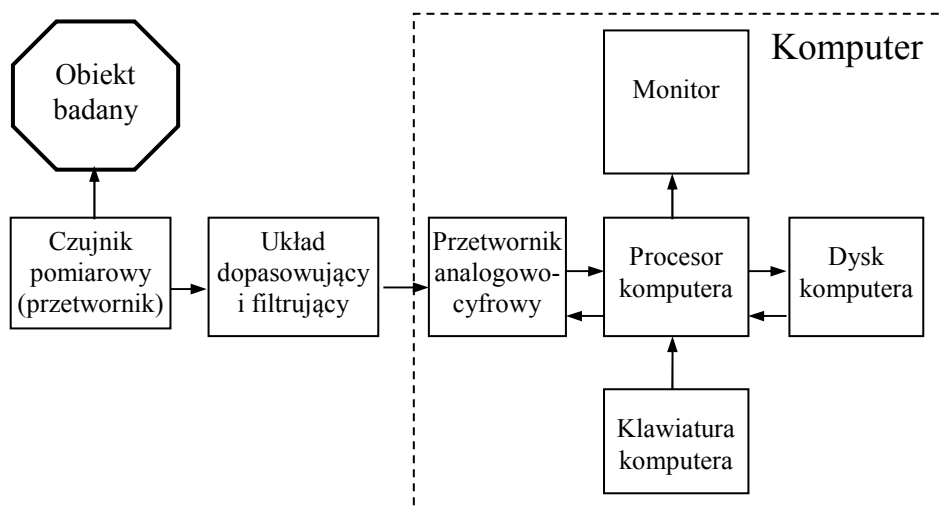
Często wymaga się też, aby wynik pomiaru miał postać umożliwiającą wykorzystanie go do automatyzacji sterowania urządzeniem. Może być to robione na dwa sposoby: automatyczne sprzężenie zwrotne, bądź z udziałem człowieka. Przykład powiązań, przy wykorzystywaniu sygnału pomiarowego do sterowania badanym obiektem, zobrazowano na rys. 72 [50].



Rys. 72. Schemat przetwarzania informacji w badaniach eksploatacyjnych [50]

Za *sygnał pomiarowy* można uważać każdą postać energii czy zjawiska, w określony sposób odtwarzającą mierzoną wielkość. Pojęcie to praktycznie zawęża się jednak do takich postaci energii, które są dogodne do przenoszenia i wykorzystania. Najczęściej jest to sygnał elektryczny lub pneumatyczny. Wytworzony w maszynie sygnał pomiarowy może mieć różną postać, np. drgania wibroakustyczne, które przez przetwornik piezoelektryczny zostają zamienione na sygnał elektryczny.

Niezależnie od doboru samego przetwarzania wielkości mierzonej, najważniejszą sprawą jest dobranie metody i układu pomiaru. Decyzja, co do wyboru zależy od wielu czynników, takich jak: cel badania, wymagana dokładność i postać informacji, rodzaj i charakter wielkości mierzonej, warunki otoczenia i koszty zakupu. Aparaturze pomiarowej stosowanej w badaniach eksploatacyjnych stawia się zatem wiele różnorodnych wymagań. Ich realizacja odbywa się najczęściej przy użyciu standardowych bloków (układów) i komputera – rys. 73 [71].



Rys. 73. Schemat włączenia komputera do badań eksploatacyjnych [71]

Czujnik pomiarowy odwzorowuje zmienną w czasie wielkość fizyczną, wybraną jako sygnał. W rezultacie tego odwzorowania wielkość fizyczna, podana na wejście czujnika, pojawia się na jego wyjściu jako wielkość elektryczna. Najczęściej odbywa się to przez piezoelektryczne czujniki drgań. Układ dopasowująco-filtrujący zapewnia transmisję sygnału do następnego członu aparatury. Współcześnie jest nim najczęściej komputer z określonym oprogramowaniem, filtrującym i przetwarzającym wprowadzane sygnały.

## 7.6. Podsumowanie

Rozdział 7. dotyczy zagadnień i procedury badań eksploatacyjnych. Przybliżono w nim zatem pojęcie wiedzy, wskazując na jej dwie główne formy: wiedzę „ukrytą” – dziedzinową (typu „wiem, że”), zgromadzoną w umyśle człowieka oraz wiedzę „jawną” – użytkową (typu „wiem jak”), zawartą w różnych bazach danych, instrukcjach lub normach.

W badaniach naukowych, zwłaszcza eksploatacyjnych, dąży się do powiększenia tej drugiej formy wiedzy. Jest to bowiem wiedza uporządkowana. Może być wyrażona w słowach i liczbach, jest łatwo komunikowana i upowszechniana, łatwo ją zapisać i wyrazić w liczbach czy zbiorze reguł. Zwrócono uwagę, że wiedza jawna jest dziś coraz częściej zastępowana przez systemy informatyczne. Obserwuje się formalizację i automatyzację jej funkcji informacyjnych. Staje się ona przez to mniej wartościowa, a często nawet zbyteczna.

Omówiono ogólną metodę postępowania badawczego, przydatną szczególnie do badań eksploatacyjnych oraz systematykę w zakresie tego rodzaju badań. Szczególną uwagę zwrócono na badania eksploatacyjne z wykorzystaniem modelu. Opisano rodzaje modeli i zakres ich wykorzystywania, przybliżając zwłaszcza proces wykorzystywania modelu symptomowego. Omówiono zasady projektowania badań eksperymentalnych, podkreślając, że istotnym zagadnieniem jest zapewnienie zgodności techniki pomiarowej z celem eksperymentu. W tym zakresie trendem jest stosowanie badań nieniszczących; omówiono zatem definicję tego rodzaju badań.

Podano ogólną strukturę organizacji badań eksploatacyjnych, na którą składają się trzy główne warstwy: sterowania eksperymentem, przetwarzania danych i oceny wyników oraz decyzji – dotyczących korekty eksperymentu lub zmiany modelu. Zaznaczono, że współczesne badania opierają się zwykle na określonej procedurze ujętej teorią eksperymentu. Ważnym elementem tej procedury jest określone postępowanie zwane planem eksperymentu. Podkreślono też, że niezależnie od tego, czy jest on stosowany czy nie, realizując badania eksploatacyjne należy zawsze opisać nie tylko zmienne decyzyjne, ale także przyjęte założenia oraz uproszczenia.

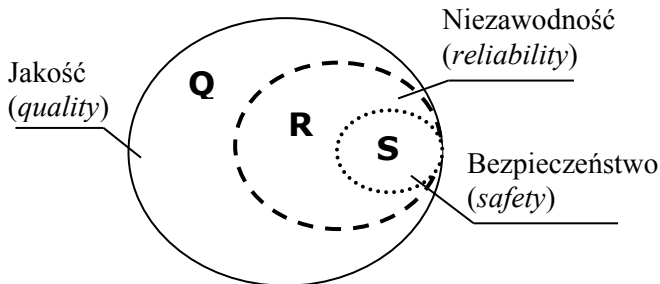
Na zakończenie rozważań omówiono ogólne wymagania dotyczące aparatury badawczej, stosowanej do badań eksploatacyjnych. Sformułowano podstawowe wymagania, jakie stawia się takiej aparaturze. Podkreślono, że współcześnie tego rodzaju badania wykonywane są zwykle przy użyciu techniki komputerowej. Przedstawiono schemat włączenia tej techniki w układ badań.

## 8. ELEMENTY TEORII NIEZAWODNOŚCI

### 8.1. Pojęcie i istota niezawodności

Niezawodność  $R$  (ang. *reliability*) można definiować w sposób opisowy (deskryptywny) lub ocenowy (wartościująco-normatywny). W ujęciu opisowym określa się ją jako – „własność rzeczywistego obiektu, polegającą na zachowaniu jakości w określonych warunkach eksploatacji” [136]. W ujęciu wartościowo-normatywnym niezawodność jest rozumiana natomiast jako „prawdopodobieństwo wykonania pracy przez obiekt w określonym czasie  $t$  i określonym środowisku  $x$ ” [158]. Synonimem niezawodności jest więc  *pewność działania*.

W świetle definicji opisowej niezawodność jest pojęciem z obszaru jakości obiektu technicznego. Jest od niej jednak węższym pojęciem, bowiem opisuje „zachowanie jakości” w określonym czasie. Jeszcze węższego obszaru zagadnień dotyczy *bezpieczeństwo*  $S$ , które określa niezawodność zastrzeżoną określonymi przepisami prawa – rys. 74.



Rys. 74. *Relacja między pojęciami: jakość – niezawodność – bezpieczeństwo*

Do połowy XX wieku nie wyodrębniano tych pojęć. Obecnie każde z nich stanowi wyodrębniony obszar zagadnień badawczych i metodologicznych.

Zasadnicza różnica pomiędzy jakością a niezawodnością polega na tym, że jakość jest pojęciem subiektywnym, a co za tym idzie nie jest mierzalna. Niezawodność natomiast jest ściśle definiowana i wyliczana. Nakłada się jednak tu wymaganie, by przedmiotem prac analityczno-projektowych był nie sam badany obiekt, ale jego zachowanie się w systemie eksploatacyjnym [7].

Wyodrębnienie pojęcia „*niezawodność*” spośród cech jakościowych urzędzenia nastąpiło w latach 50. XX w. Wyodrębnienie to stało się zasadne, ponieważ stało się użyteczne w praktyce. Istotę tego pojęcia precyzują stwierdzenia [136]:



1. *Niezawodność jest globalną*, kompleksową własnością rzeczywistego obiektu wykonanego w konkretnym tworzywie, w wyniku konkretnego procesu wytwarzania, która to własność może być oszacowana przy pomocy różnych miar ilościowych, w zależności od wykonywanego zadania. Oceny ilościowe nazywane są miarami lub wskaźnikami niezawodności. Miary mogą być opisane charakterystykami funkcyjnymi lub liczbowymi.
2. *Niezawodność jest własnością mierzalną*, toteż może być oszacowana wtedy i tylko wtedy, kiedy są wyznaczone dopuszczalne odchyłki wielkości fizycznych, które są istotne ze względu na poprawne wykonywanie przez obiekt założonej funkcji zgodnie z przeznaczeniem (np. dla opony samochodowej będzie to wysokość bieżnika). Pozwala to wyznaczyć kryterium przejścia ze stanu niezawodności do zawodności.
3. *Niezawodność jest własnością uwarunkowaną* logicznymi powiązaniem między wielkościami fizycznymi całego układu mechanicznego, czynnikami wymuszającymi zewnętrznymi i wewnętrznymi, otoczeniem, środowiskiem i obciążeniem. Uwarunkowania te ogólnie ustala się jako „warunki pracy”.
4. *Niezawodność jest własnością zmienną* zależną od parametru czasu. Rzeczywiste wartości przyjmowane przez wielkości fizyczne ulegają zmianom niezależnie czy obiekt wykonuje pracę użyteczną, czy też nie.

Początki teorii niezawodności sięgają czasów II wojny światowej i związane są bezpośrednio z tworzeniem takich konstrukcji jak: urządzenia radarowe, stacje radiolokacyjne i elektroniczne maszyny cyfrowe [27]. Złożoność tych konstrukcji (zawierają one od kilkunastu tysięcy do kilku milionów niezależnych elementów) zrodziła poważne problemy zarówno podczas projektowania, jak i podczas eksploatacji [158]. Za istotny przyczynek do rozwoju teorii niezawodności można uznać jednak pierwszy prawdziwy komputer elektroniczny ogólnego przeznaczenia *ENIAC* (*Electronic Numerical Integrator And Computer*), skonstruowany na Uniwersytecie w Pensylwanii w 1943 r.

ENIAC – dzieło umysłów J. W. Mauchly i J. P. Eckerta, posiadał modułową konstrukcję; 42 stalowe szafy, każda 3 m wysokości, 60 cm szerokości i 30 cm głębokości, zawierały w sumie 18.800 lamp elektronowych, które miały tendencje do szybkiego przegrzewania się. Nie potrafił temu przeciwdziałać nawet system wentylacyjny, który pracował na bazie dwóch silników Chryslera, o łącznej mocy 24 KM. Programowanie, czyli zlecenie maszynie konkretnego zadania do wykonania – nie przychodziło łatwo. Do uruchomienia maszyny trzeba było nastawić ręcznie 4368 komutatorów, wprowadzając dane cyfra po cyfrze. Dwa dni je wprowadzano, a urządzenie ulegało awarii już po kilku minutach pracy [154]. Należało więc wymyślić, jak zwiększyć pewność działania tego urządzenia i tak, dzięki pomocy matematyków (w szczególności *von Neu-*

*manna*), powstała teoria niezawodności, czyli nauka oparta na matematycznym wyliczaniu pewności działania urządzenia.

W tym rozumieniu niezawodność nie jest abstrakcyjną miarą doskonałości urządzenia, a stanowi raczej miarę pewnego zharmonizowania danego urządzenia z rzeczywistością, w której ono działa. Naturalnie, stan wewnętrzny urządzenia i to zharmonizowanie zależą od rodzaju działania i dlatego dla urządzeń wykonujących różne operacje niezawodność może być inna [12].

Pierwsze wzmianki o niezawodności – jako wyodrębnionej właściwości urządzenia – zamieszczone zostały w książce J. Zennecka „*Drahtlose Telegraphie*”, wydanej w Stutgardzie w 1911 r. Pierwszą publikacją w Polsce na temat niezawodności była praca A. Kilińskiego z 1957 r., która dotyczyła niezawodności sprzętu elektronicznego. Pierwsza sesja naukowa PAN, poświęcona niezawodności, odbyła się w Warszawie w 1960 r. Tak więc zagadnieniami niezawodności w Polsce praktycznie zaczęto zajmować się od lat 60. XX w.

Teoria niezawodności rozwinęła się więc stosunkowo późno w porównaniu z innymi obszarami wiedzy inżynierskiej. Obecnie teoria ta jest wykładana we wszystkich wyższych szkołach technicznych w Polsce. Jest tak m.in. dlatego, że nauka ta pozwala na prognozowanie długości życia obiektu oraz stosowanie takich określonych sposobów postępowania, podczas projektowania, wytwarzania i eksploatacji, które zmniejszą prawdopodobieństwo uszkodzeń [105]. Teoria niezawodności stawia sobie dwa główne cele [145]:

- tworzenie teoretycznych podstaw, umożliwiających opis praw powstawania uszkodzeń i błędów (niesprawności) w systemach technicznych,
- poszukiwanie takich sposobów projektowania oraz zasad eksploatacji tych systemów, by przy danych nakładach możliwość występowania uszkodzeń była jak najmniejsza.

Praktyka (inżynieria) niezawodności skierowana jest natomiast na to, aby [139]:

- poznawać fizyczne procesy powstawania uszkodzenia,
- usuwać uszkodzenia,
- przewidywać możliwość zaistnienia uszkodzeń oraz przeciwdziałać im.

Wynika z tego, że teoria niezawodności jest nauką interdyscyplinarną, która wyrosła z potrzeby sprostania rosnącym wymaganiom stawianym obiektom technicznym. Jej droga biegnie, poprzez różne dyscypliny naukowe, począwszy od filozofii a skończywszy na cybernetyce i statystyce. Teoria ta służy do probabilistycznego odwzorowania zachowania się złożonych obiektów technicznych w trakcie ich użytkowania. Wywodząca się niej inżynieria niezawodności rozwija się w kierunku metodologii projektowania urządzeń pracujących bezawaryjnie w ustalonym okresie czasu. Upraszczając nieco można więc powiedzieć, że *niezawodność jest to nauka o doskonałości rzeczy*.

## 8.2. Funkcja niezawodności

Doskonałość ogólnie jest pojmowana jako najwyższy stopień cech dodatnich. Stopień ten jakoś trzeba wyznaczyć. Do tego celu może być użyta funkcja niezawodności, której istota zostanie przybliżona w tym podrozdziale.

Jak wcześniej nadmieniono, niezawodność tym się różni od jakości, że do wyznaczenia niezawodności istnieje sformalizowany rachunek, dzięki któremu można wyznaczyć *ilościowe miary niezawodności*. Przez pojęcie to należy rozumieć „*take charakterystyki losowo zmiennych wielkości, które związane są z oceną skuteczności lub efektywności prac obiektu*” [136].

Miary te można wyznaczyć w zależności od zaistniałej potrzeby dla dowolnych obiektów mechanicznych (maszyn), jak i ich elementów składowych (części). Procedura postępowania jest taka sama, tylko poziom odniesienia inny.

W literaturze przedmiotu można spotkać wiele różnych ilościowych miar niezawodności. Do podstawowych w tym zakresie należą jednak cztery.

Dwie miary przejęte ze statystyki. Są to:

- gęstość prawdopodobieństwa  $f(t)$ ,
- dystrybuanta trwałości  $F(t)$ .

Dwie są miarami własnymi teorii niezawodności. Jest to:

- funkcja niezawodności  $R(t)$ ,
- intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$ .

Miary te stanowią matematyczny opis wyznaczanych doświadczalnie odpowiednich histogramów (wykresów częstości zdarzeń). Pamiętajmy bowiem, że teoria niezawodności jest to technologia pracy na zbiorach. Z tego zestawu wartą omówienia jest *funkcja niezawodności*  $R(t)$  [12]. Charakteryzuje ona ilościowo niezawodność przez prawdopodobieństwo  $p$  zajścia zdarzenia polegającego na tym, że obiekt będzie pracował poprawnie (bez uszkodzeń) przez dany czas w określonych warunkach [99]. W myśl tej definicji nie mówi się zatem o niezawodności jako takiej, ale zawsze tylko o niezawodnej pracy w określonym przedziale czasu  $(0 - t)$  w odniesieniu do zbioru obiektów.

Wyznaczając funkcję niezawodności należy zatem ustalić [26]:

- skuteczność działania (spełniania wymagań) dla ustalonego czasu  $t$  (ten ustalony, tj. konkretny czas, będzie dalej oznaczany symbolem  $t_m$ ),
- okoliczności działania  $x$  (warunki pracy wynikające z obciążenia i środowiska),
- trwałość środka technicznego  $T$ ,
- pewność działania (opisywana prawdopodobieństwem)  $p$ .

Nie można wyznaczyć ilościowej miary niezawodności bez znajomości powyższych wymagań. Ponadto, niezbędny jest też kontekst, do czego badania te mają służyć. Miary niezawodności podawane bez odniesienia do kontekstu są bezwartościowe [139]. W celu zdefiniowania tego kontekstu trzeba ustalić wzorzec (definicję) operacyjną. Definicje operacyjne pozwalają ludziom znaleźć wspólny język; każdy rozumie dane zjawisko w taki sam sposób [72].

W eksploatacji urządzeń technicznych definicja operacyjna powinna określać sposób, w jaki dane urządzenie będzie użytkowane i co stanowi kryterium przejścia ze stanu zdatnego w niezdatny. Kryterium to przyjmuje się biorąc pod uwagę poziom ryzyka, czyli konsekwencje awarii. Kryterium (uszkodzenia) nie jest zatem trafne lub nietrafne; jest jedynie z góry ustaloną regułą [72]. Można zatem wybrać dowolną liczbę kryteriów i w konsekwencji wskaźników niezawodnościowych, ale tylko niektóre z nich będą właściwe i efektywne.

Każdy wskaźnik ilościowy niezawodności winien wiązać się z funkcją czasu. Wielkości tej należy zatem poświęcić szczególną uwagę przy konstruowaniu i analizie ilościowych miar niezawodności [12].

Zależność na funkcję niezawodności wynika z powiązania czynników ujętych definicją wartościowo-normatywną niezawodności. Stąd mamy zapis [56]:

$$R(t, x) = p(T \geq t) \quad (15)$$

Warunki środowiskowe  $x$  przyjmuje się zwykle takie, jakie zostały dopuszczone w dokumentacji techniczno-ruchowej (DTR-ce). Założenie takie upraszcza powyższy zapis (15) do postaci:

$$R(t) = p(T \geq t) \quad (16)$$

Jeżeli warunki rzeczywiste  $x_r$  odbiegają w znaczny sposób od zakładanych ( $x_r \neq x$ ), to wprowadza się współczynniki poprawkowe, których wartości podawane są w stosownej literaturze, np. [139] (zagadnienie to zostanie przybliżone dalej, przy omawianiu wykładniczego rozkładu niezawodności).

Podane wyżej wyrażenie (16) przekształcimy w następujący sposób:

$$R(t) = p(T \geq t) = 1 - p(T \leq t) \quad (17)$$

przy czym:

$$p(T \leq t) = F(t) \quad (18)$$

gdzie  $F(t)$  = funkcja dystrybucji (dystrybuanta) zmiennej losowej  $T$  (jest to prawdopodobieństwo tego, że urządzenie uszkodzi się przed upływem czasu  $t$ ). Stąd otrzymujemy:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (19)$$

Jest to podstawowe równanie teorii niezawodności, wiążące funkcję niezawodności  $R$  oraz zawodności  $F$  (funkcję „śmierci”). Dystrybuanta  $F$  określa, jakie jest prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia (w świetle przyjętego kryterium) w badanym zbiorze obiektów do czasu  $t$ . Z powodu prostej zależności niezawodności elementu  $R$  i dystrybuanty czasu pracy elementu  $F$  można by pojęcia niezawodności nie wprowadzać. Czyni się to jednak z powodu, że pojęcie to jest użyteczne w praktyce. Zatem:

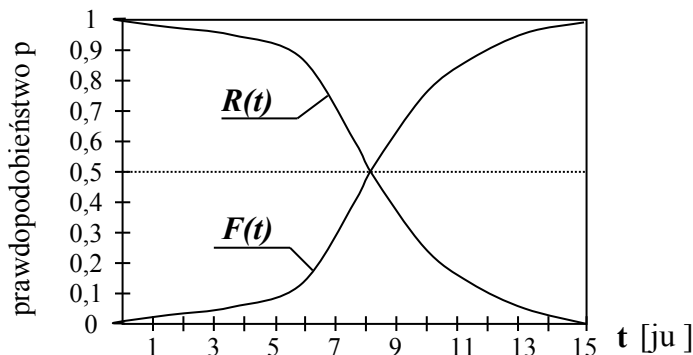
- ❖ *niezawodność*  $R$  opisuje udział cząstkowy zbioru obiektów, które nie uszkodziły się do analizowanego czasu  $t$
- ❖ *dystrybuanta*  $F$  opisuje ile obiektów uległo uszkodzeniu do czasu  $t$ .

Informacje o dystrybuancie  $F$ , opisującej poziom uszkodzeń zbioru, uzyskuje się z eksperymentu. Najprostszy do analizy jest eksperyment, w którym mierzy się czas pracy próbki  $n$  elementów, a następnie określa się typ rozkładu i dla niego, z określonych tablic, wyznacza się modelowy (teoretyczny) przebieg dystrybuanty  $F$ . Jest ona monotoniczną funkcją rosnącą,  $0 \leq F(t) \leq 1$ . Oznacza to, że wszystkie obiekty (niezależnie, jak dobre by były na początku pracy) mają skończoną trwałość, a więc zawsze nadejdzie taki moment, w którym wszystkie ulegną uszkodzeniu. Jest to jedno z podstawowych założeń teorii niezawodności. Zakłada się też, że  $F$  jest funkcją ciągłą i  $F(0) = 0$ .

Funkcja niezawodności  $R$  charakteryzuje się zatem takimi cechami:

- w chwili początkowej,  $t = 0$ , jest równa 1,
- jest nierosnącą funkcją czasu,
- po czasie nieskończenie długim jest równa 0.

Przebieg tych funkcji w czasie  $t$  (jednostki umowne) pokazano na rys. 75.



Rys. 75. *Funkcja niezawodności  $R$  oraz zawodności  $F$  dla rozkładu normalnego*

### 8.3. niezawodność obiektów nieodnawialnych

Maszyny i urządzenia – jako środki pracy – można podzielić na dwie grupy: odnawialne i nieodnawialne, czyli takie, które można naprawiać i nie[139]. Ten pierwszy podział ma miejsce wtedy, gdy konstruktor już w rozwiązaniu projektu przewiduje możliwość regeneracji, wymiany regulacji, automatycznej blokady. Podział na naprawialne i nienaprawialne uwzględnia opłacalność ekonomiczną i konkretne warunki eksploatacji obiektów i nie zależy to od wielkości urządzenia, ale od rozwiązania konstrukcyjnego. Przykładowo: długopis – obiekt naprawialny i odnawialny, a żarówka – nienaprawialna i nieodnawialna.

W związku z tym, podstawowe miary niezawodności można podzielić na dwie grupy:

- wskaźniki charakteryzujące niezawodność obiektów nieodnawialnych,
- wskaźniki charakteryzujące niezawodność obiektów odnawialnych.

Jak wcześniej nadmieniono, podstawowymi wskaźnikami charakteryzującymi niezawodność obiektów nieodnawialnych (do pierwszego uszkodzenia kryterialnego) są [102]:

- okres trwałości  $T$ , (wartość oczekiwana czasu pracy do pierwszego uszkodzenia),
- prawdopodobieństwo poprawnej pracy – funkcja niezawodności  $R(t)$ ,
- prawdopodobieństwo uszkodzeń, opisywane dystrybuantą  $F(t)$  zmiennej losowej  $T$ ,
- gęstość prawdopodobieństwa (częstość) uszkodzeń  $f(t)$ ,
- intensywność uszkodzeń, nazywana też funkcją ryzyka  $\lambda(t)$ .

W tych przypadkach, gdy zmienna losowa  $T$  może przyjmować dowolne wartości w określonym przedziale, np.  $(-\infty, +\infty)$  lub  $(0, +\infty)$  itp., otrzymane doświadczalnie rozkłady wartości zmiennej  $T$  będziemy starali się aproksymować do jakiegoś rozkładu ciągłego (szerzej o tym w kolejnym rozdziale). Stąd:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(r) dr . \quad (20)$$

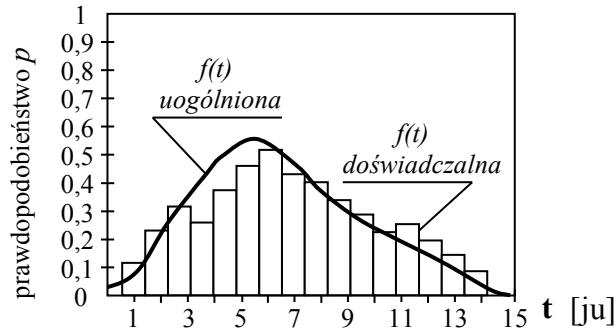
Jeżeli zmienna losowa  $T$  jest ciągła dla wszystkich  $t$ , to częstość zdarzeń:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} . \quad (21)$$

Ponieważ

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t} , \quad (22)$$

to funkcja gęstości prawdopodobieństwa  $f(t)$  opisuje rozkład trwałości obiektów, względnie rozkład długości okresów sprawności – rys. 76.



Rys. 76. Wykres funkcji gęstości prawdopodobieństwa: doświadczalny i uogólniony

Iloczyn

$$f(t)dt = p(t \leq T < t + dt), \quad (23)$$

zwany elementem prawdopodobieństwa, określa prawdopodobieństwo, że obiekt stanie się niesprawny w przedziale  $(t, t+\Delta t)$ , tj. określa jaka część obiektów sprawnych przy  $t = 0$  prawdopodobnie stanie się niesprawna w przedziale  $(t, t+\Delta t)$  [56].

Prawdopodobieństwo, że obiekt stanie się niesprawny w jakimś wyznaczonym przedziale  $(t_1, t_2)$  opisywane jest całką określoną:

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t)dt = \int_{-\infty}^{t_2} f(t)dt - \int_{-\infty}^{t_1} f(t)dt = F(t_2) - F(t_1). \quad (24)$$

bądź jako

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t)dt = \int_{t_1}^{\infty} f(t)dt - \int_{t_2}^{\infty} f(t)dt = R(t_1) - R(t_2). \quad (25)$$

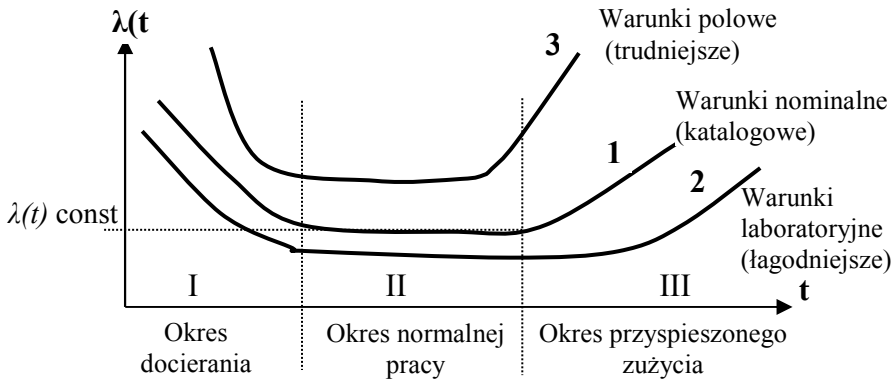
Wyrażenia te określają, jaka część obiektów sprawnych w chwili  $t = 0$  stanie się niesprawna w przedziale  $(t_1, t_2)$ . W teorii niezawodności interesuje nas jednak częściej, jaka część obiektów, które przetrwały sprawne do chwili  $t$ , prawdopodobnie stanie się niesprawna w przedziale  $(t, t+dt)$ . Ta część obiektów opisywana jest funkcją ryzyka i określa intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$ . Istotę tej funkcji można opisać w następujący sposób [158]:

$$\lambda(t)dt \equiv p(t < T < t + dt \mid T > t), \quad (26)$$

które po odpowiednich przekształceniach uzyskuje postać:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (27)$$

Funkcja  $\lambda(t)$  jest więc prawdopodobieństwem warunkowym powstania uszkodzenia w chwili  $t$  pod warunkiem, że do tej chwili obiekt pracował bezawaryjnie. Funkcja ta może mieć różny poziom w zależności od charakteru uszkodzeń i warunków pracy – rys. 77.



Rys. 77. Wykres funkcji intensywności uszkodzeń (krzywej „wannowej”) dla różnych warunków pracy obiektu

Jak wynika z rys. 77, funkcja ryzyka  $\lambda(t)$  przybiera charakterystyczną postać krzywej wannowej, na której można wyróżnić trzy okresy, związane z określoną intensywnością uszkodzeń [163]:

- przedział I, w którym dominują uszkodzenia powstałe w wyniku wad produkcyjnych i niewłaściwej kontroli jakości. Zużycie wzrasta, ale o coraz mniejszej intensywności. Jest to tzw. wstępny okres eksploatacji, w czasie którego eliminowane są elementy o niższej niezawodności.
- przedział II, w którym obiekt jest po dotarciu i intensywność uszkodzeń ustala się na pewnym stałym poziomie, stąd niezawodność obiektu w całym tym okresie czasu jest dokładnie taka sama,  $\lambda(t) = const$ ,
- przedział III, w którym liczba uszkodzeń na skutek starzenia się obiektu wydatnie wzrasta, stąd krzywa ryzyka przybiera trend rosnący. Punkty zmiany trendu na tej krzywej zależą od charakteru obciążenia obiektu.



## 8.4. Niezawodność obiektów odnawialnych

*Teoria odnowy* – dział rachunku prawdopodobieństwa, zajmujący się opisem zdarzeń w czasie, których odstępy między zdarzeniami (zwanymi odnowami) mają dowolny rozkład. Bada zaistniałe zdarzenia, czyli uszkodzenia. *Teoria niezawodności* opiera się na teorii prawdopodobieństwa i na zasadach statystyki matematycznej. Teoria ta opisuje zdolność wykonania zadania przez obiekt

Kiedyś te dwie teorie traktowano jako oddzielne (np. podstawowy podręcznik z lat 70. dotyczący niezawodności B. Kopycińskiego nosił tytuł „Zarys teorii odnowy i niezawodności”). Nie było dobrze rozpoznane jeszcze zachowanie się obiektów podczas eksploatacji i występował trend na minimalizację napraw. Podstawową była analiza funkcji uszkodzeń  $F$ , stąd istotną była teoria odnowy.

Współcześnie nastąpiła zmiana tego trendu. Teoria i praktyka eksploatacji nastawia się na maksymalizację użyteczności, stąd podstawą staje się analiza funkcji niezawodności  $R$ . Tym samym dominuje teoria niezawodności.

Przez obiekt odnawialny rozumie się w najprostszym przypadku maszynę lub inne urządzenie techniczne składające się z  $n$  elementów, w którym element po uszkodzeniu może być odnawialny, czyli może być przywrócona jego pierwotna zdolność użytkowa. Pojęcie „odnowa” jest pojęciem pokrewnym pojęciu „obsługa”, ale niesłuszne jest utożsamianie ze sobą tych dwóch pojęć.

Odnowa (odnowienie obiektu) w eksploatacji rozumiana jest jako *cel działania* (co zrobić?), a obsługa jest *sposobem działania* (jak to zrobić?). W tym kontekście rozróżnia się [130]:

- odnowę potencjału eksploatacyjnego,
- odnowę zasobu pracy użytecznej (resursu eksploatacyjnego),
- odnowę stanu zdatności.

Odnowę potencjału eksploatacyjnego obiektu można uzyskać przez:

- obsługę obiektu, np. naprawę (doraźną, planową, itp.),
- wymianę danego egzemplarza obiektu lub elementu na nowy.

Stąd, mówimy o naprawie w przypadku, gdy odnowienie powoduje zmianę stanu niezawodnościowego obiektu [162]. Prawdopodobieństwo przywrócenia sprawności obiektowi w określonym czasie  $(0, t)$  jest miarą naprawialności. W przypadku ogólnym naprawialność zależy od właściwości samego obiektu i od warunków, w jakich przywraca mu się sprawność [81].

Proces odnowy jest procesem wymuszonym, lecz może również zachodzić samoczynnie, np. w wyniku działania naturalnych procesów fizycznych. Wyróżnia się [162]:

- *odnowienie proste* – jest to działanie, w wyniku którego zużyte urządzenia zastępowane są przez taką samą liczbę identycznych urządzeń,
- *odnowienie rozszerzone* – w danym okresie wprowadza się do zbiorowości liczbę nowych urządzeń większą niż liczba wycofanych.

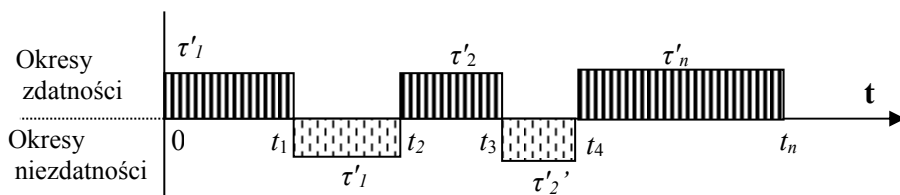
Ponadto, rozróżnia się dwa przypadki odnowy [158]:

- wprowadzenie obiektów z pomijalnym czasem odnowy,
- wprowadzenie obiektów ze skończonym (określonym) czasem odnowy.

W praktyce eksploatacyjnej maszyny zalicza się z reguły do obiektów odnawialnych o określonym czasie odnowy. Obejmuje on następujące składniki:

- czas potrzebny na stwierdzenie uszkodzenia,
- czas diagnostyki,
- oczekiwania na naprawę,
- czas naprawy,
- czas kontroli po naprawie.

Postać realizacji procesu pracy obiektu z określonym czasem odnowy  $\tau''$  pokazano na rys. 78.



Rys. 78. *Graficzna postać eksploatacji obiektu o określonym czasie odnowy*

Obiekt po przepracowaniu  $\tau_1'$  uległ uszkodzeniu i jest naprawiany lub wymieniany w czasie  $\tau_1''$ . Czas pobytu obiektu w obszarze zdatności i obszarze niezdatności jest zmienną losową, czyli zarówno czasy  $\tau_1'$  i  $\tau_1''$ , jak i odpowiadające im następne okresy są zmiennymi losowymi.

Chwile  $t_1, t_3, \dots, t_n$  są chwilami uszkodzeń, chwile  $t_2, t_4, \dots, t_m$  są chwilami zakończenia odnowień. Przejście obiektu z obszaru zdatności w obszar niezdatności może nastąpić przy tym w wyniku trzech różnych aspektów [163]:

- uszkodzenia,
- końca dnia pracy,
- zabiegu konserwacyjnego.

Suma czasów pracy  $t_p = t_1 + t_3 + \dots + t_n$

oraz

suma czasów odnowy  $t_0 = t_2 + t_4 + \dots + t_m$ .

Stąd:

$$t_p + t_0 = t_{po} \quad . \quad (28)$$

Utworzone ciągi zmiennych losowych  $t_p$ ,  $t_0$  i  $t_{po}$  mają następujące rozkłady:

$$p(t_p < t) = F_n(t), \quad (29)$$

$$p(t_0 < t) = G_n(t), \quad (30)$$

$$p(t_{po} < t) = \varphi_n(t) \quad (31)$$

Podstawową charakterystyką opisanego procesu jest funkcja gotowości  $k_g(t)$

$$k_g(t) = \sum_i p(A_n), \quad (32)$$

gdzie  $A_n = (t_n'' < t < t_{n-1}')$  i oznacza, że do chwili  $t$  zaszło  $n$  uszkodzeń obiektu.

Po zastosowaniu tzw. węzłowego twierdzenia odnowy otrzymuje się:

$$k_g(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} k_g(t_0) = \frac{1}{E(\tau_n') + E(\tau_n'')} \int_0^{\infty} [1 - F(x)] dx = \frac{E(\tau_n')}{E(\tau_n') + E(\tau_n'')} \quad . \quad (33)$$

Tak więc współczynnik gotowości jest średnim udziałem czasu, w którym element przebywa w stanie zdatności. Inne ważne charakterystyki niezawodności obiektu odnawialnego to [163]:

- liczba uszkodzeń  $v_1(t)$  w przedziale czasu  $[0, t]$ ,
- liczba odnowień  $v_2(t)$  w przedziale czasu  $[0, t]$ .

Wartości  $v_1(t)$  oraz  $v_2(t)$  różnią się od siebie tylko o 1. Dla  $t \rightarrow \infty$  różnicę tę można pominąć i rozpatrywać tylko jedną z nich, np.  $v_2(t)$ . Oznaczając średni czas okresów sprawności jako  $u$  oraz średni czas okresów niesprawności jako  $v$ , współczynnik gotowości  $k_g$  przyjmie przybliżoną już wcześniej postać:

$$k_g = \frac{u}{u + v} \quad . \quad (34)$$

Współczynnik gotowości  $k_g$  określa ilościowo ważną cechę obiektu naprawialnego jaką jest *dyspozycyjność*. Cecha ta może być rozumiana jako efektywność wykorzystania danego środka technicznego [81].

## 8.5. Ilościowy rachunek niezawodności

Niezawodność obiektu technicznego – z powodu złożoności procesów i oddziaływań wzajemnych – może być wyznaczana jedynie z nieodłącznym udziałem metod eksperymentalnych, polegających na gromadzeniu danych z eksploatacji o zaistniałych usterkach i uszkodzeniach, lub z celowo zaprogramowanych badań niezawodnościowych (badania laboratoryjne) [85]. W tego rodzaju badaniach musi jednak istnieć podobieństwo postaci uszkodzeń dla warunków normalnych i przyspieszonych.

Niezależnie od sposobu podejścia przy chęci wyznaczenia ilościowych miar niezawodności, potrzebne jest pobranie, w sposób losowy,  $n$ -elementowej próbki, a następnie wyznaczenie rozkładu interesujących nas zdarzeń lub wartości cechy na każdym elemencie próbki. Następnie należy przystąpić do oszacowania na podstawie próby (teoria estymacji), do jakiej klasy rozkładów zdarzeń należy badany rozkład zbiorowości generalnej (populacji) i obliczenie nieznanych parametrów tego rozkładu. W końcowej części wnioskovania nieodzowne jest zweryfikowanie (teoria wnioskovania statystycznego), czy przyjęte wcześniej hipotezy statystyczne, dotyczące relacji  $T$  do  $t$ , były słuszne [81].

Podstawową cechą niezawodności jest zatem posługiwanie się językiem prawdopodobieństwa i statystyką matematyczną. Takie podejście wynika z samej natury zjawisk fizyko-chemicznych uszkodzeń powstających w obiekcie i określonym przedziale czasu ( $0-t$ ). Z powyższego wynikają zalecenia dla konstruktorów i technologów w zakresie niezawodności. Od konstruktora wymagać należy np. opracowania, które uwzględniałoby wpływy wszystkich czynników zewnętrznych i spełniało warunek [102]:

$$p\{R(t) \geq R_g\}_\alpha \geq \beta \quad (35)$$

gdzie:

- $R_g$  – określona wartość niezawodności wynikająca z przeznaczenia, wzięta przy danym (dopuszczalnym) poziomie ryzyka  $\alpha$  (patrz wykres Olpińskiego s. 202),
- $\beta$  – niezbędny poziom ufności (pewności) działania urządzenia.

W technice tradycyjnej zwyczajowo zakłada się ryzyko minimalne  $\alpha = 0,01$  i wówczas pewność działania urządzenia winna być na poziomie nie mniejszym niż 0,99. Dopuszcza się też większe ryzyko uszkodzeń ( $\alpha = 0,05$ ) i wówczas minimalny poziom niezawodności nie może być mniejszy niż 0,95; czyli  $R(t) \geq R_g = 0,95$  [133].

W technice nowoczesnej, związanej np. z przemysłem nuklearnym, czy lotniczym, takie ryzyko uszkodzeń nie jest do przyjęcia. Akceptowalny poziom bezawaryjnej pracy urządzenia wynosi  $\beta \approx 0,000005$ . Stąd minimalny poziom niezawodności zbliżony jest do bariery niezawodności  $R_g$ , 0,999997, czyli wartości granicznej, uzyskiwanej z najdoskonalszych procesów wytwarzania.

Punktem wyjściowym do ilościowej oceny niezawodności jest zwykle niezgodność rzeczywistego okresu trwałości  $T$  obiektu z założonym dla niego czasem oczekiwanej pracy  $t_m$ , przy czym często przesuwają się akcent z poznania tego, jaką trwałość  $T$  ma dany obiekt na to, jaki obiekt z danego zbioru ma daną trwałość. W budowie maszyn, przykładowo dla toczenia, przyjmuje się, że  $t_m$  jest to czas maszynowy, który może być wyznaczony według zależności

$$t_m = \frac{L}{n \cdot p_s} \quad (36)$$

przy czym:

- $L$  – długość drogi narzędzia, np. długość wałka toczonego na tokarce [mm],
- $n$  – zastosowane obroty [obr/min],
- $p_s$  – przyjęty posuw [mm/obr]

Ogólnie biorąc mogą zaistnieć trzy przypadki relacji między  $T$  oraz  $t_m$ .

1. Kiedy okres trwałości  $T$  jest mniejszy od założonego czasu  $t_m$ , czyli  $T < t_m$ ,
2. Kiedy okres trwałości  $T$  jest większy od założonego czasu  $t_m$ , czyli  $T > t_m$ ,
3. Kiedy okres trwałości  $T$  dokładnie odpowiada wartości  $t_m$ , czyli  $T = t_m$ .

*Przypadek 1.* jest niedopuszczalny. Obiekt pracował krócej niż przewidywano i nie wykonał zadania określonego czasem  $t_m$  (zawiodł nas). Taki przypadek wskazuje na problem techniczny i potrzebę działań modernizacyjnych w systemie działania.

Można to wykonać na jeden z trzech sposobów:

- a) zwiększyć trwałość obiektu  $T$ ,
- b) zmniejszyć żądany czas pracy obiektu  $t_m$ ,
- c) zmniejszyć czas zadania  $t_m$ , jednocześnie wydłużając okres trwałości  $T$ .

*Przypadek 2.* jest dopuszczalnym stanem systemu działania i w istocie praktycznie realizowalnym. Ze względu na nieznaną trwałość obiektu zwykle bowiem przyjmuje się większą trwałość, np. bierze się więcej paliwa do zbiornika samochodu niż wynikałoby to z obliczeń. Inżynierskie działania w tym zakresie polegają na optymalizacji w kierunku zrównania czasów  $T$  oraz  $t_m$ .

*Przypadek 3.* jest najkorzystniejszy, ale rzadko kiedy osiągany w praktyce. Tego stanu ( $T = t_m$ ) poszukuje nauka i w tym kierunku prowadzone są różne prace doświadczalne i eksperymenty symulacyjne. Jest to stan optymalny i działania inżynierskie w tym zakresie można określić słowem „*tak trzymaj*”, bo każda zmiana prowadzi będzie do pogorszenia niezawodności.

Niezawodność obiektu technicznego nie zależy tylko od relacji tych dwóch zmiennych ( $T$  i  $t_m$ ), ale także od zmienności (rozrzutu). okresów trwałości  $T$  dla poszczególnych obiektów należących do określonego zbioru Wyczerpującą charakterystyką prawidłowości statystycznej zmiennej losowej  $T$  dla tego zbioru jest rozkład teoretyczny (model zjawiska masowego), który ustala związek między możliwymi wartościami tej zmiennej i odpowiadającymi im prawdopodobieństwami (zagadnienie to będzie omawiane w następnym rozdziale).

Znając średnią trwałość obiektu  $\bar{T}$  i jego części składowych można w sposób racjonalny prowadzić gospodarkę w zakresie wyposażenia obiektów w części zapasowe, produkowania wyłącznie potrzebnych części zamiennych, stosowania racjonalnych wymian profilaktycznych części, ustalania optymalnej trwałości obiektów, planowania odzysku części deficytowych o dużej trwałości itp.

Również zabiegi remontowo-konserwacyjne maszyn powinny być planowane i wykonywane w okresach wynikających ze średniej trwałości najbardziej odpowiedzialnego elementu lub podzespołu maszyny. Trwałość tę można wyznaczyć wg następującego wzoru [18]:

$$\bar{T} = k \cdot T_e \quad (37)$$

Występujący tu współczynnik  $k$  kumuluje zagrożenie wynikające z warunków otoczenia, w którym zainstalowana jest dana maszyna, natomiast  $T_e$  jest oczekiwaną trwałością danego układu lub elementu w warunkach wzorcowych ( $k = 1$ ).

Wartości współczynnika  $k$  dla różnych warunków instalacji elementu oraz zalecane wartości  $T_e$  (minimalną, maksymalną i średnią) dla warunków wzorcowych podane zostały zestawione w pracy [130]. Z uwagi na dalsze rozważania, interesującą nas charakterystyką zmiennej losowej  $T$  jest jej rozkład. Określa on bowiem z jakim prawdopodobieństwem zmienna losowa przyjmuje poszczególne wartości z przedziału  $T_{min} - T_{max}$ . Rozkład zmiennej losowej może być (patrz rys. 48, rozdz. 5.3.):

- *dyskretny*, jeżeli zmienna losowa jest wynikiem konkretnego eksperymentu (z próbki),
- *ciągły*, jako wynik uogólnienia i opisu określonym modelem (typem) rozkładu. Ten nas interesuje jako opis zdarzeń w populacji.

## 8.6. Podsumowanie

Rozdział 8. obejmuje podstawowe zagadnienia związane z teorią niezawodności. Przedstawiono tu pojęcie i istotę niezawodności oraz jej relację względem takich pojęć, jak: jakość i bezpieczeństwo. Szczególną uwagę zwrócono na pojmowanie niezawodności w ujęciu inżynierskim (wartościowo-normatywnym). Podano cele, jakie stawiane są przed teorią niezawodności oraz zakres jej praktycznego zastosowania we wszystkich etapach życia maszyny. Zagadnienia niezawodności stanowią kompleks wielowymiarowych zagadnień, teoretycznych i praktycznych, obejmujących kolejne etapy jej życia:

- *badania* – budowa modeli matematycznych badanych zagadnień,
- *projektowania* – identyfikacja i optymalizacja struktury,
- *wykonawstwa* – zagadnienia jakości wykonania,
- *eksploatacji* – ustalanie międzynaprawczych okresów pracy maszyny.

Jednym z podstawowych osiągnięć teorii niezawodności jest sformalizowanie pojęć związanych z funkcją niezawodności. Określono istotę tej funkcji, warunki, jakie należy spełnić, aby móc wyznaczyć tę funkcję, oraz matematyczną postać tej funkcji. Pokazano także związek pomiędzy funkcją niezawodności  $R$  oraz zawodności  $F$ , określaną jako dystrybuanta uszkodzeń.

Maszyny ogólnie można poklasyfikować na dwie grupy: jako obiekty nieodnawialne (nienaprawialne) oraz odnawialne (naprawialne). Omówiono zatem podejście do wyznaczania niezawodności odrębnie dla obu tych grup. Podano podstawowe wskaźniki, jakie są stosowane do opisu ilościowego niezawodności obiektów nieodnawialnych oraz dla obiektów odnawialnych. W tym ostatnim przypadku bardziej szczegółowo omówiono pojęcie gotowości oraz jej ilościowej miary, jaką jest współczynnik gotowości.

Omówiono ilościowy rachunek niezawodności, wskazując na fakt, że z uwagi na złożoność procesów i oddziaływań wzajemnych wielu czynników biorących udział w procesie eksploatacji maszyn, najbardziej pewną informację o niezawodności uzyskuje się z badań eksploatacyjnych. Podstawową cechą teorii niezawodności jest stosowanie rachunku prawdopodobieństwa. W tym celu potrzebne jest pobranie, w sposób losowy,  $n$ -elementowej próbki, a następnie wyznaczenie rozkładu interesujących nas zdarzeń. Następnie należy przystąpić do oszacowania, na podstawie próby (teoria estymacji), do jakiej klasy rozkładów zdarzeń należy badany rozkład zbiorowości generalnej (populacji) i obliczenie nieznanych parametrów rozkładu. W końcowej części nieodzowne jest zweryfikowanie słuszności przyjętych hipotez statystycznych.

# 9. PROGNOZOWANIE NIEZAWODNOŚCI

## 9.1. Metodyka prognozowania niezawodności

Powszechnie zakłada się, że obiekt techniczny będzie przydatny do pracy przez „dostatecznie długi” czas. Sąd o tym: „*jaki to może być ten czas*”? wysuwa się na podstawie mniej lub bardziej logicznych przesłanek. *Użytkownik* jakiegos obiektu technicznego opiera się np. na opinii innych posiadaczy takich obiektów (rankingi, wywiady, ankiety itp.).

*Inżynierski sąd o niezawodności* nie polega na biadoleniu, że stała się katastrofa (awaria), lecz na umiejętności przewidywania czy założone zadanie zostanie wykonane. Postępowanie takie nazywa się prognozowaniem [99].

Prognozowanie to „*racjonalne, naukowe przewidywanie przyszłych zdarzeń*” [156]. Z definicji tej wynika, że jest to sąd o określonym zdarzeniu w czasie, charakteryzujący się tym, że:

- odnosi się do ustalonego czasu w przyszłości,
- sformułowany jest na podstawie zaakceptowanej przez naukę metody postępowania,
- jest akceptowalny, choć niepewny,
- jest weryfikowalny empirycznie,
- podstawą wydania sądu jest ujęcie matematyczne oparte na statystyce.

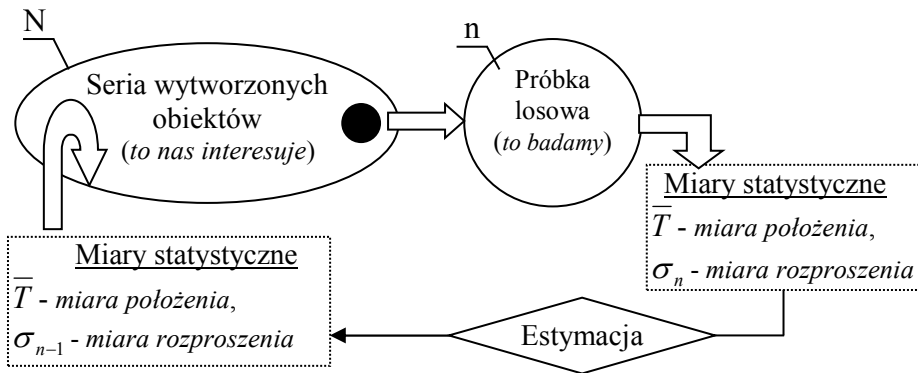
Prognozowanie można określić jako *naukowe*, jeżeli w postępowaniu badawczym korzysta się z dorobku nauki, w tym zwłaszcza statystyki [157]. Prognozą statystyczną nazywa się każdy sąd, którego prawdziwość jest zdarzeniem losowym, przy czym prawdopodobieństwo tego zdarzenia jest znane i wystarczająco duże dla celów praktycznych [47].

Prognozowanie można nazwać *racjonalnym*, jeżeli wnioskowanie opiera się na interpretacji logicznej przesłanek wynikających ze zgromadzonych faktów. W sensie metodologicznym oczekuje się od prognoz przede wszystkim sprawdzalności. W praktyce nie zawsze się to potwierdza. Nie jest to tak nawet ważne, bowiem prognozy „wyprzedzając czas” dostarczają informacji, przez co mogą pełnić funkcje ostrzegawcze bądź ukierunkowujące pewne działania.

Prognozowanie matematyczno-statystyczne niezawodności odbywa się na podstawie badań wrywkowych. Diagnozuje się grupę obiektów danego typu (próbkę o liczności  $n$ ), a następnie dokonując estymacji przeliczkuje wyniki



z próbki na całą zbiorowość badanych obiektów (populację o licznosci  $N$ ). W wyniku takiego postępowania powstaje prognoza statystyczna, dotycząca stanów obiektu, które mogą wystąpić w przyszłości, a prognozowanie tego rodzaju nazywa się *metodą analogii statystycznej* – rys. 79.



Rys. 79. *Metoda analogii statystycznej w badaniach wyrywkowych*

Schemat postępowania przedstawiony na rys. 79 jest podstawą metodyki badań wyrywkowych. Pod pojęciem „*metodyka*” rozumieć należy ustandaryzowane dla wybranego obszaru podejście do rozwiązywania problemów, pokazujące „*jak to robić*”? [67]. Jest to zatem wiedza procesowa, która stanowi zespół wytycznych, dotyczących sposobów postępowania, efektywnych ze względu na określony cel.

Celem prognozowania niezawodności jest określenie prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy obiektu, czyli wyznaczenie funkcji niezawodności  $R(t_m)$ . Procedura postępowania w tym zakresie jest następująca [133]:

1. Wybrać próbkę losową o licznosci  $n$  z partii obiektów o jednakowej charakterystyce.
2. Przeprowadzić badania trwałości  $T$  tych obiektów w określonych warunkach  $x$ .
3. Wyznaczyć miary statystyczne wyników z próbki: średnią arytmetyczną  $\bar{T}$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma_n$ , gdzie  $n$  jest liczebnością próbki.
4. Dokonać przeszacowania wyników z próbki na populację, biorąc pod uwagę, że:
  - wartość średnia dla populacji  $\bar{T}_N$  jest tożsama z wartością średnią dla próbki  $\bar{T}_n$

$$\bar{T}_N \equiv \bar{T}_n, \quad (38)$$

- odchylenie standardowe dla populacji  $\sigma_{n-1}$  opisywane jest wzorem

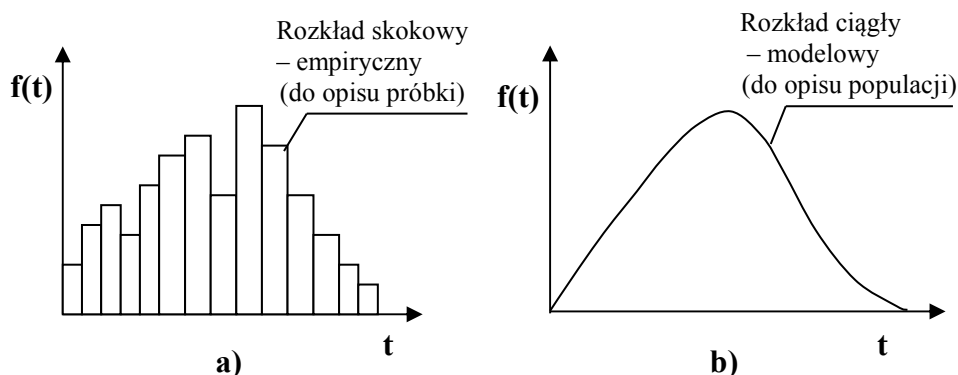
$$\sigma_{n-1} = \sigma_n \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (39)$$

5. Sprawdzić (określić) najbardziej prawdopodobny typ (model) rozkładu uszkodzeń (według procedur podanych w kolejnych podrozdziałach).
6. Z tablic danego rozkładu modelowego (zamieszczonych w załączniku) wyznaczyć wartość dystrybuanty uszkodzeń, czyli funkcję  $F(t_m)$ .
7. Z zależności  $1 - F(t_m)$  wyznaczyć prognozę poprawnej pracy obiektu  $R(t_m)$  dla założonego czasu pracy  $t_m$ .
8. Dokonać usprawnienia, jeżeli uzyskana wartość  $R(t_m) \leq 0,95$ .

Próbkowanie ma dwa bardzo ważne cele dotyczące opisu statystycznego [5]:

- *estymację (punktową lub przedziałową)*, czyli uzyskanie miar statystycznych dotyczących populacji,
- *weryfikację hipotez* – przybliżenie charakteru rozkładu zmiennej losowej.

Każda zatem próba wnioskowania o niezawodności obiektu metodą analogii statystycznej będzie oparta na pewnym uproszczonym modelu opisującym rozkład zmiennej losowej. Rozkłady takie są pewnymi modelami matematycznymi, które wynikają ze zbioru założeń, jakie czyni się odnośnie do doświadczeń losowych. Stanowią one szczególny opis tego, co się dzieje w danej zbiorowości. Zanim więc zaistnieje możliwość dokonania rzetelnej prognozy, konieczne jest znalezienie „najlepszego” modelu, który opisywałby najdokładniej zgromadzone dane empiryczne. Wyróżnia się dwa typy rozkładów: skokowy i ciągły – rys. 80.

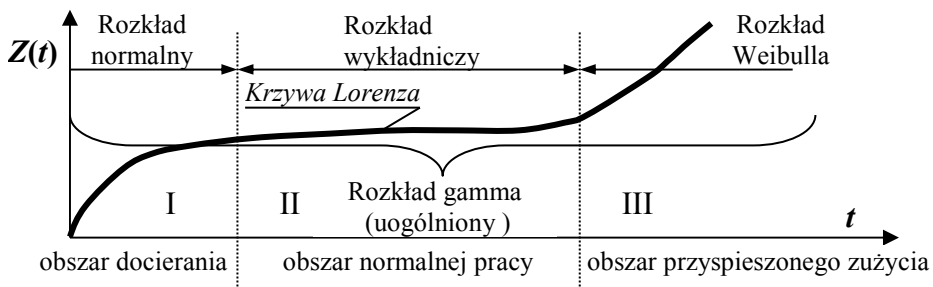


Rys. 80. Charakter rozkładów opisujących zmienną losową:  
a) skokowy w próbce, b) ciągły w odniesieniu do populacji

## 9.2. Prognozowanie według rozkładu normalnego

Prognozowanie w nauce opiera się na regułach statystyki matematycznej. Statystyka matematyczna zajmuje się zasadami i metodami uogólniania wyników próby losowej na całą badaną zbiorowość statystyczną [40]. Podstawą tych uogólnień są znane z rachunku prawdopodobieństwa rozkłady zmiennych losowych (modele), które wykorzystuje się do określenia rozkładów prawdopodobieństwa statystyk z próby.

Znaczenie poszczególnych rozkładów – modeli nie jest jednakowe, dlatego niektóre są znane i używane powszechnie, inne zaś znane są specjalistom i używane sporadycznie. Poniżej zostaną omówione tylko 4 podstawowe modele rozkładów, stosowanych w prognozowaniu niezawodności. Każdy z nich aproksymuje fragmentaryczną część zdarzeń, opisywanych krzywą Lorentza  $Z(t)$  – rys. 81 [133].



Rys. 81. *Charakterystyczne modele uszkodzeń (typy rozkładów prawdopodobieństw) na krzywej zużycia* [133]

Jeżeli tylko elementy maszyny zostały wykonane i zmontowane poprawnie, w początkowym przedziale czasu (I) prawdopodobieństwo ich uszkodzenia w jednostce czasu jest niewielkie [12]. Zużywanie powstające na tym etapie jest wynikiem stopniowo zachodzących nieodwracalnych zmian, będących efektem docierania się elementów. Odpowiednim modelem opisu czasu zdatności  $T$  obiektu w takim przypadku jest *rozkład normalny*. Jest to rozkład jednodomalny, dwuparametryczny  $N(\bar{T}, \sigma_{n-1})$  o parametrach:

- wartość średnia  $\bar{T}$  (*miara położenia*), która oznaczana będzie dalej jako  $u$ , czyli  $\bar{T} \equiv u$ ,
- odchylenie standardowe  $\sigma_{n-1}$  (*miara rozproszenia*).

Wartość średnia  $u$  decyduje o przesunięciu wykresu w lewo lub prawo.

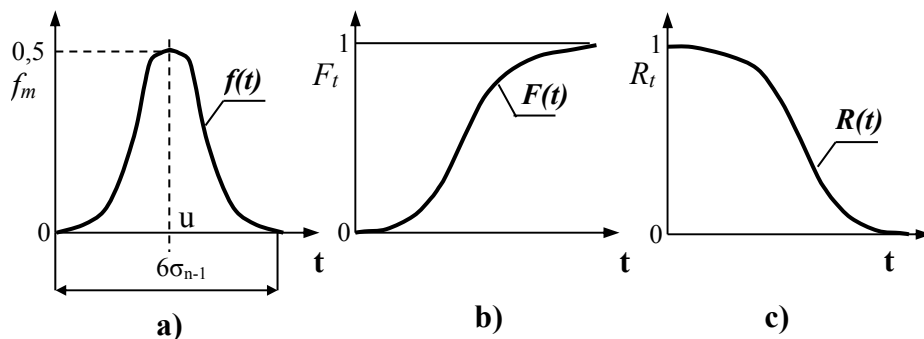
Odchylenie standardowe decyduje o smukłości rozkładu. Im mniejsze  $\sigma_{n-1}$ , tym jest on smuklejszy – to oznacza większą jednorodność populacji.

Rozkład normalny (od nazwiska odkrywcy nazywany też rozkładem Gaussa, a od kształtu „krzywą dzwonową”) występuje wówczas, gdy wartość zmiennej losowej ciągłej jest wynikiem dużej liczby równorzędnych oddziaływań. W praktyce dla celów technicznych można przyjąć, że rozkład normalny jest słuszny do opisu danych, jeżeli współczynnik zmienności  $\nu$  wynosi [133]:

$$\nu = \frac{\sigma_{n-1}}{u} \leq 0,33. \quad (40)$$

Zgodność z tym rozkładem wykazuje wiele wyników pomiarów fizycznych i to zarówno, gdy rozrzut wyników powodowany jest błędami pomiaru, jak i zmiennością samego zjawiska [85]. Wiele zjawisk fizycznych, choć nie podlega rozkładowi normalnemu, może być opisanych za pomocą tego rozkładu, po transformacji. Przykładowo czas zdatności niektórych maszyn jest zmienną losową o dodatnim współczynniku asymetrii. Gdy jednak będziemy rozpatrywać logarytm takiej zmiennej, to okaże się, że ma ona rozkład normalny.

Charakter przebiegu funkcji opisujących rozkład normalny przedstawia rys. 82.



Rys. 82. Charakterystyki rozkładu normalnego:

a) gęstość prawdopodobieństwa, b) dystrybuanta trwałości, c) funkcja niezawodności

Rozkład normalny posiada swoje charakterystyczne cechy [5]:

- symetryczność, która oznacza, że kształt rozkładu jest ściśle symetryczny względem wartości średniej, czyli  $f(+u) = f(-u)$ ,
- funkcja gęstości  $f(t)$  jest jednoznacznie określona przez dwa parametry: wartość średnią  $u$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma_{n-1}$ ,

- punkty przegięcia funkcji gęstości występują przy wartościach zmiennej losowej równych  $u - \sigma_{n-1}$  oraz  $u + \sigma_{n-1}$ ,
- wszystkie wartości zmiennej znajdą się w przedziale od  $-\infty$  do  $+\infty$ ,
- w przedziale  $u \pm \sigma_{n-1}$  mieści się 68,27% wartości zmiennej,
- w przedziale  $u \pm 2\sigma_{n-1}$  mieści się 95,45% wartości (*reguła  $2\sigma$* ),
- w przedziale  $u \pm 3\sigma_{n-1}$  mieści się 99,97% wartości (*reguła  $3\sigma$* ).

Z wyników próbkowania, a następnie estymacji mamy dane  $u$  oraz  $\sigma_{n-1}$ . Analizy dotyczące prognozowania niezawodności warto zawsze rozpoczynać od sprawdzenia czy jest to rozkład normalny, ponieważ ze względu na jego symetryczność upraszczają się obliczenia. Wystarczy bowiem znać przebieg połowy krzywej  $f(t)$ , a druga jest identyczna, tylko ze zmienionym znakiem.

Aby obliczyć (do prognozy) położenie dowolnego punktu  $p_m$  na krzywej  $R(t)$  należy mieć dany czas  $t_m$ , dla jakiego stawiamy prognozę oraz wartość funkcji  $R(t_m)$ . Wartość tę wyliczamy ze wzoru  $R(t_m) = 1 - F(t_m)$ , natomiast  $F(t_m)$  wyznaczamy na podstawie tablic standaryzowanego rozkładu normalnego  $N(0, 1)$ , zamieszczonych w załączniku 1. Chcąc skorzystać z tej tablicy należy znać wartość zmiennej standaryzowanej  $u_m$ , którą wyznacza się z zależności [123]:

$$u_m = \frac{t_m - u}{\sigma_{n-1}} . \quad (41)$$

Dla obliczonej wartości  $u_m$  (do drugiego miejsca po przecinku) odszukuje się w tablicy dystrybucji rozkładu normalnego (dostępnej też w każdej książce ze statystyki) prawdopodobieństwo uszkodzeń, czyli tego, co się zdarzyło przed momentem czasowym opisanym jako  $t_m$ .

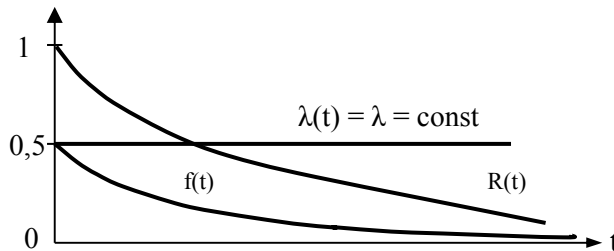
Pole pod krzywą  $F(t)$ , to obraz zmian dotyczących natężenia uszkodzeń analizowanych obiektów wraz z upływem czasu  $t$ . Pole pod funkcją niezawodności  $R(t)$ , zgodnie z wcześniej podaną zależnością  $R(t) = 1 - F(t)$ , pokazuje natomiast prawdopodobieństwo funkcjonowania obiektu zgodnie z wymaganiami. Wynika więc z niego, że na początku okresu pracy wszystkie obiekty są sprawne, ale ich liczba maleje ze wzrostem czasu.

Często występuje konieczność wyznaczenia prognozy niezawodności w pewnym zakresie czasu, np.:  $t_1 - t_2$ . W takim przypadku należy wyznaczyć wartości prawdopodobieństw dla punktów  $p_1$  i  $p_2$ , a następnie obliczyć ich różnicę, czyli  $\Delta p = (p_2 - p_1)$ . Procedura postępowania dla każdego (dowolnego!) punktu jest identyczna.

### 9.3. Prognozowanie wg rozkładu wykładniczego

Posługując się przy badaniu niezawodności złożonym aparatem matematycznym stale trzeba pamiętać, że efekty takiego postępowania w znacznym stopniu zależą od spełnienia określonych założeń metody oraz od przyjętych do obliczeń stałych wielkości wyjściowych (warunki pracy  $x$  oraz oczekiwany czas pracy  $t_m$ ). Sytuacja praktyczna nie zawsze odpowiada ściśle tym założeniom, a przyjmowane do obliczeń wartości ( $u$ ,  $\sigma_{n-1}$ ) ulegają zmianom i w znacznej liczbie przypadków nie mogą być ściśle wyznaczone. Z tego względu analiza niezawodności obiektu opiera się raczej na pewnej konstrukcji modelowej, niż na ścisłym obrazie rzeczywistości [12].

Modelem najlepiej opisującym charakter uszkodzeń obiektów znajdujących się w okresie ich normalnej pracy jest rozkład wykładniczy [133]. Jest to rozkład jednoparametryczny, opisywany intensywnością uszkodzeń  $\lambda$ . Do jego wyznaczenia wystarczy znajomość tylko jednego parametru, jakim jest średnia wartość trwałości  $u$  (pamiętamy, że  $u = \bar{T}$ ). Charakter przebiegu głównych funkcji (wskaźników niezawodności) tego rozkładu pokazano na rys. 83 [56].



Rys. 83. *Charakter przebiegu funkcji opisujących rozkład wykładniczy* [56]

Rozkład wykładniczy odznacza się właściwością, która nazywa się brakiem pamięci, a polega na tym, że prawdopodobieństwo zdatności obiektu jest niezależne od tego, jak długi był okres jego użytkowania. Innymi słowy, obiekt używany jest tak samo niezawodny jak obiekt nowy [97].

Do celów praktycznych można przyjąć, że rozkład wykładniczy występuje wówczas, jeżeli  $u \approx \sigma_{n-1}$ . Ponieważ dla tego typu rozkładu intensywność uszkodzeń  $\lambda$  jest stała, czyli  $\lambda(t) = const$ , stąd słuszna jest zależność, że [133]:

$$\lambda = \frac{1}{u} \quad [1/\text{godz. lub } 1/10^6 \text{ godz.}] \quad (42)$$

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

$$u = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt . \quad (43)$$

ponieważ w czasie  $dt$  udział bezusterkowego czasu pracy obiektu wynosi  $f(t)$ .

W prognozowaniu niezawodności  $u$  jest po prostu średnią arytmetyczną trwałości badanych obiektów. Wynika z tego, że chcąc wyznaczyć intensywność uszkodzeń  $\lambda$  tego rozkładu, wystarczy określić średni czas użytkowania  $u$  (z badania próbki obiektów), a następnie dokonać zabiegu dzielenia  $1/u$ .

Parametr  $\lambda$  jest jednym z najważniejszych w obszarze niezawodności. Producenci wyznaczają go dla swoich wyrobów i pilnie strzegą przed konkurencją.

Wartość  $\lambda$  określa bowiem jaka część obiektów sprawnych do chwili  $t$  stanie się niesprawna w następnym jednostkowym okresie zmiennej  $t$ , np. w następnej jednostce czasu. Zwykle bada się  $\lambda$  jako liczbę uszkodzeń  $q$ , które wystąpiły w standardowym czasie  $t = 1000$  godzin i wyraża w procentach, tj. [7]:

$$\lambda = \frac{q}{T = 1000} \cdot 100\% . \quad (44)$$

Kiedy możemy założyć, lub przyjąć, że rozkład trwałości może być zamodelowany rozkładem wykładniczym słuszne jest *wykładnicze prawo niezawodności*, z którego wynika, że:

$$R(t) = e^{-\lambda t} . \quad (45)$$

lub po zastosowaniu równania (42):

$$R(t) = e^{-\frac{t}{u}} . \quad (46)$$

Chcąc zatem postawić prognozę niezawodności dla określonego czasu ( $t = t_m$ ) obiektów pracujących w normalnych (projektowanych) warunkach pracy, wystarczy zbadać próbkę tych obiektów, aby wyznaczyć ich średnią trwałość  $u$ , a następnie skorzystać z zależności (45), bądź zależności (46).

Biorąc pod uwagę wcześniejsze rozważania o powiązaniach między wskaźnikami niezawodności otrzymuje się dla rozkładu wykładniczego:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (47)$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (48)$$

Kiedy  $\lambda t \ll 1$ , można przyjąć uproszczenie, że [56]:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \equiv 1 - \lambda t \quad (49)$$

skąd

$$\lambda \equiv \frac{1 - R(t)}{t} \quad (50)$$

co ułatwia obliczenia  $R(t)$ , gdy dane jest  $\lambda$  i odwrotnie.

Powyższe zależności są słuszne dla tych warunków  $x$  pracy obiektu, w których prowadzone są badania trwałości. Zakłada się, że są to warunki laboratoryjne. Intensywności uszkodzeń tych obiektów pracujących w innych warunkach są dziesiątki, a nawet setki razy większe, niż zbadane dla warunków laboratoryjnych. W zależności od warunków eksploatacji –  $\lambda$  zwiększa się  $k$  razy. Stąd istnieje konieczność wprowadzenia tego współczynnika  $k$  do przyjętych warunków środowiska. Uzyskujemy zatem ogólny wzór:

$$R(t) = e^{-\lambda t k} \quad (51)$$

Przyjmowane do obliczeń wartości współczynnika  $k$  podano w tab. 3 [56].

Tab. 3. *Wartości współczynnika  $k$ , określające wpływ warunków pracy na intensywność uszkodzeń* [56]

Warunki eksploatacji	Wartość współczynnika $k$
– w laboratorium klimatyzowanym	1
– w urządzeniach naziemnych	10
– na statku	20
– w samochodzie	30
– w pociągu	40
– w hali zakładu produkcyjnego	50
– w samolocie	100
– w rakiecie	1000

Podane w tablicy wartości współczynnika  $k$  są uogólnione, ale wystarczająco dobrze przybliżają wpływ warunków pracy obiektu na jego niezawodność.

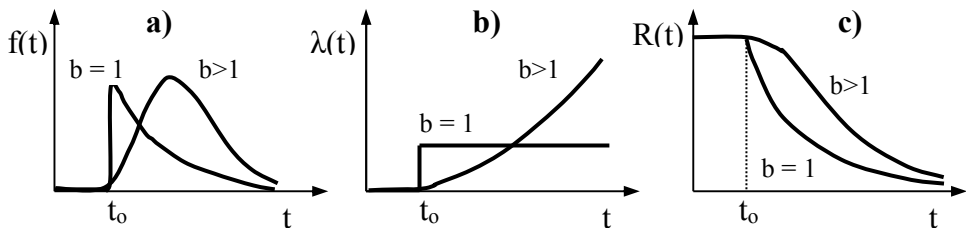


## 9.4. Prognozowanie według rozkładu Weibulla

Rozkład Weibulla jest to ciągły rozkład, stosowany do modelowania sytuacji, gdy prawdopodobieństwo awarii zmienia się w czasie. Jego nazwa pochodzi od nazwiska szwedzkiego badacza *Waloddi Weibulla*, który opracował go i opisał w swoim artykule w 1951 r. Rozkład Weibulla jest bardziej ogólny niż rozkład wykładniczy. Charakteryzuje się zmienną intensywnością uszkodzeń  $\lambda$  (jednak o przebiegu monotonicznym), które, jak pamiętamy, dla rozkładu wykładniczego były stałe. Rozkładem tym opisuje się między innymi trwałość zmęczeniową materiałów i konstrukcji mechanicznych. Stosowanie rozkładu Weibulla jest zalecane wówczas, gdy obiekty przechodzą do stanu niezdatności głównie na skutek zużycia nagłego, katastroficznego (pęknięcia, wyłamania, itp.) [12].

Rozkład Weibulla występuje w dwóch zasadniczych odmianach [85]:

- *dwuparametryczny* (podstawowy), gdzie:  $a$  – parametr skali,  $b$  – parametr kształtu. Parametry te wyznacza się na podstawie nomogramu (załącznik),
- *w postaci trójparametrowej*, z dodatkowym do powyższych parametrem czasu pracy początkowej  $t_0$  – rys. 84 [12].



Rys. 84. *Rozkład Weibulla przy różnych wartościach parametru kształtu* [12]:  
 a) *gęstość prawdopodobieństwa*, b) *intensywność uszkodzeń*, c) *funkcja niezawodności*

W zależności od wartości parametru  $b$ , rozkład Weibulla może mieć różne przebiegi wskaźników niezawodności. I tak [85]:

- dla  $b < 1$ , intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  zmniejsza się, czyli prawdopodobieństwo awarii maleje z czasem. W przypadku modelowania awarii urządzenia mechanicznego sugeruje to, że egzemplarze tego urządzenia mogą posiadać wady fabryczne i powoli wypadają z populacji,
- dla  $b = 1$ , intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  jest stała. Rozkład Weibulla przyjmuje typową postać rozkładu wykładniczego.
- dla  $b > 1$ , intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  rośnie z czasem (przy  $b \approx 4$  przybiera on postać rozkładu normalnego). Sugeruje to starzenie się fizyczne obiektu jako główną przyczynę awaryjności.

Poniżej rozpatrywany będzie przykład prognozowania tylko dla rozkładu dwuparametrycznego (bez czasu początkowego  $t_0$ ). Dla takiego rozkładu (o parametrach  $a$  oraz  $b$ ) gęstość prawdopodobieństwa opisuje zależność [81]:

$$f(t) = \frac{b}{a} \left[ \frac{t}{a} \right]^{b-1} \exp \left[ - \left( \frac{t}{a} \right)^b \right]. \quad (52)$$

intensywność uszkodzeń opisywana jest natomiast równaniem:

$$\lambda(t) = abt^{(b-1)}. \quad (53)$$

Dystrybuantę trwałości opisuje równanie:

$$F(t) = 1 - \exp \left( - \frac{t^b}{a} \right), \quad (54)$$

a funkcję niezawodności zależność:

$$R(t) = \exp \left( - \frac{t^b}{a} \right). \quad (55)$$

Chcąc zatem przeprowadzić prognozowanie dla tego typu rozkładu, należy mieć dane:

- $t_m$  – oczekiwany czas pracy obiektów (indeks „ $m$ ” oznacza, że jest to zakładany czas pracy maszyny; w podanych równaniach wystąpi więc wymiana  $t$  na  $t_m$ ),
- $a$  – parametr skali rozkładu Weibulla (uzyskany z badań próbki),
- $b$  – parametr kształtu rozkładu Weibulla (uzyskany z badań próbki).

Do korzystania z tego rozkładu nieodzowne jest zatem wcześniejsze przeprowadzenie badań określonej próbki obiektów celem ustalenia parametrów  $a$ ,  $b$ .

Aby w prosty sposób obliczyć te parametry rozkładu, korzysta się z siatki wykresu Weibulla (zał. 2) [133]. W tym celu należy najpierw uzyskane wyniki, dotyczące czasu pracy obiektów uszkadzających się w sposób katastroficzny, odpowiednio uporządkować: od minimalnego do maksymalnego – tab. 4 [133].

Przedstawiono w niej fragment tablicy danych dla  $i = 70$  obiektów, objętych badaniami (kolumna 1), z których część uszkadzała się katastroficznie. Oznaczono je znakiem „+”. Istotą postępowania jest wyznaczenie skumulowanej wartości uszkodzeń  $H$ , która stanowi oś poziomą siatki rozkładu Weibulla. Oś pionową natomiast stanowią czasy pracy  $t$ .

Tab. 4. *Porządkowanie danych z badań do korzystania z siatki rozkładu Weibulla* [133]

Nr kolejny <i>i</i>	Nr odwrotny <i>K</i>	Zbadany czas pracy <i>t</i> [jednostki]	Intensywność uszkodzeń [%]	Skumulowana intensywność uszkodzeń <i>H</i> [%]
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	115,500	-	

Aby dojść do wartości  $H$ , zapisanych w kolumnie 5, należy:

1. Dane z badań uszeregować pod względem długości czasu pracy, od najmniejszego do największego, niezależnie czy wystąpiło uszkodzenie, czy nie (kolumna 3).
2. Wyznaczyć wartość liczby  $K$  – jako odwrotność numeru porządkowego  $i$  (kolumna 2).
3. Wyznaczyć intensywność uszkodzeń  $\lambda$ , jako iloraz 100 przez liczbę  $K$ , tylko dla tych obiektów, które się uszkodziły (oznaczonych „+”), np. dla  $i = 6$ ;  $\lambda = 100/65 = 1,54\%$ .
4. Wyznaczyć skumulowaną intensywność uszkodzeń  $H$  (sumę kolejnych  $\lambda$ ).

Uzyskane wartości  $H$  oraz czas pracy  $t$  wykorzystuje się do wyznaczenia położenia prostej regresji, opisującej wyniki na wykresie Weibulla. Dokonuje się tego przez naniesienie punktów na przecięciu wartości  $H$  oraz czasów pracy  $t$  obiektów uszkodzonych katastroficznie (wartości oznaczone jako +). Następnie punkty te aproksymuje się linią prostą. Jeżeli wyniki układają się wg linii prostej, oznacza to, że rozkład Weibulla jest dostatecznie pasujący. Jeżeli daje się zauważyć krzywiznę rozkładu punktów, należy wybrać inny model rozkładu.

Aby określić parametr  $a$ , wykorzystuje się fakt, że dla  $H = 100\%$  odpowiadający czas pracy  $t = a$ . Zatem szukamy na osi poziomej wartości 100 i prowadzimy z niej linię odniesienia do linii aproksymującej wyniki, a następnie odnosimy do osi pionowej i odczytujemy wynik (pamiętając, że przyjęto w tej tablicy zapis z mnożnikiem  $10^3$ ).

W celu uzyskania parametru  $b$  należy prostą doświadczalną przesunąć po wykresie aż do nałożenia jej na punkt weibullowski – lewy górny róg wykresu (wartość  $u = 3$ ). Poszukiwaną wartość parametru  $b$  odczytuje się na dodatkowej skali zamieszczonej u góry wykresu Weibulla.

## 9.5. Prognozowanie według rozkładu gamma

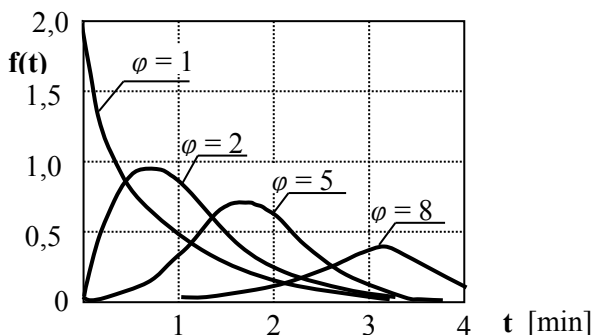
Omawiane dotychczas modele opisu uszkodzeń obiektów (rozkłady) można było przyporządkować dla obiektów znajdujących się w określonej fazie krzywej zużycia (patrz rys. 81). Nie zawsze jednak daje się w sposób wyraźny określić, jakim z tych prostych rozkładów teoretycznych można opisać wyniki badań. Stosuje się wówczas bardziej złożone rozkłady: dwuparametrowy albo wieloparametrowy, choć ze względów pragmatycznych należy unikać takiego działania. Ogólnie wiadomo bowiem, że wraz z liczbą parametrów wzrasta elastyczność postaci rozkładu teoretycznego, co pozwala lepiej dopasować go do danego rozkładu empirycznego, jednocześnie jednak komplikuje się jego postać matematyczna.

Przy potrzebie korzystania z rozkładów złożonych na początek zaleca się zastosowanie rozkładu *gamma* [12].

*Rozkład gamma* odgrywa szczególną rolę przy badaniu obiektów odnawialnych (jakimi w większości przypadków są maszyny i inne urządzenia techniczne). Jest on rozkładem dwuparametrowym o parametrach  $\lambda$  oraz  $\varphi$ , gdzie:

- $\lambda$  – średnia intensywność wystąpienia uszkodzeń,
- $\varphi$  – liczba uszkodzeń koniecznych do powstania niezdatności.

Przebieg funkcji gęstości prawdopodobieństwa przy różnych wartościach  $\varphi$  przedstawiono na rys. 85 [56].



Rys. 85. *Kształt funkcji  $f(t)$  rozkładu gamma dla różnych wartości parametru  $\varphi$  i stałej wartości  $\lambda = 2$  [56]*

Parametry rozkładu gamma można wyznaczyć na podstawie miar probabilistycznych z próbki, czyli średniego czasu pracy  $u$  oraz odchylenia standardo-

wego przeliczonego na populację  $\sigma_{n-1}$ , korzystając z poniższych przekształceń [56]:

$$\lambda = \frac{u}{\sigma_{n-1}^2} \quad (56)$$

$$\varphi = \left( \frac{u}{\sigma_{n-1}} \right)^2 \quad (57)$$

Co bardzo istotne, szczególnymi przypadkami rozkładu gamma są [12]:

- rozkład wykładniczy, gdy  $\varphi = 1$ ,
- rozkład normalny, gdy  $\varphi > 12$ .

Jeżeli występują takie zależności, to przy prognozie niezawodności należy przejść na dany typ rozkładu podstawowego.

W innych przypadkach, chcąc wyznaczyć prognozę niezawodności  $R(t)$  dla obiektów, których uszkodzenia można zamodelować rozkładem gamma o danych parametrach  $\lambda$  oraz  $\varphi$ , postępujemy podobnie jak w przypadku innych wcześniej omawianych rozkładów, czyli w tablicy rozkładu szukamy wartości  $F(t)$ , a następnie korzystamy z zależności  $R(t) = 1 - F(t)$ .

Jedyny kłopot w tej procedurze jest taki, że rozkład gama nie ma swoich tablic. Jest to bowiem tzw. „rozkład kukułczy”, czyli tak jak kukułka korzysta z pracy innych. W tym przypadku jest to rozkład chi-kwadrat ( $\chi^2$ ). Aby skorzystać z tablic rozkładu, należy jednak dokonać „upodobnienia”, czyli przeliczenia parametrów rozkładu gamma na parametry rozkładu chi-kwadrat wg zależności:

$$\chi = 2\lambda \cdot t_m \quad (58)$$

$$r = 2\varphi \quad (59)$$

gdzie  $t_m$  jest to oczekiwany (zakładany) czas pracy obiektu.

Wartości tabelaryczne rozkładu chi-kwadrat zestawiono w tablicy 5 [5]. Dla wartości pośrednich, których nie można bezpośrednio odczytać z tablicy, należy zastosować aproksymację, np. dla:  $\chi = 6$  oraz  $r = 2,5$  będzie to wartość dla  $r = 2$  oraz  $0,5$  różnicy pomiędzy  $r = 2$  i  $r = 3$ ; czyli  $0,950 - 0,031 = 0,919$ .

Tab. 5. Dystrybuanta  $F(t)$  rozkładu chi-kwadrat [5]

$\chi$	$r$	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		0,726	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
$\chi$	$r$	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

## 9.6. Podsumowanie

Rozdział 9. dotyczy modeli probabilistycznych wykorzystywanych do prognozowania niezawodności. Zdefiniowano w nim pojęcie prognozowania, szczególną uwagę zwracając na prognozowanie matematyczno-statystyczne, którego podstawą są badania wyrwykowe. Tego rodzaju prognozowanie nazywa się metodą analogii statystycznej i w teorii niezawodności wykorzystywane jest ono w głównej mierze. Podano zatem schemat postępowania badawczego w tej procedurze postępowania, zwracając szczególną uwagę na potrzebę umiejętności analizy rozkładów zmiennej losowej, będących podstawą predykcji (formułowania prognozy).

Omówiono charakterystyczne typy (modele) zmiennej losowej  $T$ , występujące najczęściej w określonych obszarach krzywej zużycia, podkreślając, że w obszarze docierania (I) najbardziej prawdopodobnym rozkładem uszkodzeń jest rozkład normalny, w obszarze normalnej pracy (II) – rozkład wykładniczy, natomiast w obszarze przyspieszonego zużycia (III) rozkład Weibulla. Ponadto, zmienna losowa  $T$  może być opisywana rozkładem uogólnionym gamma. Rozkład ten jest jednak bardziej złożony i jego stosowanie jest zalecane tylko wówczas, jeżeli występuje trudność opisu zmiennej  $T$  rozkładami podstawowymi.

Podstawą prognozowania niezawodności jest wyznaczenie właściwego modelu rozkładu. Podkreślono, że ze względu na praktyczność należy zawsze rozpoczynać od sprawdzenia czy można badany rozkład opisać modelem rozkładu normalnego. W tym celu sprawdzamy wartość współczynnika zmienności  $\nu$ . Jeżeli wyznaczona wartość jest mniejsza od wartości krytycznej = 0,33, prognozowanie niezawodności można opierać na rozkładzie normalnym. W przeciwnym przypadku należy korzystać z innych rozkładów.

Podano szczegółowe procedury postępowania podczas prognozowania niezawodności według tych rozkładów, zaznaczając kiedy jest najwłaściwsze zastosowanie danego typu rozkładu.

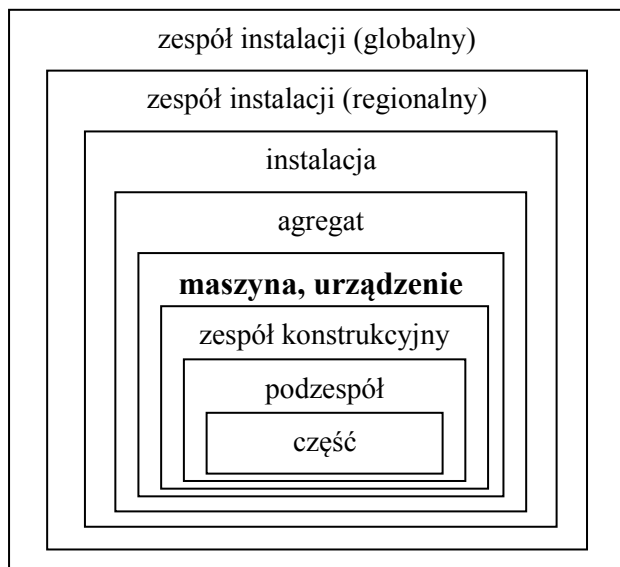
Do praktycznego wyznaczania prognozy na podstawie tych rozkładów potrzebne są odpowiednie tablice lub nomogramy wartości modelowych dystrybucyj  $F(T)$ . Tablice te zostały zamieszczone na końcu podręcznika. Podkreślono, że w każdych tablicach rozkładów znajdują się zawsze wartości uogólnione (modelowe) dla zmiennej  $F(T)$  i chcąc obliczyć wartości funkcji niezawodności  $R(T)$  należy wykorzystać zależność  $R(T) = 1 - F(T)$ .

# 10. NIEZAWODNOŚĆ UKŁADU ZŁOŻONEGO

## 10.1. Modelowanie systemowe struktury układu

W poprzednim rozdziale omawiano niezawodność obiektów technicznych (maszyn i innych urządzeń) w ujęciu obiektowym, traktując je jako proste układy działania, bez wchodzenia w ich wnętrza, traktując je jako „czarne skrzynki”. Obecnie zajrzymy do wnętrza takiej „czarnej skrzynki”. Dla podkreślenia tego odmiennego podejścia w literaturze przedmiotu używa się określenia model „białej skrzynki”, a tego typu ujęcie określa się jako „układ złożony” [12], „niezawodność systemu” [109] lub „niezawodność struktur” [85, 162]. Wszystkie te trzy pojęcia są słuszne i mogą być używane zamiennie.

Ogólnie układy techniczne to sztuczne „systemy rzeczowe” (skonstruowane przez człowieka) zorientowane na ich użytkowanie [39]. Traktując ogólnie taką „rzecz” jako proste indywiduum, będziemy mówili o *elemencie*, natomiast rozpatrując układ ze względu na jego złożoność, będziemy mówili o nim jako o systemie. System rzeczowy (np. maszynę) można traktować jako część pewnej hierarchii (rys. 86), szczególnie wtedy, gdy jego otoczenie potraktuje się jako nadsystem (np. agregat), a on sam składa się z podsystemów [39].



Rys. 86. *Hierarchia systemów rzeczowych* [39]



*System rzeczowy* nie działa (nie ma własnych celów), może być jednak traktowany jako układ działania, ponieważ jest kierowany przez człowieka [19]. Układowi takiemu można przypisać następujące charakterystyki [56]:

- *organizacji* (uporządkowania),
- *struktury* (relacji wewnętrznych między elementami),
- *powiązania* (relacji zewnętrznych pomiędzy układem a otoczeniem).

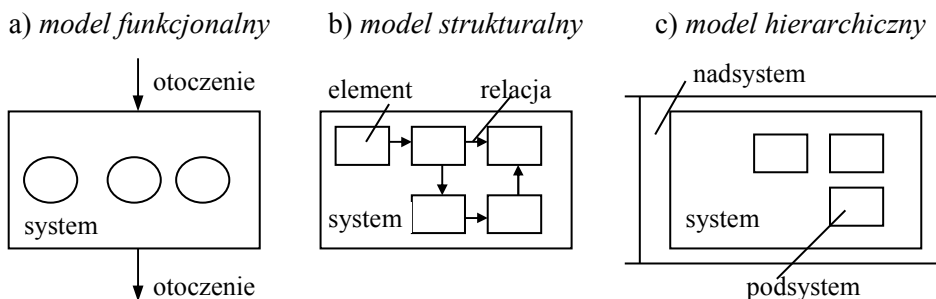
Myśląc o układach złożonych, mamy na uwadze głównie takie układy, dla których tak wewnętrzna struktura układu, jak i wzajemne oddziaływanie są skomplikowane i mogą się zmieniać w czasie. Rozróżnia się trzy zasadnicze typy układów złożonych: izolowane (bez oddziaływania z otoczeniem), zamknięte (możliwa jest wymiana materii ale nie energii czy też informacji), otwarte (dopuszcza się możliwość materii, energii oraz informacji). Maszyny są zaliczane do układów złożonych otwartych [12].

Jeżeli jest mowa o strukturze, to należy utożsamiać ją z wewnętrzną budową, czyli rozmieszczeniem elementów składowych danego układu i zespołu powiązań pomiędzy tymi elementami, charakterystycznych dla tego układu [154]. Pod pojęciem „*struktura maszyny*” należy rozumieć zbiór więzi i elementów, stanowiących jej wewnętrzną budowę, na którą składają się części, powiązane ze sobą funkcjonalnie w podzespoły lub zespoły. Struktura ta ma wpływ na stan maszyny i jej zachowanie pod wpływem czynników zewnętrznych (np. otoczenia) oraz pozwala na przewidzenie jej reakcji na działanie tych czynników. Struktura jest więc tym, co tworzy organizacyjną całość. Ujęcie takie wyraża zasadę holistyczną, że całość jest czymś więcej niż zwykłą sumą części; to *więcej* istnieje w relacjach między tymi elementami [39].

Możliwość przewidywania takiej reakcji na działanie otoczenia i sterowania tej reakcji przez odpowiednie ukształtowanie struktury maszyny stanowi o możliwości prognozowania jej niezawodności. Stąd może być zaplanowana odpowiednia jej przebudowa (modyfikacja) w celu uzyskania korzystniejszych właściwości eksploatacyjnych.

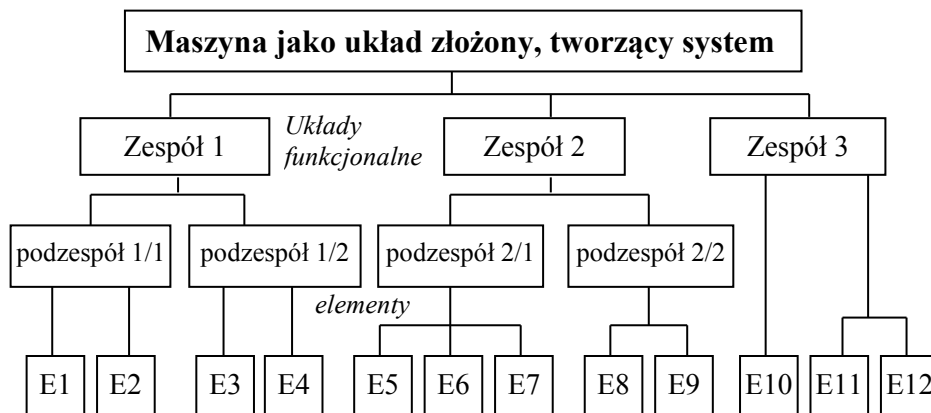
W działaniach praktycznych, związanych z przebudową struktury maszyny, prace rozpoczyna się zwykle od jej modelu systemowego. Modele te stanowią pewne uproszczenie obiektu rzeczywistego, które wprowadza się celowo, aby uwypuklić główne związki (relacje) pomiędzy elementami tego obiektu. Wniosekowanie o badanym obiekcie na podstawie badania modelu jest tylko wtedy wiarygodne, kiedy model uwzględnia istotne związki i przebiegi zachodzących zjawisk, a pomija nieistotne z punktu widzenia prowadzonych badań [163].

Teoria systemów obejmuje trzy koncepcje modeli – rys. 87 [39]:



Rys. 87. Trzy koncepcje modelowania systemowego układów technicznych [39]

- *model funkcjonalny* – system przedstawia się jako „czarną skrzynkę” (*black box*), w której jest kontakt z otoczeniem przez wejście i wyjście,
- *model strukturalny* (model „białej skrzynki”) – najbardziej rozpowszechniona koncepcja, polegająca na tym, że system traktowany jest jako całość wzajemnie powiązanych elementów o znanych cechach.
- *model hierarchiczny* – koncepcja ta uwypukla stosunki podrzędności i nadrzędności, np. w maszynie będą to zespoły i podzespoły – rys. 88.



Rys. 88. Model maszyny obrazujący jej strukturę hierarchiczną

Wśród elementów  $E_1...E_n$ , maszyny wyróżnia się dwie podstawowe grupy:

- *aktywne*, warunkujące bezpośrednio działanie zespołu, a wśród nich:
  - *podstawowe* wykonujące ustalone zadanie dla danego zespołu,
  - *rezerwowe* – przejmujące ich zadanie w razie uszkodzenia,
- *pasywne* – elementy z innego zespołu (nieistotne dla badanego układu).

## 10.2. Modele struktur niezawodnościowych

Procedurę budowy złożonego układu (maszyny lub urządzenia) wypełniającego niezawodnie swe zadania, umownie można podzielić na dwie części:

- budowa struktur niezawodnościowych (modelowanie systemowe),
- wdrożenie nowoczesnych metod i technologii w procesie doskonalenia niezawodności zastosowanych elementów (usprawnianie).

Struktura niezawodnościowa obiektu pozwala na określenie zależności stanu niezawodnościowego obiektu od stanów niezawodnościowych jego elementów. Struktura ta wskazuje też, które cechy (i których elementów) powinny spełniać wymagania tak, aby obiekt jako całość znajdował się w stanie zdatności. Analiza struktur niezawodnościowych jest kluczem do rozumienia zachowania się maszyny (lub innego urządzenia) w przyszłości.

Rozpoczynając modelowanie struktur niezawodnościowych należy przyjąć następujące założenia [12]:

- układ składa się z  $N$  elementów, z których każdy po uszkodzeniu jest naprawiany,
- funkcjonowanie, utrata zdatności i odnowa zdatności każdego z elementów, tworzących obiekt, zachodzą w sposób niezależny,
- chwile uszkodzeń każdego z elementów tworzą odrębny proces odnowy,
- znana jest postać strukturalna układu elementów tworzących obiekt.

Jeżeli stan elementu  $E_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) jest przedstawiony jako zmienna dwuwartościowa  $x_i$  przyjmująca wartość 1, gdy obiekt jest zdatny, albo wartość 0, gdy jest on niezdatny, to stan systemu można przedstawić również jako funkcję dwuwartościową: sprawny – niesprawny. Jeżeli wiadomo, z jakich elementów  $E$  składa się obiekt oraz jaki jest stan poszczególnych elementów  $S_i$ , to można powiedzieć, jaki jest stan systemu tylko wówczas, gdy znana jest jego struktura niezawodnościowa.

Struktura niezawodnościowa jest to taka funkcja  $\varphi$ , która każdej kombinacji stanów elementów systemu w sposób jednoznaczny przyporządkowuje stan tego systemu jako całości, czyli [123]:

$$\varphi : S_1 x S_2 x S_3 x \dots x S_n \rightarrow S \quad (60)$$

gdzie:  $S_i$  – stan elementu  $i$ ,

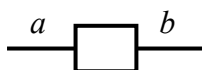
$S$  – stan systemu,

$n$  – liczba elementów w systemie.

Identyfikacja struktury niezawodnościowej systemu wymaga określenia funkcji, jaką ma do spełnienia ten system, oraz kryteriów uznania go za niezdatny. W zależności od przyjętego kryterium zdatności systemu można używać różne typy struktur niezawodnościowych. Ogólnie biorąc wyróżnia się trzy podstawowe typy (modele) struktur niezawodnościowych [12]:

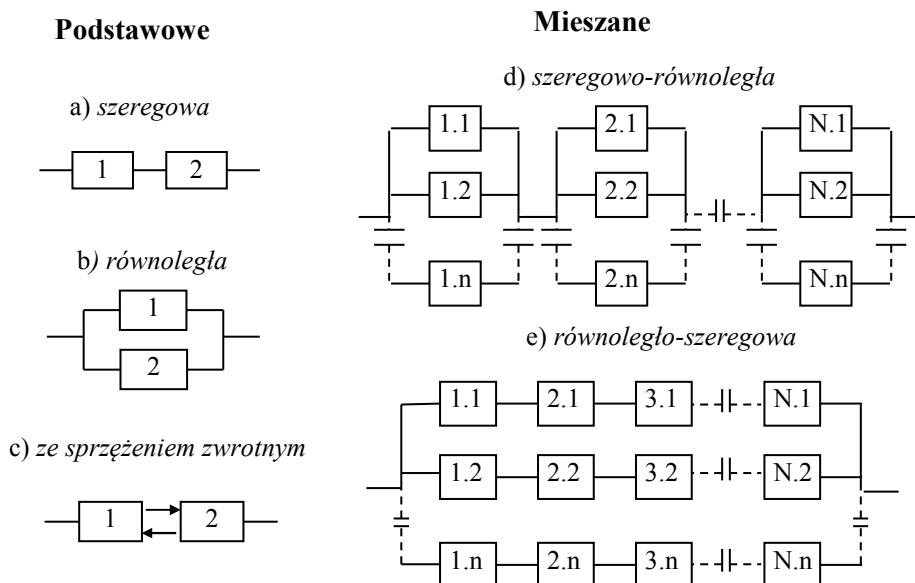
- szeregową,
- równoległą,
- mieszaną (szeregowo-równoległą, równoległo-szeregową, progową lub inną).

Na schemacie blokowym struktury niezawodnościowej każdy z elementów przedstawiony jest w postaci czarnej skrzynki (bloku z jednym wejściem „a” oraz jednym wyjściem „b”) – rys. 89 [123].



Rys. 89. Schemat graficzny stosowany w opisie struktur niezawodnościowych [122]

Grafy podstawowych struktur niezawodnościowych przedstawia rys. 90.



Rys. 90. Schematy podstawowych struktur niezawodnościowych

Jeżeli na schemacie zbudowanym z bloków przedstawiających poszczególne elementy istnieje możliwość przekazania zasilania lub informacji z jednego elementu na następny, oznacza to, że obiekt jest zdalny do wykonania zadania.

Wszystkie rozważania odnoszące się do wpływu struktury obiektu na jego niezawodność dotyczą klasy *systemów koherentnych* (koherentność oznacza, że struktura systemu *jest monotoniczna i nieredukowalna*). Dla celów praktycznych oznacza to, że w badanej strukturze wykluczamy elementy pasywne. Struktury tego typu spełniają następujące założenia [123]:

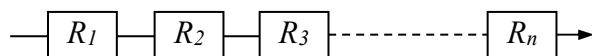
- jeżeli wszystkie elementy są zdalne – system jest zdalny,
- jeżeli wszystkie elementy są niezdatne – system jest niezdatny,
- uszkodzenie elementu nie podnosi niezawodności systemu.

Reasumując ogólne rozważania dotyczące struktury systemu stwierdzamy, że:

- *system rzeczowy* – jest modelem „całości”, która jest złożona i ma atrybuty, funkcje i strukturę,
- *model systemowy* – narzędzie zobrazowania obiektu, które posiada wejścia, wyjścia i relacje,
- każdy model służy do rozwiązania postawionego problemu przy postawionych założeniach dotyczących struktury relacji między elementami,
- *relacje* (sprzężenia) – podstawowy składnik modelu systemowego. Występują relacje:
  - przekształceń (przetwarzania) – w modelu *funkcjonalnym*,
  - sprzężeń (przemieszczania) – w modelu *strukturalnym*,
  - podległości (władzy) – w modelu *hierarchicznym*.
- systemowy model obiektu technicznego wyprowadza się z ogólnej teorii systemów i interpretuje jako system działaniowy,
- struktura jest odzwierciedleniem wewnętrznej budowy obiektu i wynika z funkcji,
- struktura niezawodnościowa jest szkieletem (modelem) ułatwiającym rozumienie, projektowanie i badanie działania obiektów technicznych przez symulacje,
- modele struktur niezawodnościowych:
  - *obejmują zbiory* obiektów podobnych, wykonanych wg tej samej konstrukcji i użytkowanych w tych samych warunkach,
  - *opisują stany* techniczne obiektu w języku statystyki (rozkłady i miary: położenia  $\bar{x}$  oraz rozproszenia  $\sigma$  ,
- struktura podstawowa (zadaniowa) systemu – to struktura szeregową,
- wszystkie systemy o strukturze innej od szeregową nazywane są systemami z nadmiarowością strukturalną; elementy te są wprowadzane po to, aby podnieść niezawodność systemu.

### 10.3. Struktura niezawodnościowa szeregową

Systemem o strukturze szeregowej (układem szeregowym) nazywa się taki układ złożony, który funkcjonuje poprawnie, gdy wszystkie jego elementy składowe są zdadne (nie ma przerwy w przepływie zasilania lub informacji). Graf szeregowej struktury niezawodnościowej przedstawiono na rys. 91 [56].



Rys. 91. *Struktura niezawodnościowa szeregową* [56]

Jest to podstawowa struktura układu działania, tworzona dla realizacji określonego celu, np. dostarczenie paliwa ze zbiornika do silnika przez układ zasilania w samochodzie. Struktura szeregową jest zatem opisem powiązań zorganizowanej grupy tworzącej kolektyw. Pojęciem „kolektyw” podkreśla się, że grupa taka – to coś więcej niż tylko zespół zadaniowy. Członków kolektywu łączy bowiem to, że są od siebie współzależni oraz pracują w interakcji ze sobą.

Układem o strukturze szeregowej określa się zatem taki układ, którego działanie wymaga prawidłowego działania wszystkich elementów składowych (uszkodzenie się któregośkolwiek z  $n$  jego elementów jest równoznaczne z uszkodzeniem tego układu) [12].

Niezawodność  $R_s$  układu  $n$ -elementowego o strukturze szeregowej, w przypadku, kiedy uszkodzenia jego elementów składowych są uszkodzeniami wzajemnie niezależnymi (np. uszkodzenie przewodu paliwowego nie zależy od uszkodzenia pompy paliwowej), wyrażona jest tzw. *prawem iloczynu* [56]:

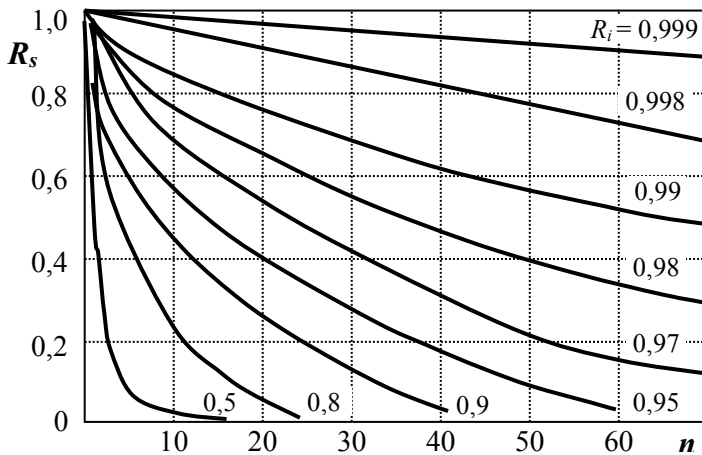
$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \dots \cdot R_n, \quad (61)$$

przy czym  $R_i$  – oznacza niezawodność  $i$ -tego elementu tego układu.

W szczególnym przypadku, gdy układ działania jest zbudowany z jednakowych elementów (o jednakowej niezawodności), czyli  $R_1 = R_2 = \dots = R$ , otrzymuje się równanie:

$$R_s = R^n. \quad (62)$$

Podstawiając określone wartości liczbowe do tego równania można zauważyć, że niezawodność układu o strukturze szeregowej zwiększa się wraz ze wzrostem niezawodności  $R$  elementów i bardzo mocno zmniejsza się wraz ze zwiększeniem liczby  $n$  tych elementów – rys. 92 [56].



Rys. 92. *Wpływ liczby elementów na niezawodność układu szeregowego* [27]

Chcąc zwiększyć niezawodność  $R_s$  jakiegoś złożonego szeregowo układu działania, możliwe są do wykorzystania następujące 3 sposoby postępowania:

- zwiększać niezawodność elementów  $R_i$  tworzących ten układ,
- zmniejszać liczbę elementów  $n$  w układzie,
- zwiększać niezawodność elementów  $R_i$  i zmniejszać ich liczbę  $n$ .

To pierwsze działanie jest najczęściej stosowane jako podstawowy sposób doskonalenia każdego systemu działania i polega najpierw na testowaniu elementów (próby pracą), by określić ich poziom doskonałości ( $R_i = ?$ ), a następnie usuwaniu z układu najsłabszych elementów, tzw. „wąskich gardeł”.

W tym zakresie maksymalnie można dojść do przybliżonej wcześniej „technicznej bariery niezawodności”, określającej graniczną, możliwą do uzyskania w najlepszych przemysłowych procesach produkcji, wartość niezawodności elementu. Wartość tę przyjmuje się zwykle na poziomie  $R_{gr} = 0,999999$ .

To drugi sposób jest domeną rozwiniętej myśli inżynierskiej, która określa, iż chcąc mieć układ o dużej pewności działania, należy go budować z najmniejszej (jak to możliwe) liczby elementów. Stąd wskazanie dla inżynierów „*upraszczaj, upraszczaj, upraszczaj*” [132].

Trzecia „droga” jest złożeniem dwóch poprzednich, tylko o różnej intensywności działań, wynikającej z możliwości technicznych.

Z prawa iloczynu wynikają trzy ważne wnioski użyteczne [56]:

### A)

*Przy zbliżonej niezawodności elementów układu niezawodność układu  $R_s$  może niespodziewanie szybko maleć, gdy zwiększa się liczba elementów  $n$  układu.*

Przykład:

- dla  $R_i = 0,99$  oraz  $n = 10 \rightarrow R_s = 0,9$ ;
- dla  $R_i = 0,99$  oraz  $n = 100 \rightarrow R_s = 0,37$  (tylko 40% poprzedniej).

### B)

*O niezawodności  $R_s$  układu działania nie decydują te najslabsze elementy  $R_i$ , ale te najlepsze, najbardziej doskonałe (niezawodne) – jeżeli ich jest dużo.*

Przykład:

Założmy, że obiekt składa się ze 101 elementów. 100 elementów ma niezawodność  $R_i = 0,99$ , natomiast 101. jest mniejsza i wynosi  $R_{101} = 0,9$ . Niezawodność takiego obiektu wynosi  $R_s = 0,99^{100} \cdot 0,9 \cong 0,33$ . Na 100 takich obiektów poddanych próbie niezawodnościowej 33 przetrwają pomyślnie próbę, w 67 obiektach natomiast powstaną niesprawności. Jeżeli ten najslabszy element poprawimy, przypuścimy aż do (teoretycznie tylko możliwej) 1, to mamy  $R_{sp} = 0,99^{100} \cdot 1 = 0,37$ . Oznacza to, że element najslabszy był przyczyną tylko 4/100 niesprawności, natomiast aż 63 było spowodowanych przez te najlepsze.

### C)

*Jeżeli niezawodność  $R_i$  pewnej liczby elementów jest mała, to na niezawodność  $R_s$  całego układu działania nie ma wpływu nawet bardzo duża niezawodność (doskonałość) pozostałych elementów. W ostatecznym rachunku liczy się wartość średnia.*

Przykład:

Założmy, że obiekt składa się z 9 elementów, każdy o niezawodności  $R_i = 0,8$  oraz 1 o niezawodności 0,999 lub 0,9999, albo nawet teoretycznej 1, to z wyliczenia wynika, że:  $R_s = 0,8^9 \cdot 0,999 \cong 0,8^9 \cdot 0,9999 \cong 0,8^9 \cdot 1 \cong 0,136$ .

Z powyższego przykładu wynika, że w pewnych sytuacjach doskonalenie niezawodności (dobroci) najslabszego elementu („wąskiego gardła”) nie przyniesie praktycznie żadnych efektów w zakresie pewności działania całego układu. W masie „miernoty” największe nawet osiągnięcia nie mają bowiem praktycznie żadnego znaczenia. Ich znaczenie rośnie – tym więcej, im wyższy jest poziom pozostałych elementów. Elementy doskonałe są zatem na tyle warte, na ile służą podniesieniu poziomu średniego. Ostatecznie bowiem charakterystyka jakiejś cechy dla zbioru jest pochodną wartości średniej tej cechy.



## 10.4. Struktura niezawodnościowa równoległa

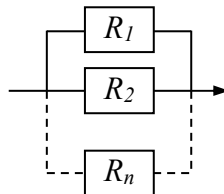
Definiując podstawowy układ zadaniowy o strukturze szeregowej w kategoriach trwałości  $T_s$  uzyskuje się zapis [12]:

$$T_s = \min T_i = \min \{T_1, T_2, \dots, T_n\}, \quad (63)$$

z którego wynika, że trwałość  $T_s$  systemu jest określona trwałością najsłabszego (najmniej trwałego) elementu. Cechą charakterystyczną tego układu jest zatem to (co przedstawiono we wniosku A), że staje się zawodnym już przy stosunkowo niewielkiej liczbie elementów składowych.

Maszyny lub inne urządzenia zadaniowe, ze względu na wykonywaną funkcję, zbudowane są z wielu elementów i stawia się przed nimi wymagania niezawodnej pracy przez długi czas. Aby to osiągnąć, wprowadza się w strukturę danego układu elementy rezerwowe (zastępne), przejmujące zadanie podstawowych w razie ich uszkodzenia. W ten sposób powstaje nowy układ o strukturze niezawodnościowo równoległej [56].

Obiektem o *strukturze równoległej* nazywany jest układ działania, który funkcjonuje poprawnie, gdy chociaż jeden jego element jest sprawny. Graf tej struktury zobrazowano na rys. 93.



Rys. 93. *Struktura niezawodnościowa równoległa*

Przy strukturze równoległej element  $i = 2$  lub każdy kolejny ( $i \rightarrow n$ ) jest taki sam jak element podstawowy  $i = 1$ . Może zatem zastąpić go w razie uszkodzenia. Jest zastosowany jako rezerwa na nieprzewidziane okoliczności. W tym przypadku trwałość  $T_r$  (czas życia) układu o takiej równoległej strukturze jest zdeterminowana trwałością nie najsłabszego a najmocniejszego elementu. Zatem uzyskujemy zapis:

$$T_r = \max T_i = \max \{T_1, T_2, \dots, T_n\}, \quad (64)$$

gdzie  $T_i$  – oznacza trwałość  $i$ -tego elementu układu równoległego.

W takich układach każdy element może zastępować wszystkie pozostałe, gdy staną się niesprawne. Każdy element stanowi rezerwę dla pozostałych. Dlatego postać prawa iloczynu jest nazywana „prawem rezerwy” [56]. Niezawodność podawana jest zależnością [85]:

$$1 - R_r = (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_i) \cdot \dots \cdot (1 - R_n) . \quad (65)$$

Po uporządkowaniu mam zatem podstawowy wzór:

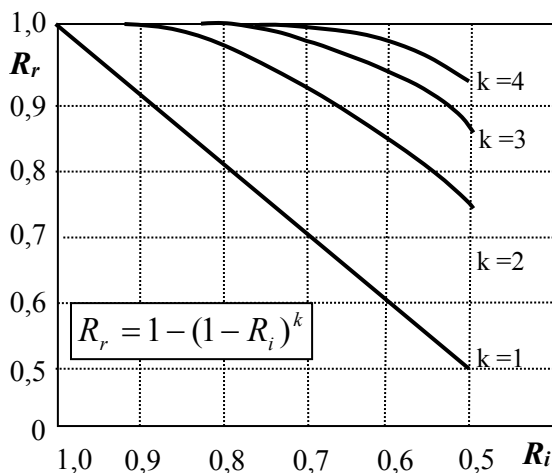
$$R_r = 1 - [(1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_i) \cdot \dots \cdot (1 - R_n)] , \quad (66)$$

bądź też dla  $k$  jednakowych ( $R = R_i$ ), niezależnych elementów:

$$R_r = 1 - (1 - R)^k . \quad (67)$$

Cechą charakterystyczną obiektu o strukturze równoległej jest to, że staje się on obiektem praktycznie niezawodnym ( $R_r \rightarrow 1$ ) już przy stosunkowo niewielkiej liczbie elementów. Dopiero uszkodzenie (awaria) wszystkich elementów oznacza awarię całego układu.

Podstawiając do równania (67) określone liczby można się zorientować, jak wysoce skuteczne jest rezerwowanie, np. dla  $n = 3$  i  $R_i = 0,5$ ;  $R_r = 1 - (1 - 0,5)^3 = 1 - 0,125 = 0,875$ . Graficzny obraz analizy równania (67) przedstawia rys. 94 [56].



Rys. 94. *Graficzny obraz wpływu liczby elementów rezerwowych na niezawodność układu równoległego* [56]

Z powyższego wynika, że największy przyrost niezawodności (pewności działania) występuje przy  $k = 2$  elementach rezerwowych i maleje w miarę dodawania kolejnych elementów.

Pewną charakterystyczną cechą techniczną układów równoległych jest to, że z reguły parametry wejściowe i wyjściowe wszystkich elementów układu są podobne lub nawet jednakowe. Bardzo też często są to urządzenia o takiej samej mocy czy wydajności, a także jednakowych pozostałych parametrach technicznych, co w pewnym sensie upodabnia do siebie te elementy, także pod względem budowy i niezawodności. Dzięki temu w wielu przypadkach (a przynajmniej do badań symulacyjnych) można przyjmować, że poszczególne elementy układu równoległego są jednakowe pod względem niezawodności [12].

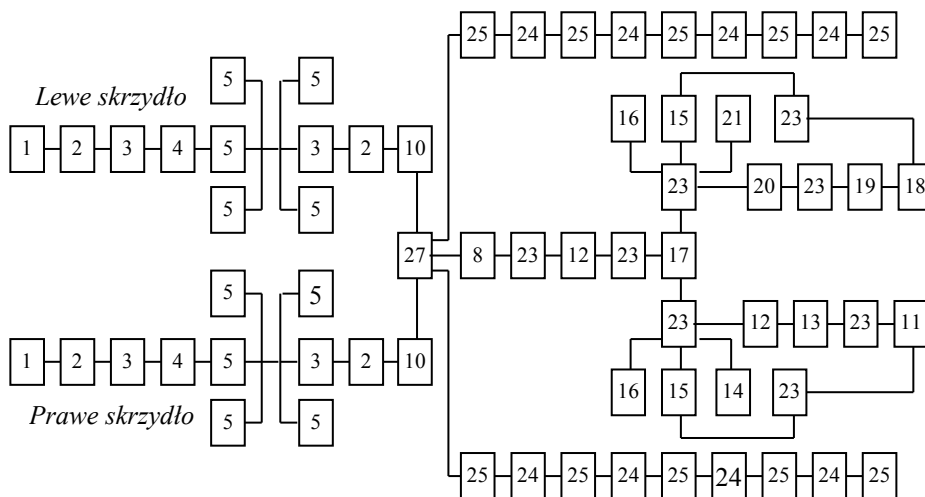
Rezerwowanie umożliwia zatem przekraczanie barier niezawodnościowych, niemożliwych do przekroczenia przy stosowaniu tylko struktur szeregowych niezawodnościowo. Rezerwa jednakże kosztuje; może podwoić, potroić, itp. koszty obiektu. Wzrost kosztów powinien być zatem skompensowany zyskiem otrzymanym wskutek zwiększenia niezawodności.

Element rezerwowy może pracować jednocześnie z podstawowym lub też może być włączany automatycznie (bez przerywania funkcjonowania całego obiektu) w jego miejsce w przypadku wystąpienia uszkodzenia. Rozróżnia się zatem następujące rodzaje rezerwowania [158]:

1. *Rezerwa gorąca* (obciążona);  
Elementy rezerwowe znajdują się w takim samym stanie pracy, jak element podstawowy (pracują jednocześnie). Stąd też mogą ulec uszkodzeniu przed uszkodzeniem elementu podstawowego. Powyższe wzory na układ równoległy dotyczą tego rodzaju rezerwowania.
2. *Rezerwa ciepła* (częściowo obciążona);  
Elementy rezerwowe są w stanie oczekiwania, częściowo obciążone i mogą się uszkodzić, ale z mniejszym prawdopodobieństwem. Przykładem tego rodzaju rezerwowania jest np. koło zapasowe samochodu w bagażniku. Elementy rezerwowe mogą być włączone na stałe lub włączone z chwilą uszkodzenia obiektu (elementu).
3. *Rezerwa zimna* (nieobciążona);  
Elementy rezerwowe są w stanie oczekiwania i w wyniku pracy urządzenia nie są obciążone, np. opony samochodowe w sklepie. Przyjmuje się, że elementy rezerwowe w stanie oczekiwania nie mogą się uszkodzić. W tego rodzaju rezerwie kryje się zatem największy potencjał sprawczy (mają największy zapas resursu).

## 10.5. Struktura niezawodnościowa mieszana

W realnych układach technicznych struktury mogą być nie tylko szeregowo lub równoległe niezawodnościowo, lecz również mieszane: szeregowo-równoległe, równoległo-szeregowo, bądź w pewnej części szeregowo, a w innej równoległe, zawierające rezerwowe elementy lub grupy elementów [56]. Przykład rozwiniętej mieszanej struktury niezawodnościowej pokazano na rys. 95 [27].

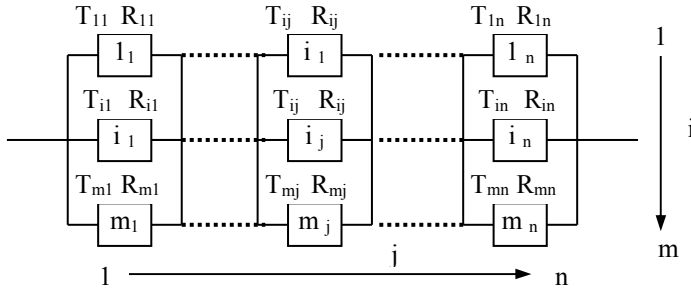


Rys. 95. Przykład rozwiniętej struktury niezawodnościowej do sterowania lotkami na skrzydłach samolotu [27]

Takie złożone struktury niezawodnościowe podczas obliczeń sprowadza się do coraz bardziej prostych, w postaci układu szeregowego, przez zastępowanie elementów połączonych równoległe zastępczym blokiem  $R_z$ , o wyliczonej niezawodności z układu równoległego. To nie oznacza wcale, że rzeczywiste elementy obiektu są połączone w szereg, ale uzyskuje się przejrzystość zapisu. Strukturą zadaniową (podstawową) jest struktura szeregowo i do niej należy doprowadzić ostateczny model służący do obliczeń niezawodnościowych.

Wśród struktur mieszanych warto zwrócić uwagę na struktury szeregowo-równoległe oraz równoległo-szeregowo. Jeśli bowiem porówna się niezawodność układu zbudowanego z tej samej liczby elementów i o tej samej niezawodności, to okazuje się, że tylko inaczej ustawiając w układzie te elementy można uzyskać inną wartość niezawodności. Układy o strukturach szeregowo-równoległych okazują się przy tym bardziej niezawodne [56].

Strukturą szeregowo-równoległą nazywany jest taki układ, który funkcjonuje poprawnie wówczas, gdy wszystkie jego  $n$  zespołów, o równoległym połączeniu  $m$  elementów, funkcjonuje poprawnie – rys. 96 [81].



Rys. 96. *Ogólny schemat niezawodnościowy struktury szeregowo-równoległej* [81]

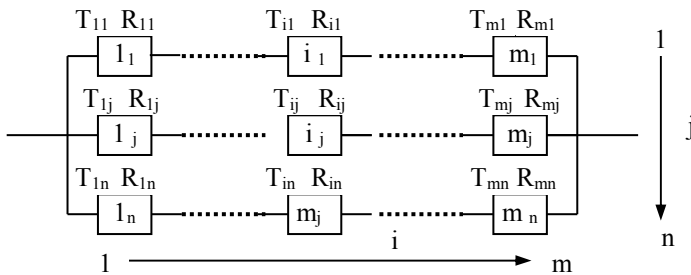
Jeśli jest to obiekt jednorodny i regularny, czyli układ o jednakowej liczbie elementów w poszczególnych zespołach, to zależność na  $R_{sr}$  ma postać:

$$R_{sr} = [1 - (1 - R)^m]^n, \quad (68)$$

gdzie:  $m$  – liczba elementów w zespole,  $n$  – liczba zespołów.

Trwałość układu  $T_{sr}$  zależy od trwałości  $T_j$  najsłabszego elementu, a trwałość każdego  $j$ -tego zespołu zależy od trwałości jego najmocniejszego elementu.

Schemat uogólnionej struktury równoległo-szeregowej przedstawia rys. 97.



Rys. 97. *Ogólny schemat niezawodnościowy struktury równoległo-szeregowej* [81]

Strukturę taką posiada układ, który funkcjonuje poprawnie wówczas, gdy przynajmniej jeden spośród jego  $n$  zespołów funkcjonuje poprawnie. Niezawodność takiego układu ma postać [81]:

$$R_{rs} = 1 - (1 - R^m)^n. \quad (69)$$

Trwałość tego układu  $T_{rs}$  jest zdeterminowana trwałością  $T_j$  najsłabszego elementu w najtrwalszym zespole;  $T_{rs} = \min_i [\max_j (T_{ij})]$ .

Podczas korzystania z podanych zależności należy pamiętać, że założona przy ich wyprowadzaniu niezależność elementów oznacza w praktyce ciągłą pracę wszystkich elementów w warunkach ustalonych, – bez wyłączeń konserwacyjnych postępu awaryjnego i innych [85]. W praktyce założenia są trudne do spełnienia, stąd celowe jest wyznaczanie niezawodności układów raz dla normalnej pracy układu (gdy wszystkie elementy są czynne) i drugi raz dla pracy układu przy elemencie uszkodzonym, albo wziętym do naprawy. Do wyliczenia średniego prawdopodobieństwa poprawnej pracy  $p_u$  stosuje się wówczas tzw. zależności Sandlera zestawione w tab. 6. [12].

Tab. 6. *Zależności Sandlera do wyznaczania niezawodności układów złożonych* [12]

<i>Stan Praca układu</i>	STAN 0 $p_{0u}$	STAN 1 $p_{1u}$	STAN 2 $p_{2u}$
$A_{211}$	$\frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2}$	$\frac{2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2}$	$\frac{\lambda^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2}$
$A_{212}$	$\frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2}$	$\frac{2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2}$	$\frac{\lambda^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2}$
$B_{211}$	$\frac{\mu^2}{\mu^2 + \lambda\mu + \lambda^2}$	$\frac{2\lambda\mu}{\mu^2 + \lambda\mu + \lambda^2}$	$\frac{\lambda^2}{\mu^2 + \lambda\mu + \lambda^2}$
$B_{212}$	$\frac{2\mu^2}{2\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2}$	$\frac{2\lambda\mu}{2\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2}$	$\frac{\lambda^2}{2\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2}$

przy czym:

$\lambda$  – zakładana intensywność uszkodzeń elementów,

$\mu$  – zakładana intensywność dokonywania napraw tych elementów.

Rozpatrywany układ, ze względu na zdatność pracy swoich elementów, może się znajdować w jednym ze stanów:

**STAN 0** – wszystkie elementy pracują, zero elementów w naprawie,

**STAN 1** – jeden z elementów pracuje, a drugi uszkodzony i jest w naprawie,

**STAN 2** – oba elementy są uszkodzone i są w naprawie.

$A_{211}$  – praca z rezerwą gorącą, możliwość naprawy tylko jednego elementu,

$A_{212}$  – praca z rezerwą gorącą, możliwość naprawy obu elementów jednocześnie,

$B_{211}$  – praca na przemian z zimną rezerwą, naprawy tylko jednego elementu,

$B_{212}$  – praca na przemian z zimną rezerwą, z możliwością naprawy elementów.

## 10.6. Podsumowanie

Rozdział 10. obejmuje opis procedur postępowania podczas modelowania struktury niezawodnościowej maszyn lub innych urządzeń technicznych. Podkreślono, że w literaturze zagadnienie to jest określane jako „niezawodność systemu”, „niezawodność struktur” lub „układy złożone”. Mogą być one używane zamiennie, a procedura, która się do nich odnosi jest jedna i w swej podstawowej istocie została opisana w tym rozdziale.

Rozpatrzono zatem maszynę jako system rzeczowy i przybliżono pojęcie struktury tego systemu. Podano, że *system rzeczowy* – jest modelem „całości”, która jest złożona i ma atrybuty, funkcje oraz strukturę. Podkreślono, że przez zmianę struktury powiązań elementów między sobą, można zmieniać właściwości użytkowe systemu.

Wyróżniono i omówiono trzy podstawowe ujęcia budowy wewnętrznej systemu rzeczowego: funkcjonalne, strukturalne i hierarchiczne. W modelu strukturalnym, z punktu widzenia niezawodności, szczególnie ważne są elementy aktywne, które mogą być zestawiane w dwóch podstawowych układach: szeregowym – podstawowym dla zrealizowania danego zadania, i równoległym (rezerwowym) – wykorzystywanym w przypadku przeciążeń.

Omówiono modele niezawodnościowe tych struktur podstawowych i podano zależności matematyczne dla ich obliczania. Podkreślono, że w schematach graficznych, opisujących strukturę obiektu, każdy element przedstawia się w postaci modelu czarnej skrzynki (prostokąta), który łączy się z pozostałymi za pomocą łącznika w postaci odcinka. Odcinek ten (a często rysowany jako strzałka) jest obrazem dynamiki systemu.

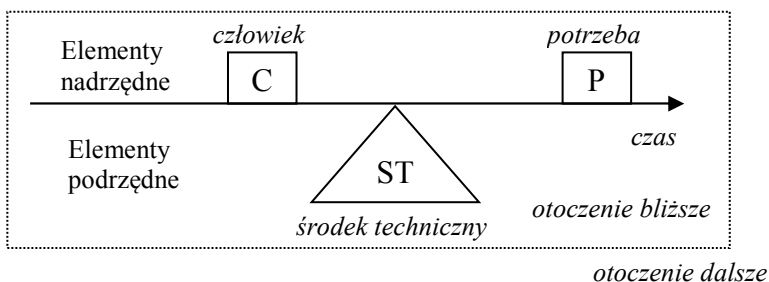
Podkreślono, że struktura równoległa (rezerwowanie) pozwala przekraczać bariery niezawodnościowe oraz budować urządzenia pozwalające na dużą pewność pracy. Omówiono w tym zakresie trzy rodzaje rezerwy: obciążoną (gorącą), częściowo obciążoną (cieplą) oraz nieobciążoną (zimną).

W budowie maszyn praktycznie występują struktury mieszane, najczęściej równoległo-szeregowo lub szeregowo-równoległe. Opisano zatem takie struktury i podano zależności matematyczne do ich obliczeń. W opisie tych struktur przyjęto konwencję, że pierwszy człon nazwy określa podstawowy wzór przyjmowany do obliczeń danej struktury. Praktyczny przykład obliczania takiej struktury mieszanej podano w ostatnim rozdziale, dotyczącym przykładów rozwiązywania zadań z obszaru eksploatacji.

# 11. CZŁOWIEK W SYSTEMIE EKSPLOATACJI

## 11.1. Układ człowiek-maszyna

Maszyny i inne urządzenia wykorzystywane są jako środki techniczne wspomagające człowieka w realizacji jego potrzeb. W procesie użytkowania pomiędzy maszyną a człowiekiem tworzą się więzi, dzięki którym powstaje *układ człowiek-maszyna* [18]. Układ ten jest systemem sterowanym i ukierunkowanym na osiągnięcie zaplanowanego celu oraz posiada hierarchiczną strukturę. Struktura ta spełnia istotną funkcję systemową, określając nadrzędność i podrzędność elementów w systemie – rys. 98 [134].



Rys. 98. *Elementarny układ człowiek - maszyna* [134]

Układ: *człowiek – maszyna* to system działania, złożony z człowieka i odpowiedniego zestawu środków technicznych. Człowiek w tym układzie może spełniać rolę podwójną rolę: być operatorem, bądź serwisantem.

Już w latach 60. XX w. Nieblylicyn określił podstawowe różnice w działaniach człowieka i maszyny, m.in. takie, że [154]:

- *praca maszyny jest zdeterminowana*, co oznacza, że funkcjonuje ona zawsze w ten sam przewidywalny (według założeń projektanta) sposób, człowiek natomiast jest w stanie na bieżąco zmieniać swoje działanie,
- *praca maszyny ma charakter skokowy* – występują tylko dwa stany: ruch i bezruch; praca człowieka ma charakter płynny – może być wykonywana z różnym nasileniem,
- *pracy maszyny jest pewna* – dostosowana do działań powtarzalnych i jednostajnych; praca człowieka jest niepewna i wymagająca zmienności.

Patrząc dokładniej, tych różnic jest jednak znacznie więcej – tab. 7 [39].



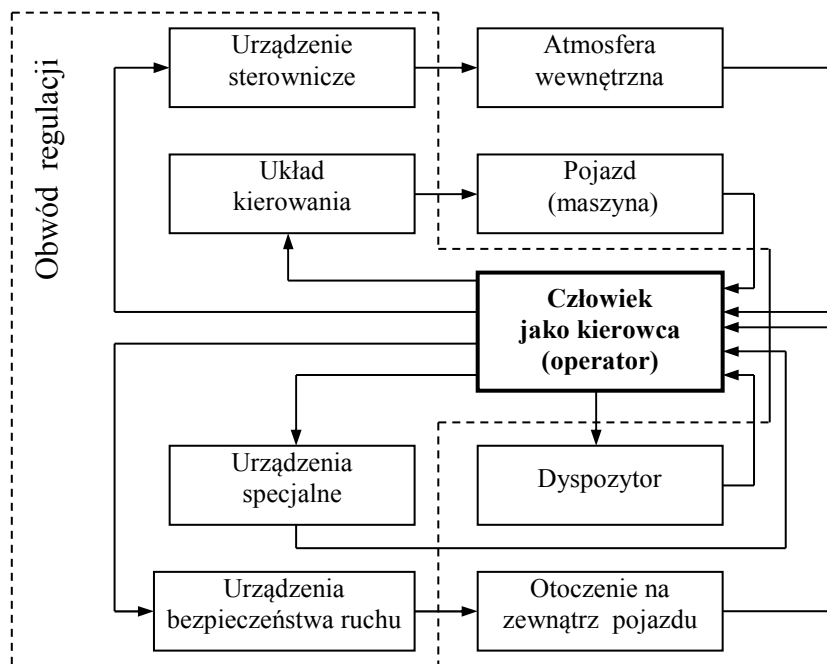
Tab. 7. *Porównanie działania człowieka i funkcjonowania maszyny* [39]

<b>Człowiek</b>	<b>Maszyna</b>
Reaguje na ograniczony zakres bodźców	Reaguje na bodźce poza człowiekiem, takie jak podczerwień, czy ultradźwięki
Reaguje na bodźce zmiennie	Reaguj na bodźce stale tak samo
Może wykrywać nieoczekiwane lub nietypowe zmiany bodźca	Słabo wykrywa nieoczekiwane lub nietypowe zmiany bodźca
Zdolny do rozumowania indukcyjnego i dedukcyjnego	Wnioskuje logicznie
Stosuje zasady i koncepcje do rozwiązywania problemów	Oferuje ograniczony zakres rozwiązań, związany ze zdefiniowanymi obszarami problemu
Ma ogromną zdolność uczenia się	Ma ograniczoną zdolność uczenia się
Stosuje doświadczenie do rozwiązywania nowych problemów	Ograniczona w stosowaniu doświadczenia
Ma wysoce adaptacyjne odpowiedzi fizyczne	Ma ograniczone odpowiedzi fizyczne, zdefiniowane przez strukturę
Wielofunkcyjny	Ma wyspecjalizowane funkcje
Ma ograniczoną wytrzymałość	Silna, potężna, mocna
Łatwo się męczy i traci koncentrację	Nie męczy się i nie traci koncentracji
Bywa roztargniony	Nie jest w stanie być roztargniona
Ma ograniczony zakres i dokładność wyszukiwania i pozyskiwania informacji	Wyszukuje i pozyskuje informację wysoce skutecznie, dokładnie i niezawodnie
Ma słabą zdolność długiego przechowywania informacji	Ma dobrą zdolność długiego przechowywania informacji

Człowiek bowiem, to nie maszyna, ale osoba. Jego działanie jest uwarunkowane wieloma czynnikami różnej natury: wprawą, procedurami lub wiedzą ogólną. Aby te dwa różne człony układu: człowiek i maszyna mogły ze sobą współdziałać w sposób optymalny, każde z nich powinno wypełniać te funkcje, w których wykazuje przewagę nad drugim elementem:

- człowiek – myślenie koncepcyjne i to, co jest niepowtarzalne,
- maszyna – perfekcja i powtarzalność w wykonywaniu zadania.

Dobrym przybliżeniem opisu zadań człowieka w układzie pracy z maszyną, jest przeanalizowanie działania kierowcy jako operatora pojazdu. Podczas użytkowania pojazdu spełnia on funkcję „ogniwa” zamykającego różne obwoody sygnałów w systemie regulacji pracy urządzenia – rys. 99 [141].



Rys. 99. *Działania człowieka jako kierowcy (operatora) maszyny* [141]

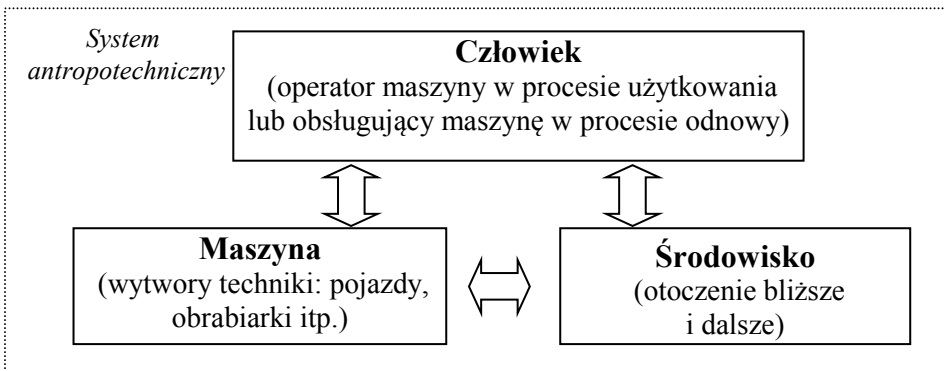
Wśród czynności operatora (kierowcy), prowadzącego współczesny pojazd mechaniczny, zasadnicze znaczenie mają operacje odbioru i przetwarzania informacji. Strumień informacji, docierające do zmysłów operatora w postaci sygnałów wejściowych, są bardzo różnorodne. Informacje odbierane przez operatora skłaniają go do odpowiedniego działania, będącego złożonym łańcem czynności analityczno-decyzyjnych, kończących się reakcjami ruchowymi lub ustnymi, stanowiącymi sygnały wyjściowe.

Podstawowe czynności kierowcy stanowią procesy wykonawcze, realizowane zgodnie z podjętą decyzją za pośrednictwem kończyn, wprawiających w ruch odpowiednie elementy systemu sterowania pojazdem, jak np. przekręcanie kierownicy o określony kąt, przerzucanie dźwigni zmiany biegów, itp. U doświadczonych kierowcy jego ruchy w procesie sterowania pojazdu stają się „zautomatyzowane” i nie obciążają świadomości. Oczywiście, nawet dobrze wyszkolony, uzdolniony i chętny kierowca nie osiągnie wiele, gdy kieruje np. zużytym i często ulegającym uszkodzeniu pojazdem. Nikła jest również efektywność użytkowania sprawnych pojazdów wtedy, kiedy kierują nimi niedoświadczeni lub niesumienni kierowcy.

## 11.2. System antropotechniczny

System eksploatacji nie istnieje bez człowieka, chociaż coraz częściej widzimy pracujące maszyny bez udziału człowieka. Ktoś jednak wcześniej je musiał zaprogramować i ktoś nadzoruje np. przez układy zdalnego sterowania.

Z przestrzeni, w której tworzony jest ten system, wydziela się obiekty i zjawiska mające wpływ na wynik pracy. Są to: maszyna i jej operator, tworzą razem system antropotechniczny (*anthropos* gr.– człowiek). Pozostała część tworzy środowisko działania i nazywane jest otoczeniem [105]. Wzajemne oddziaływania elementów tego systemu zobrazowano na rys. 100 [95].



Rys. 100. *Powiązanie elementów systemu antropotechnicznego* [95]

Do zadań inżynierskich przy projektowaniu układów antropotechnicznych należy, między innymi, dopasowanie styku pomiędzy człowiekiem i maszyną. W zakresie tego „styku” (sprzężenia) wyróżnić można dwa rodzaje relacji:

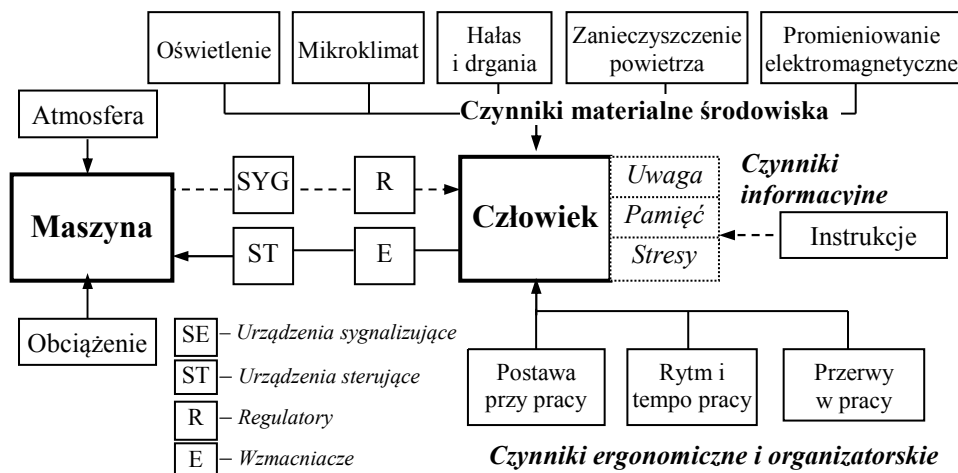
- typu somatycznego* (soma gr. – ciało), czyli wynikające z cielesności człowieka, np. zasięg kończyn, siła dłoni, postawa,
- relacje typu receptorowego* (oddziaływanie na zmysły słuchu, wzroku, dotyku, powonienia lub smaku).

Zastosowanie projektowania, określanego jako ergonomiczne, pozwala na rozwiązywanie zadania, z optymalizacją nie pojedynczych działań człowieka operatora, lecz z optymalizacją całej działalności systemu, co ostatecznie prowadzi do poprawy jego efektywności technicznej i ekonomicznej [105].

Tego typu zadanie wymaga też ustalenia i formułowania procedury postępowania z maszyną w odniesieniu do środowiska (np. zwiększanie mocy silnika pojazdu wywołuje większy hałas). W systemie antropotechnicznym zarówno człowiek, jak i maszyna podlegają oddziaływaniu różnego rodzaju czynników

środowiskowych. Oddziaływania środowiska to przede wszystkim *czynniki klimatyczne*. Najistotniejsze w tym zakresie są trzy czynniki: temperatura, ciśnienie i wilgotność powietrza. Jako bardziej złożone aspekty tego zagadnienia rozpatruje się tu: ruchy powietrza atmosferycznego, charakter opadów atmosferycznych i promieniowanie słoneczne. O ile na maszynę oddziałuje negatywnie atmosfera i obciążenie, to na człowieka wywiera wpływ zdecydowanie większa liczba czynników. Można poklasyfikować je na cztery grupy – rys. 101 [53]:

- czynniki materialne środowiska,
- czynniki ergonomiczne i organizatorskie,
- czynniki informacyjne,
- czynniki konstrukcyjne i sterujące maszyną.



Rys. 101. *Czynniki oddziałujące na człowieka w systemie antropotechnicznym* [53]

O oddziaływaniu środowiska na maszynę decyduje konfiguracja wymienionych czynników składowych. I tak np. wynikiem wpływu wysokiej temperatury powietrza i dużej wilgotności może być [55]:

- pogorszenie właściwości substancji smarujących, i uszczelniających,
- intensyfikacja procesów korozyjnych,
- występowanie nadmiernych obciążeń cieplnych elementów obiektu,
- występowanie uszkodzeń powłok ochronnych (pękanie, odpryski).

Rezultatem jednoczesnego oddziaływania niskiej temperatury i dużej wilgotności może być natomiast:

- negatywna zmiana własności mechanicznych tworzyw (np. kruchość),
- pogorszenie lotności substancji spalanych np. w silnikach spalinowych,
- zamarzanie płynów w instalacjach.

Nie są to wszystkie czynniki, które wpływają na funkcjonowanie człowieka i maszyny w systemie antropotechnicznym. Typowym czynnikiem „innym”, który trudno jednoznacznie wiązać z omawianymi składnikami środowiska jest kurz, wpływający zarówno na zachowania maszyny jak i człowieka.

Za sprawą wzajemnych oddziaływań maszyna-środowisko, lub pod wpływem złożonych zjawisk wewnętrznych zachodzących wewnątrz maszyny, dochodzi do zdarzeń niepożądanych, które mogą powodować różnego rodzaju straty. Te niepożądane zdarzenia to [95]:

- dla obiektów technicznych – niezdatności i uszkodzenia,
- dla człowieka – zmęczenie, kalectwo lub śmierć.

Zaistnienie zdarzenia niepożądanego następuje z pewnym prawdopodobieństwem, które jest tym większe, im mniejsza jest znajomość czynnika stanowiącego źródło określonego zagrożenia [105].

Dostarczanie informacji i energii do obiektu technicznego wymaga od człowieka ponoszenia też pewnych trudów. Bardziej przykry z nich jest zwykle trud dostarczania energii. Aby się od niego uwolnić, wprowadza się różne „*alimentatory*” pobierające energię z otoczenia, jak np. żagle, skrzydła wiatraków, łopatkki kół wodnych, itp. [88]. Wykorzystywanie sztucznych źródeł energii, jak np. energia rozprężania się pary wodnej (kotły parowe), energia elektryczna (elektrownie), wymagało dostosowania „*efektorów*” i w związku z tym przybrały one postać silników (parowych, elektrycznych). Ten etap określany jest jako *mechanizacja*. Nadal jednak człowiek musiał dostarczać informacji w procesach sterowania, np. wyznaczając kierunek ruchu statku czy samochodu. W związku z tym nasunęła się myśl, żeby zastąpić „*receptory*” takimi, które same pobierałyby informacje z otoczenia, i w związku z tym pojawiły się czujniki (np. prędkości, temperatury, ciśnienia), a następnie regulatory zmniejszając zbyt duże oddziaływania, a zwiększając zbyt małe. Ten etap określany jest jako *automatyzacja* [88]. W rezultacie człowiek uwolnił się od wszystkich zadań, z wyjątkiem nastawiania regulatorów. Zadanie to jednak pozostało człowiekowi nie z powodu niemożności pozbycia się również i jego, lecz dlatego, że w ten sposób człowiek może nadzorować by urządzenia techniczne działały w jego interesie.

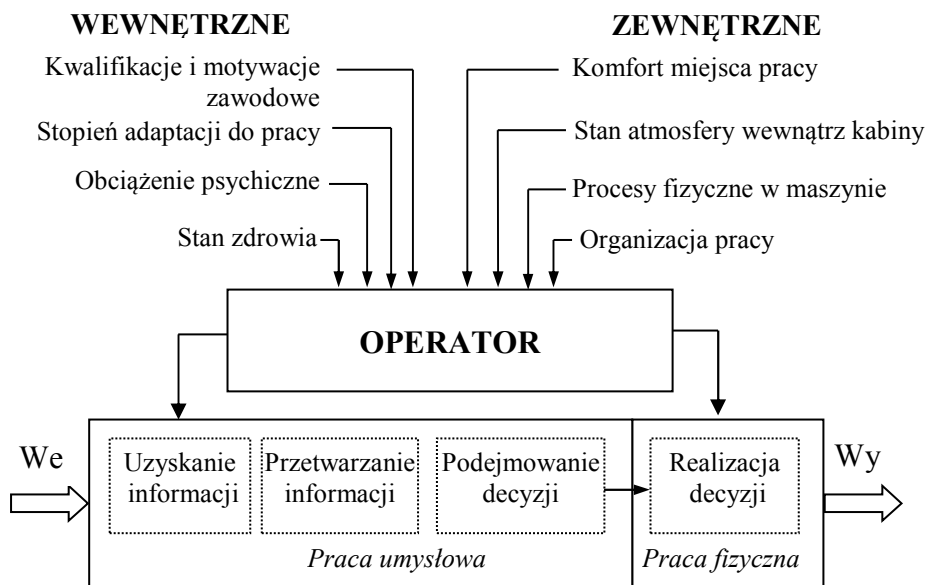
Projektując maszynę należy pamiętać zatem, że człon biologiczny systemu eksploatacyjnego – człowiek – charakteryzuje się nadanymi przez przyrodę, a opisanymi przez ergonomię i nauki towarzyszące, cechami i możliwościami. Są one w określonych, wąskich granicach stałe i nie można ich zmieniać. Stąd też to głównie maszyna dostosowywana jest do człowieka [8]. Czas pokazał jednak, że nie jest to wystarczające do tego, aby wzrastała pewność działania układu człowiek-maszyna. Potrzeba jest również doskonalenia samego człowieka jako operatora maszyny.

### 11.3. Człowiek jako operator maszyny

W myśl nowej dyrektywy maszynowej 2006/42/WE (w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn), która obowiązuje w Polsce od 29 grudnia 2009 r., *operator* to osoba, która jest odpowiedzialna za bieżącą obsługę urządzeń. W ramach swoich zadań wykonuje takie czynności dotyczące urządzeń jak:

- instalowanie,
- użytkowanie,
- obsługiwanie,
- regulowanie,
- konserwowanie,
- czyszczenie,
- naprawianie,
- przemieszczanie.

Korzystając z ogólnych opracowań z dziedziny psychologii i cybernetyki, np. z prac: Z. Jethona [51] oraz M. Mazura [88], można zbudować model operatora w procesie działań sterowniczych, którego praca uzależniona jest od dwóch grup czynników – rys. 102 [141].



Rys. 102. Czynniki wpływające na działanie operatora maszyny [141]

Uzyskiwanie informacji z odbieranych sygnałów wejściowych odbywa się (zależnie od charakteru rozmaitych nośników informacji) za pośrednictwem różnych organów zmysłowych, do których należą nie tylko wzrok, słuch, dotyk, smak oraz powonienie, lecz także zmysł równowagi, zmysł temperatury i zmysł kinestetyczny [51]. Z organów zmysłowych, w których odbywa się odbiór sygnałów, informacja jest przekazywana do receptorów (specyficznych komórek nerwowych) i kierowana dalej przez włókna nerwowe obwodowego systemu nerwowego do odpowiednich części ośrodkowego układu nerwowego.

W ośrodkowym układzie nerwowym następuje przetworzenie i ocena informacji oraz opracowanie decyzji. Decyzja jest podejmowana na podstawie odbieranych na bieżąco informacji oraz informacji już zawartych w pamięci operatora. Decyzje podejmuje się bardzo szybko, bez względu na to, czy są to najprostsze rozstrzygnięcia, jak np. całkowicie nawykowe reakcje ruchowe, czy też szczególnie złożone akty decyzji, poprzedzone bardzo nawet skomplikowanymi procesami rozumowania (np. podczas diagnozy stanu maszyny).

Opracowana decyzja w ośrodkowym układzie nerwowym jest przekazywana przez włókna nerwowe do efektorów działających na organy wykonawcze (mięśnie, gruczoły itd.), w których następuje realizacja decyzji. W organach roboczych przebiegają procesy ujawniające się jako ich działanie zgodne z decyzją. Działania wykonawcze są rozumiane bardzo szeroko, tj. od prostych czynności motorycznych, jak np. ruch kołem kierownicy czy naciśnięcie pedału hamulca, sprzęgła w samochodzie, aż do różnych działań złożonych, związanych z porozumiewaniem się pomiędzy ludźmi poprzez wewnętrzne i zewnętrzne środki przekazu informacji oraz wykrywanie przeszkód terenowych, ocena odległości itp.

Jak wynika to choćby z powyższego uproszczonego modelu, operator jest skomplikowanym układem dynamicznym, różniącym się od zwykłych układów dynamicznych tym, że brak w nim takich punktów pośrednich między wejściem a wyjściem, w których można odczytywać pośrednie znaczenia strumienia sygnałów w celu ulepszenia pracy całego systemu sterowania. Należy tu też zwrócić uwagę na fakt, że od człowieka w systemie eksploatacji wymaga się dwóch różnych umiejętności i zachowań:

- *normalna eksploatacja* – zadania mało wiążą się, jeżeli w ogóle się wiążą, z diagnozowaniem i podejmowaniem decyzji. Zwykle czynności wykonywane w tej sytuacji wynikają z ustalonych i wyuczonych wcześniej procedur postępowania (zadania rutynowe i wyuczone zasady),
- *stan awaryjny* – działania w stresie (mniej lub bardziej podświadome działania i wyuczone odruchy). Zwykle występuje nastawienie na szyb-

kie zlokalizowanie uszkodzenia oraz minimalizacja strat wynikających z uszkodzenia obiektu.

O ile do działań związanych z normalną eksploatacją maszyny można człowieka przygotować przez odpowiednie szkolenie, to do działań w stanach awaryjnych wymagane są odpowiednie cechy charakteru. Stąd można przyjąć za słuszne powiedzenie „*właściwy człowiek na właściwym miejscu*”.

Złożoność współczesnych maszyn, wielość różnorodnych informacji, konieczność szybkiego i precyzyjnego odbierania sygnałów oraz podejmowania natychmiastowych decyzji stworzył problem tzw. *obciążenia psychicznego* [51]. Polega ono na napięciu i koncentracji uwagi, angażowaniu umysłu i systemu nerwowego człowieka, a wynika z [65]:

- *samej pracy, jej charakteru i warunków*, w których się ona odbywa (odpowiedzialność, terminowość, zewnętrzne warunki zakłócające itp.),
- *cech osobowości wykonawcy pracy*, jego stanu emocjonalnego i stosunku do wykonywanych czynności (uprzedzenie, brak wiary we własne siły, zdenerwowanie, brak motywacji itp.). Oba te rodzaje obciążenia są w praktyce trudne do rozgraniczenia. Dlatego też najczęściej mówi się o obciążeniu psychofizycznym pracy.

Określenie czynników wpływających na działanie operatora jest szczególnie istotne na stanowisku wymagającym dużej koncentracji i bezbłędnej pracy (np. kontrolerzy lotów). Ma ono na celu eliminowanie zagrożenia wynikającego z ewentualnych błędów popełnianych przez operatorów. Eliminacja ta może polegać na zastępowaniu pracy człowieka automatem (np. automatyczny pilot w samolocie), eliminowanie monotonii (zmianę warunków pracy), bądź też przez wyznaczanie odpowiednich przerw w pracy (we właściwych okresach).

Jednym z bardzo istotnych czynników wpływających na pracę operatora i urządzenie są drgania mechaniczne (wibracje) oraz hałas. Wraz ze wzrostem uprzemysłowienia hałas i wibracje stały się powszechnym zagrożeniem, związanym między innymi z dużą liczbą różnorodnych źródeł. Zagrożenie to ma określone skutki zdrowotne, społeczne i ekonomiczne. Powoduje choroby zawodowe oraz może być przyczyną wypadków. Z tego też powodu wynika potrzeba stosowania działań zapobiegających lub ograniczających skutki oddziaływań hałasu i drgań mechanicznych na organizm człowieka. Skuteczne metody w tym zakresie obejmują cztery sposoby postępowania [4]:

1. Eliminacja zagrożenia poprzez jego redukcję u źródła powstawania.
2. Stosowanie środków ograniczających drgania na drodze propagacji.
3. Stosowanie środków ochrony indywidualnej.
4. Wprowadzenie rozwiązań o charakterze organizacyjnym.

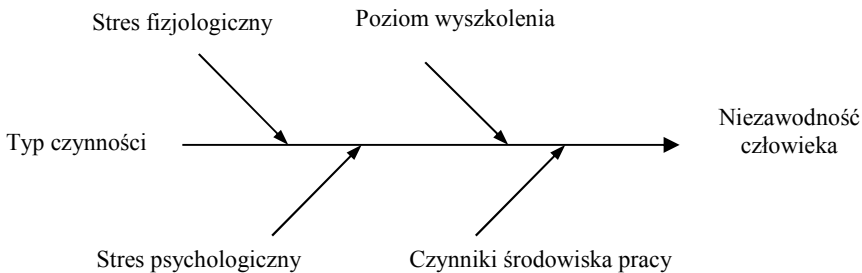


## 11.4. Model niezawodności człowieka

W dowolnym procesie pracy problem niezawodności układu antropotechnicznego sprowadza się do optymalnego skojarzenia czynnika ludzkiego z maszyną. O ile z niezawodnością maszyny inżynierowie na ogół dobrze sobie radzą, to z człowiekiem, którego zachowanie nie poddaje się ścisłym wyliczeniom matematycznym, gorzej. Równocześnie jednak w sytuacjach niezwykłych człowiek ze swoją inteligencją jest niezastąpiony. Twierdzi się, że niezawodność układu człowiek-maszyna zależy głównie od człowieka, a jeszcze bardziej, że: „każdy system, który polega na niezawodności człowieka, jest zawodny” [118].

Pod pojęciem niezawodności człowieka (operatora) rozumie się jego zdolność do dokładnego i bezbłędnego wykonywanie zadań w danym czasie pracy, zarówno w warunkach optymalnych jak i ekstremalnych. Poziom niezawodności człowieka można opisać określając prawdopodobieństwo popełnienia przez niego błędu przy wykonaniu określonego zadania, lub prawdopodobieństwo nieukończenia zadania w wyznaczonym czasie [118].

Duże zasługi w badaniach niezawodności człowieka wniosła ergonomia [38, 65] i psychologia pracy [118]. Z prowadzonych tam analiz wynika, że skłonność do popełniania przez człowieka błędów jest wynikiem nakładania się trzech grup czynników: środowiska pracy, obciążenia psychicznego i wynikającego z niego stresu oraz poziomu wykształcenia – rys. 103 [8].



Rys. 103. Czynniki wpływające na niezawodność człowieka [8]

Identyfikację źródeł zagrożenia, wynikających z obciążenia psychoneurowego człowieka oraz analizę czynników ryzyka błędnego działania operatora, prowadzi się w ramach *analizy niezawodności HRA (Human Reliability Analysis)*. Najczęstszym zastosowaniem *HRA* jest ocena działań człowieka w aspekcie wykonywania zadań operatora. Człowiek, rozpatrywany jako element systemu, może nie tylko zawieść w ten sposób, że nie wykona przewidzianych

zadań lub wykona je nieprawidłowo, ale również może wykonać czynności prowadzące do degradacji zdolności systemu do spełnienia swoich funkcji. To ostatnie nie jest jednak przedmiotem badań metod *HRA* [117].

W analizie niezawodności człowieka (na potrzeby zintegrowanych ocen ryzyka w systemie) niezbędne jest uwzględnienie tych czynników, które najbardziej wpływają na jego zachowanie. Określane są one mianem *czynników zagrożenia* i dzielą się na dwie grupy:

- *zewnątrzne* – obejmują całość środowiska pracy, szczególnie zaś konstrukcję urządzeń i maszyn, procedury oraz instrukcje pisemne i ustne,
- *wewnętrzne* – wiążą się z indywidualnymi cechami osób, ich umiejętnościami, motywacją oraz stresem.

Stanowisko pracy, w którym wymagania nałożone na człowieka przez system nie są współmierne z jego zdolnościami i możliwościami powoduje wystąpienie *stresu psychicznego*. Powinno się rozpoznawać to zjawisko, zwłaszcza gdy występuje ono na stanowisku w połączeniu z takimi czynnikami jak [154]:

- monotypia (powtarzające się czynności),
- monotonia (napływ tych samych informacji),
- czuwanie (długotrwałe utrzymywanie uwagi),
- konieczność podejmowania częstych i trudnych decyzji,

Bardzo uciążliwa jest *monotonia*. Określa się ją jako rozwijający się powolnie stan zredukowanej aktywności, który może być skutkiem długotrwałego wykonywania czynności jednostajnych [65]. Monotonia może być powodem znacznej uciążliwości psychicznej. Zawiera element niedociężenia emocjonalnego, spowodowanego brakiem lub jednostajnością bodźców lub działań oraz niezmienną sytuacją.

W najbardziej rozpoznawalnej formie występuje w stanach beczynności, długotrwałego oczekiwania, np. w czasie obserwacji wskaźników na ekranie monitora, pulpitu sterowniczego, czy podczas wielogodzinnego prowadzenia pojazdu na autostradzie. Typ monotonii, wywołanej brakiem aktywizujących bodźców wzrokowych czy słuchowych, zwany *monotonią sensoryczną*, zmniejsza znacznie aktywność funkcji psychomotorycznych, widoczną w spowolnieniu czynności układu krążenia i oddechowego, wystąpieniu senności, zmniejszeniu aktywności ruchowej i czujności. Skutkiem tego jest spadek wydajności pracy i wzrost liczby błędów [61].

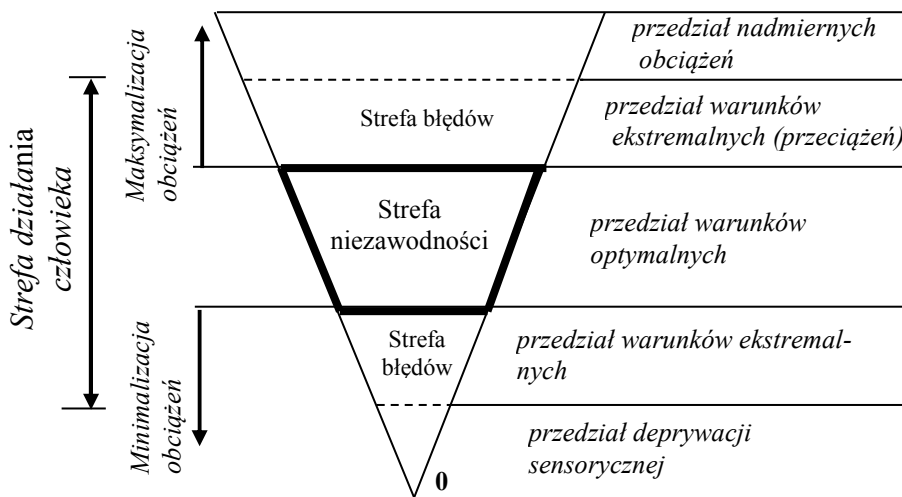
*Obciążenie psychonerwowe* występuje w każdej pracy człowieka, dlatego w żadnym wypadku nie powinno być lekceważone. Jego nasilenie zależy przede wszystkim od systemu nerwowego, który jest inny dla każdego człowieka, oraz od jego odporności na stres. Badanie obciążenia psychonerwowego jest

bardzo trudnym i złożonym problemem. Nie ma tutaj jednoznacznych mierników – jak w ocenie obciążenia pracą fizyczną. Ponadto, pojęcie obciążenia psychicznego bywa rozpatrywane z dwóch różnych punktów widzenia [118]:

- wymagań stawianych przez pracę w zakresie spostrzegania, wymaganej precyzji i szybkości działania – niezależnie od stanu psychofizycznego,
- możliwości psychofizycznych człowieka (dopasowania go do zadań).

W zakresie działań dotyczących zwiększenia niezawodności człowieka występują trzy zróżnicowane koncepcje w zależności od tego, w jakich warunkach pracy się znajduje: normalnych, optymalnych czy ekstremalnych?

Człowiek pracuje bezbłędnie tylko w przedziale warunków optymalnych. Gdy warunki zewnętrzne zmieniają się w ekstremalne (np. przeciążenie lub niedostatek informacji), wówczas zaczyna popełniać błędy (nie nadąża za bodźcami lub gubi rytm pracy), aż do odmowy działania. Stąd zadaniem nauki (zwłaszcza ergonomii) jest zapewnić warunki optymalne, w których poziom niezawodności jest najwyższy. Warunki optymalne są pojęciem rozciąglym, zależnym od różnych czynników otoczenia i psychofizycznego stanu człowieka. Działanie poza nim sprzyja zwiększonemu powstawaniu błędów – rys. 104 [38].



Rys. 104. *Model niezawodności działania człowieka wg E. Franusa* [38]

Z przedstawionego modelu wynika, że zachowanie warunków właściwych zarówno pod względem obciążenia fizycznego jak i psychicznego („nie za dużo i nie za mało”), prowadzi nie tylko do dobrego samopoczucia człowieka, ale także wykonywania przez niego zadań w sposób niezawodny.

## 11.5. Działania na rzecz bezpieczeństwa pracy

W celu zapewnienia bezpieczeństwa maszyn konieczne jest przestrzeganie zasadniczych wymogów w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa; wymogi te muszą być stosowane z odpowiednią wnikliwością, z uwzględnieniem stanu techniki w momencie powstania maszyny oraz wymogów technicznych i gospodarczych (Dyrektywa Maszynowa 2006/42/WE). Samo środowisko pracy też może stwarzać różnego rodzaju uciążliwości, wywierające negatywny wpływ na człowieka, przenosząc tym samym na niego źródło zagrożenia w zakresie pogorszenia niezawodności układu człowiek-maszyna. Może ono także zagrażać bezpośrednio zdrowiu lub życiu samego człowieka. Stąd też istotne są różnego rodzaju działania wpływające na bezpieczeństwo pracy.

W naukach technicznych pojęcie bezpieczeństwa pracy odnosi się tylko do człowieka (jako zagrożenie życia lub zdrowia) natomiast wszelkie sprawy ekonomiczne odnoszone są do niezawodności urządzenia [105].

Bezpieczne działanie jest wymaganą cechą maszyn i urządzeń technicznych. Zagadnieniami tymi zajmuje się teoria niezawodności i teoria bezpieczeństwa. Ta pierwsza zajmuje się jednak głównie zagadnieniem bezawaryjnej pracy maszyn. Ta druga koncentruje się natomiast na skutkach uszkodzeń i ryzyku.

Ogólnie pojęcie „bezpieczeństwo” oznacza przeciwieństwo ryzyka, dokładniej *„stan uwolnienia od nieakceptowanego ryzyka”*, stąd też bezpieczeństwo pracy definiuje się jako: *„pewność, że w trakcie wykonywania pracy nie będzie nieszczęśliwych wypadków, ponieważ usunięto przyczyny ich powstania lub nie dopuszczono do ich pojawienia się”* [65].

Wraz z rozwojem maszyn i nowoczesnych technologii produkcji, w tym zwłaszcza związanych z mechaniką, energetyką, transportem, przemysłem chemicznym itd., pojawiły się problemy wymagające przeciwdziałań wynikających z różnorodnych zagrożeń zdrowia i życia ludzkiego oraz uszkodzeń lub zniszczenia urządzeń i instalacji. Ich przyczyną mogą być katastrofy obiektów technicznych, zjawiska naturalne, a nawet umyślne destrukcyjne działanie ludzi.

Celem bezpieczeństwa pracy jest minimalizacja negatywnego oddziaływania obiektów technicznych i środowiska naturalnego na człowieka. Urzeczywistnia się to przede wszystkim poprzez monitorowanie stanu warunków i organizacji pracy oraz zachowań pracowników, ciągłą analizę bezpieczeństwa i ryzyka, kontrolę przestrzegania przepisów oraz zasad bezpieczeństwa i higieny pracy, kontrolę warunków pracy i standardów bezpieczeństwa, prowadzenie badań okoliczności awarii oraz wypadków przy pracy [145].

Racjonalną maksymalizacją ochrony ludzi, środowiska naturalnego i dóbr cywilizacji zajmuje się *teoria bezpieczeństwa*, zwana też inżynierią bezpieczeństwa, lub (dokładniej) inżynierią bezpieczeństwa technicznego [112]. Dyscyplina ta wyrosła z potrzeby rozwiązania problemów związanych z koniecznością przeciwdziałania zagrożeniu bezpieczeństwa stała się w ciągu ostatnich dwóch dziesięcioleci samodzielą dyscypliną naukową. Wiedza i umiejętności specjalistów z tego zakresu wykorzystywane są do [60]:

- prowadzenia analiz ryzyka, związanego z różnymi źródłami zagrożeń (człowiek, obiekt techniczny, środowisko naturalne),
- przewidywania zagrożeń, a także do prowadzenia praktycznych działań w celu ich eliminowania i zmniejszania zagrożeń związanych z użytkowaniem maszyn,
- doskonalenia metod i środków techniczno-programowych racjonalnej maksymalizacji skuteczności ochrony ludzi, środowiska naturalnego i dobór cywilizacji.

Działania na rzecz bezpieczeństwa w trakcie użytkowania maszyn, wymagają przede wszystkim wzrostu świadomości istniejących i potencjalnych zagrożeń. Działania te powinny być podejmowane w fazie [112]:

- projektowania układu człowiek-maszyna, celem zapewnienia warunków bezpiecznej pracy operatora oraz bezpieczeństwa innych ludzi,
- funkcjonowania tego układu (eksploatacji) celem poprawy stanu bezpieczeństwa (w ramach zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy).

Szczególnie dotyczy to samych elementów bezpieczeństwa maszyn np. osłon. Według dyrektywy maszynowej 2006/42/WE w odniesieniu do osłon:

- funkcje maszyny stwarzające zagrożenie, nadzorowane przez osłonę, nie mogą być wykonywane do chwili zamknięcia osłony,
- otwarcie osłony w czasie, gdy maszyna wykonuje funkcje stwarzające zagrożenie powoduje przerwanie ruchu niebezpiecznego maszyny,
- funkcje maszyny stwarzające zagrożenie, nadzorowane przez osłonę, mogą być wykonywane w czasie, gdy jest ona zamknięta, jednakże samo zamknięcie osłony nie powoduje uruchomienia maszyny.

Niezależnie od działań na rzecz bezpieczeństwa stosunku do maszyn, muszą być i są prowadzone określone działania w odniesieniu do pracowników. W myśl artykułu 273 kodeksu pracy nie wolno dopuścić pracownika do pracy, do której wykonywania nie posiada on:

- wymaganych kwalifikacji lub potrzebnych umiejętności,
- dostatecznej znajomości przepisów oraz zasad BHP.

Działania dotyczące bezpieczeństwa pracy mogą być realizowane na poziomie:

- przedsiębiorstwa, jako zbioru stanowisk pracy,

- wydziału, jako grupy jednorodnych stanowisk pracy,
- stanowiska pracy, jako określonego układu człowiek-maszyna.

Pracodawca jest zobowiązany przed dopuszczeniem pracownika do pracy zapewnić jego przeszkolenie w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy. Szkolenia BHP prowadzone są zgodnie z rozporządzeniem ministra gospodarki i pracy z dnia 27 lipca 2004 r. w sprawie szkolenia w dziedzinie bezpieczeństwa (Dz. U. Nr 180, poz. 1860). Wyszukowanie pracownika, to często niemały koszt, ale w perspektywie czasowej dobre szkolenie zwraca się kilkukrotnie [121].

Szkolenia pracownika w zakresie konkretnych umiejętności potrzebnych na danym stanowisku pracy należą do obowiązków pracodawcy. Celem szkolenia jest sprawne przeniesienie wiedzy i umiejętności, nabytych w toku szkolenia, na praktyczne sytuacje robocze oraz wykształcenie silnych nawyków zawodowych i utrzymanie wysokiego standardu działalności. Potrzeby szkoleniowe określone są przez kierowników komórek organizacyjnych na podstawie przeglądów i sprawdzeń kwalifikacji zatrudnionych pracowników oraz aktualnych potrzeb.

Celem szkolenia jest uzyskanie przez pracownika:

- informacji o czynnikach środowiska, występujących na danym stanowisku pracy i w jego bezpośrednim otoczeniu oraz o ryzyku zawodowym związanym z wykonywaną pracą,
- wiedzy i umiejętności dotyczących sposobów ochrony przed zagrożeniami wypadkowymi i zagrożeniami dla zdrowia w warunkach normalnej pracy i w warunkach awaryjnych,
- wiedzy i praktycznych umiejętności z zakresu bezpiecznego wykonywania pracy.

Szkolenie pracowników w zakresie BHP obejmuje trzy rodzaje szkoleń [121]:

1. *Szkolenie wstępne*, w ramach którego przeprowadza się:
  - szkolenie wstępne ogólne (instruktaż ogólny),
  - szkolenie wstępne na stanowisku pracy (instruktaż stanowiskowy),
2. *Szkolenie wstępne w zakresie BHP – instruktaż ogólny*. Przechodzą go wszyscy nowo zatrudnieni pracownicy, a także studenci odbywający praktyki studenckie i uczniowie szkół zawodowych odbywający praktyczną naukę zawodu w zakładzie pracy.
3. *Szkolenie wstępne w zakresie BHP – instruktaż stanowiskowy*, który przeprowadza się przed dopuszczeniem do wykonywania pracy na określonym stanowisku pracy dla pracownika zatrudnionego na stanowisku robotniczym oraz innym, na którym występuje narażenie na działanie czynników szkodliwych dla zdrowia, uciążliwych lub niebezpiecznych.

## 11.6. Podsumowanie

Rozdział 11. dotyczy analizy działania człowieka w systemie eksploatacji. W procesie użytkowania pomiędzy maszyną, a człowiekiem tworzą się więzi, skutkiem których powstaje *układ człowiek-maszyna*. Układ ten jest systemem sterowanym i ukierunkowanym na osiągnięcie zaplanowanego celu oraz posiada hierarchiczną strukturę z człowiekiem podmiotem działania. Niezależnie od rodzaju maszyny czy urządzenia podmiotem działania jest zawsze człowiek ze swymi potrzebami i umiejętnościami. Na przykładzie kierowcy pojazdu samochodowego omówiono czynności i zachowania się człowieka jako operatora.

Człowiek wraz z maszyną i środowiskiem tworzą system działania, określany jako system antropotechniczny. Omówiono zatem istotne czynniki, które wpływają na zachowania się człowieka w tym systemie. Czynniki te mają zwykle ujemny wpływ na percepcję informacji i pogarszają pracę człowieka jako operatora maszyny. Podkreślono tu, że szczególnie ważne są czynniki wynikające ze stanów awaryjnych maszyny, ponieważ nie można do nich zastosować procedur normalnego szkolenia. Stąd ważnym zagadnieniem staje się dobieranie właściwych ludzi (pod względem cech psychomotorycznych) na określone stanowiska.

O ile z niezawodnością maszyny inżynierowie na ogół dobrze sobie radzą, to z człowiekiem (którego zachowanie nie poddaje się ścisłym wyliczeniom matematycznym) – gorzej. Omówiono zatem ogólne czynniki wpływające na niezawodność człowieka w procesie działania z maszyną. Podkreślono, że szczególnie uciążliwe dla człowieka jest działanie przy powtarzających się czynnościach (monotypia), napływie tych samych informacji (monotonia) oraz konieczności podejmowania częstych i trudnych decyzji. Podano, że człowiek działa najbardziej niezawodnie w strefie stanów optymalnych zarówno w odniesieniu do obciążeń fizycznych jak i informacyjnych (nie za dużo oraz nie za mało jednego i drugiego).

Omówiono system działań wpływających na bezpieczeństwo pracy człowieka. Podano, że racjonalną maksymalizacją ochrony życia i zdrowia człowieka zajmuje się wyodrębniona, z inżynierii eksploatacji dyscyplina wiedzy, nazywana inżynierią bezpieczeństwa. W ramach tej dyscypliny prowadzone są szerokie badania dotyczące czynników wpływających na niezawodność człowieka – jako operatora maszyny. Podkreślono, że zgodnie z istniejącym prawem, przygotowując człowieka do pracy z maszyną, niezbędne są odpowiedniego rodzaju szkolenia w zakresie BHP i scharakteryzowano zakres takich szkoleń.

## 12. METODY POPRAWY NIEZAWODNOŚCI

### 12.1. Problemy doskonalenia niezawodności

„Rzeczywistość z gruntu niedoskonała i rzeczywistość powszechnie dążąca do doskonałości – to dwa oblicza tej samej rzeczywistości (technicznej), w której nam żyć wypada” – pisze W.W. Bojarski w swojej książce „Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych” [12]. Rzeczy materialne wytworzone przez człowieka są niedoskonałe i dążność do ich udoskonalania jest potrzebą, a nawet obowiązkiem ludzi zajmujących się techniką.

Działalność techniczna to ciągle poszukiwanie usprawnień i udoskonaleń [132]. Głównym powodem takiego działania jest konieczność sprostania zmieniającym się ludzkim potrzebom [25]. Doskonalić oznacza „czynić coraz lepszym”, usprawnianie określane jest natomiast jako: „ulepszenie mające na celu sprawniejsze wykorzystanie maszyn, urządzeń i siły roboczej w procesie technologicznym; modernizację, usprawnienie organizacyjne lub techniczne” [147].

Architekt projektując most, który ma długo spełniać swoją funkcję, opiera się na wyliczeniach inżyniera. Inżynier oblicza wytrzymałość i inne parametry trwałości konstrukcji wykorzystując, m.in. teorię niezawodności. Teoria niezawodności jest nauką interdyscyplinarną, która wyrosła z potrzeby sprostania rosnącym wymaganiom stawianym obiektom technicznym – większej odporności na awarie. Szczególnie ważnym aspektem tej teorii jest ilościowe ujęcie niezawodności obiektu, pozwalające na ocenę czasu trwania jego przydatności. Dysponując wiarygodną oceną jego niezawodności i przedziałem ufności dla tej oceny, można podjąć racjonalną decyzję o tym, kiedy należy wymienić określoną część lub poddać go czynnościom modernizacyjnym.

Modernizacja i usprawnianie to pojęcia bliskoznaczne. *Modernizacja* jest jednak zwykle nastawiona na unowocześnienie, które prowadzi do wzrostu wartości użytkowej środka technicznego po jej przeprowadzeniu, na przykład zainstalowanie dodatkowych przyrządów w maszynie w celu zapobiegania uszkodzeniom (poprawy niezawodności). Formy modernizacji to [154]:

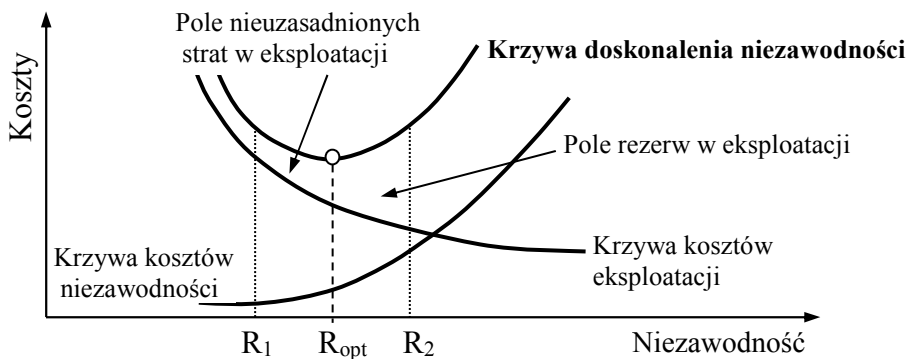
- *przebudowa* (zmiana istniejącego stanu na inny),
- *rozbudowa* (powiększenie, dobudowanie nowych elementów),
- *rekonstrukcja* (odtworzenie na podstawie zachowanych fragmentów),
- *adaptacja* (przystosowanie lub przerobienie do innego użytku).



Dokonując modernizacji maszyn przez doskonalenie ich niezawodności, pojawiają się dwa zasadnicze problemy do rozwiązania:

- jaki poziom niezawodności maszyny jest potrzebny?
- czy uzyskanie takiej niezawodności jest uzasadnione ekonomicznie?

Wszystko bowiem kosztuje. Decyzja wykonania jakiegokolwiek zadania powinna być wynikiem kompromisu między kosztami jego wykonania i ryzykiem, że wymagana niezawodność nie będzie osiągnięta, jeżeli zadanie to nie będzie wykonane. Podejście to określa się jako zasadę planowania optymalnego programu niezawodności. Graficzny obraz tej zasady zobrazowano na rys. 105 [102].

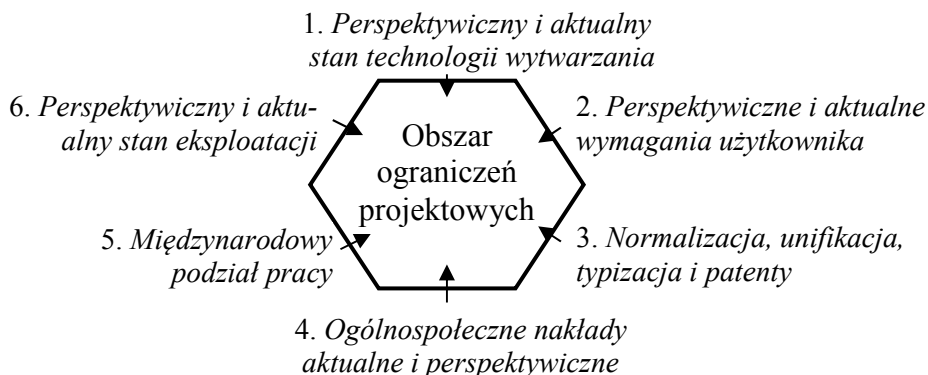


Rys. 105. *Wyznaczanie optymalnego programu zapewnienia niezawodności* [102]

- niezawodność większa od optymalnej ( $R_2 > R_{opt}$ ) – część potencjału maszyny nie zostanie wykorzystana,
- niezawodność mniejsza od optymalnej ( $R_1 < R_{opt}$ ) – powstaną nieuzasadnione straty w eksploatacji obiektu.

W rzeczywistości technicznej krzywa doskonalenia niezawodności stanowi odzwierciedlenie serii decyzji, wynikających z analizy kosztów eksploatacji oraz kosztów prac modernizacyjnych. Proces projektowania nie kończy się zatem z chwilą opracowania odpowiedniej dokumentacji, ale obejmuje permanentne działania doskonalące (wykrywanie błędów konstrukcyjnych i wykonawczych oraz analizę tych błędów i ich przyczyn) [139].

Doskonalenie niezawodności ma swoje podstawy zarówno w naukach technicznych (opartych na fizyce), jak i naukach społecznych (bazujących na preferencjach) [132]. Stąd też wymagania niezawodnościowe stanowią zbiór postulatów i ograniczeń wynikających z sześciu obszarów zagadnień – rys. 106 [139].



Rys. 106. *Obszar ograniczeń projektowych związanych z doskonaleniem niezawodności* [139]

Niezawodność, zwłaszcza w układzie subkontynentu euroazjatyckiego, jest właściwością pierwszoplanową, a jednocześnie najtrudniejszą do osiągnięcia [102]. Problemy zapewniania niezawodności w skali makro można bowiem podzielić na występujące w sferze:

- badawczej – opracowanie sformalizowanych modeli matematycznych,
- projektowej – racjonalne kształtowanie struktur niezawodnościowych,
- produkcji – wdrażanie odpowiednich metod kontroli jakościowej,
- eksploatacji – ustalanie czasów wymian określonych części i zespołów.

Działania na rzecz zwiększenia niezawodności można podzielić na cztery grupy:

- *unikanie defektów* – stosowanie technik zmniejszających liczbę błędów,
- *wykrywanie defektów* – funkcje wewnętrzne wykrywające błędy,
- *poprawianie defektów* – środki usuwające szkody powstałe z błędów,
- *tolerowanie defektów* – zdolność maszyny do działania przy błędach.

Z tych czterech podstawowych technik największą wartość ma unikanie defektów, zgodnie z zasadą, że „*lepiej zapobiegać, niż leczyć*”. Projektując obiekt nie można jednak nigdy zakładać, że będzie on wolny od błędów. Jeżeli przyjmujemy (realistycznie) możliwość wystąpienia błędu, to wagi podstawowej nabiera wykrywanie defektów. Dopiero wówczas, gdy potrafimy wykryć błąd, będzie można go poprawić lub tolerować. W tym zakresie rozróżnia się dwie metody:

- *bierną*, która polega na wykryciu symptomów defektów podczas wykonywania normalnej pracy obiektu (obecnie od niej odchodzi się),
- *czynną* – polegającą na wykrywaniu defektów w procesie symulacji na podstawie opracowanego modelu urządzenia.

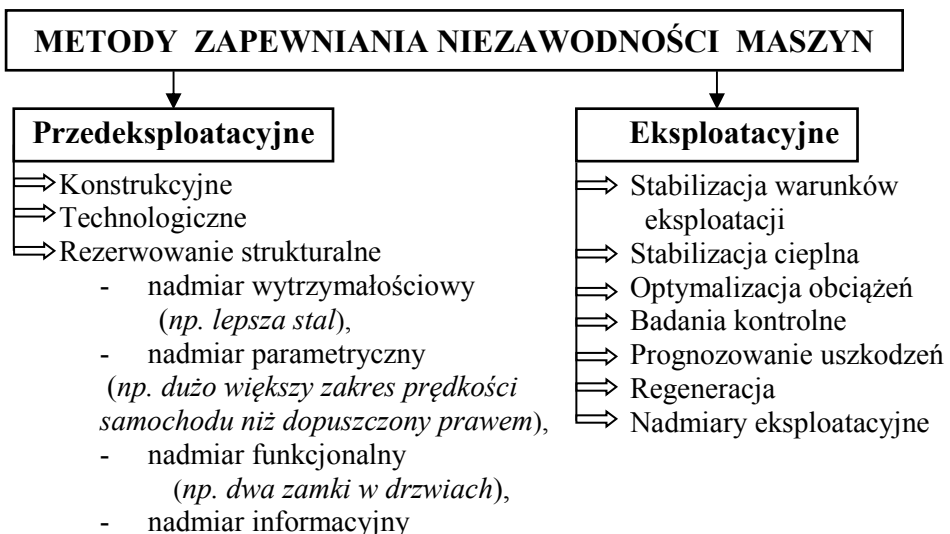
## 12.2. Metody przedeksploatacyjne

W celu otrzymania maszyny o odpowiednio dużej niezawodności w trakcie eksploatacji, należy podjąć odpowiednie starania już w fazie projektowania i konstruowania prototypu, a następnie produkcji. Punktem wyjściowym przy tego rodzaju pracach jest analiza jej słabych ogniw. Przez *słabe ogniwo* należy rozumieć każdy element (część) badanej maszyny, którego podatność na uszkodzenia jest duża (większa od wartości średniej pozostałych). Słabe ogniwa są potencjalnym źródłem defektów i uszkodzeń całego obiektu. Likwidacja słabych ogniw stanowi „punkt ciężkości” w pracach zapewniania niezawodności.

Wzrastające wymagania dotyczące tej charakterystyki maszyn sprawiają, że musi wzrastać odporność ich części na niszczące działanie różnego rodzaju czynników występujących w czasie pracy. Osiąga się to przez [102]:

- zastosowanie lepszych materiałów (*metody konstrukcyjne*),
- zwiększanie odporności warstwy wierzchniej części maszyn (*metody technologiczne*).

To są działania stosowane możliwe do realizacji w fazie przedeksploatacyjnej. Oprócz tego możliwe są jeszcze pewne działania już w trakcie eksploatacji. Stąd metody zapewniania niezawodności maszyn dzieli się ogólnie na dwie grupy – rys. 107 [102].



Rys. 107. *Klasyfikacja metod zapewniania niezawodności maszyn* [102]

*Metody przedeksploatacyjne*, stosowane w fazie opracowywania, konstruowania i produkcji maszyn, są najbardziej efektywne z punktu widzenia ekonomii. Największe możliwości oddziaływania na niezawodność występują w fazie ich projektowania. Na tym etapie kształtuje się podstawowe cechy elementów maszyn, które winny być następnie uzyskane na etapie wytwarzania.

Istotnym elementem metod przedeksploatacyjnych zapewnienia niezawodności są odpowiednio ukierunkowane obliczenia zużycia elementów maszyn. W celu określenia parametrów wyjściowych dotyczących tych elementów, gdy zmiany charakterystyk początkowych zachodzą w rezultacie zużywania się poszczególnych par tarcia, niezbędne jest przede wszystkim ustalenie funkcjonalnego związku między parametrami wyjściowymi i stopniem zużycia par tarcia danej maszyny. Należy zatem obliczyć prawdopodobieństwo, z jakim parametry wyjściowe maszyny będą przyjmować określone wartości w zależności od stopnia zużycia. Związek ten będzie miał charakter losowy [102].

W wielu przypadkach sens projektowania niezawodnościowego sprowadza się zatem do modelowania statystycznego oraz optymalizacji wieloparametrowej. Obie te metody mogą się wzajemnie uzupełniać i służyć jako pełnowartościowe narzędzie pracy konstruktora, o ile będą znane określone prawidłowości stochastyczne lub statystyczne [139]. W tym zakresie prof. P. Olpiński, opracował nomogram, który pozwala uwzględniać te prawidłowości (nomogram ten zamieszczono na rys. 110 w podrozdziale 12.4.).

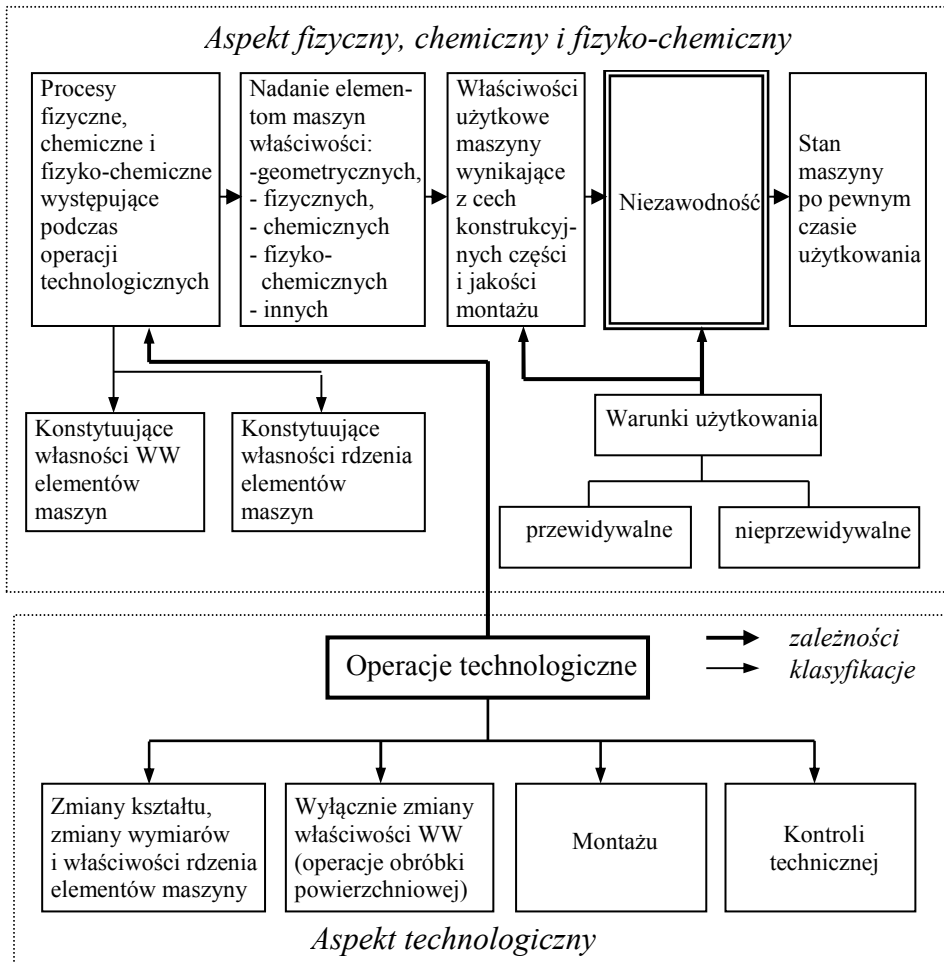
Czynności składające się na proces konstruowania z uwzględnieniem niezawodności można podzielić na następujące grupy [102]:

- zbieranie informacji – badania eksploatacyjne,
- tworzenie projektu – analiza i synteza niezawodnościowa,
- weryfikacja projektu – symulacyjne metody niezawodności,
- tworzenie dokumentacji projektowej i eksploatacyjnej.

Do projektowania niezbędne są więc pewne dane eksploatacyjne. W tym zakresie rozróżnia się dwie grupy badań:

- *określające* (w warunkach użytkowania), ich celem jest określenie wskaźników niezawodności,
- *kontrolne*, których celem jest sprawdzenie wskaźników niezawodności.

Badania kontrolne przeprowadzane są przez producenta, najczęściej w warunkach laboratoryjnych, metodą stopniowanych obciążeń. Pozwalają one, w przypadku potrzeby, podjąć określone działania dotyczącej konstrukcji tej części bądź jej wytwarzania. Określony poziom niezawodności można otrzymać przy wielu kombinacjach (łączeniu) działań – rys. 108.



Rys. 108. Schemat związków przyczynowo-skutkowych w zakresie niezawodności części maszyn na etapie przedeksplatacyjnym [102]

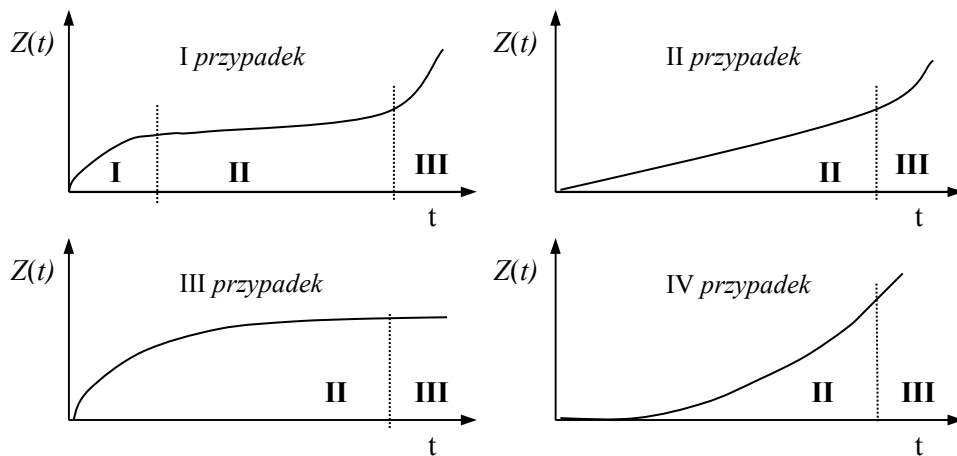
Przez zastosowanie odpowiedniej kombinacji metod technologicznych, np. chemicznych (nawęglanie) i cieplnych (hartowanie) uzyskuje się zwiększenie odporności warstwy wierzchniej elementu na ścieranie, a przez to poprawę właściwości użytkowych maszyny. Należy jednak pamiętać, że każda technologia (z punktu widzenia niezawodności) ma swoje „dobre” i „złe” strony, np. w wyniku śrutowania powierzchnia utwardza się oraz powstają ślady stanowiące przestrzenie, w których zatrzymuje się smar. Jednocześnie jednak niekorzystnie zmniejsza się udział nośny [102]. Wystąpienie skutków ubocznych powoduje zatem konieczność dodatkowej obróbki (w tym przypadku szlifowania).

## 12.3. Metody eksploatacyjne

Konstruktor maszyny nie zawsze jest w stanie określić, jaki wystąpi rodzaj zużycia elementu i jaka będzie jego intensywność w procesie eksploatacji. Niejednokrotnie brakuje pełnych informacji odnośnie cech wytrzymałościowych materiałów, które powinny być zastosowane np. przy bardzo wysokim ciśnieniu i temperaturze. Stąd też przedeksplatacyjne metody zapewniania niezawodności nie w każdym przypadku są skuteczne.

Okresem najbardziej intensywnym i zazwyczaj najdłuższym jest eksploatacja. Prowadzenie jej w sposób efektywny wymaga właściwej realizacji wielu równoległych działań. Między innymi w tym obszarze wykonuje się zadania wynikające z reaktywnego i pro aktywnego utrzymania ruchu. Udoskonalenia w tym zakresie dotyczą głównie tworzenia i wdrażania odpowiedniej strategii utrzymania oraz – w ramach tego – sprowadzanie stosunku działań proaktywnych i reaktywnych do pożądanego poziomu [76]. Powoduje to nie tylko poprawę niezawodności, ale również znaczne oszczędności w kosztach eksploatacji. Przewodzące firmy na całym świecie utrzymują stosunek działań pro- i reaktywnych na poziomie 80/20, i dążą do dalszego zwiększania udziału działań pro aktywnych. Bardzo duże znaczenie mają również pozostałe elementy programu zarządzania cyklem życia zasobów w tym zwłaszcza docieranie [102].

*Docieranie* jest procesem polegającym na wzajemnym dopasowywaniu wszystkich części współpracujących w maszynie [75]. Uogólniając dynamikę zużywania różnych elementów maszyn w funkcji czasu, przebiegi funkcji  $Z(t)$  można sprowadzić do czterech podstawowych przypadków – rys. 109 [16].



Rys. 109. *Typowe przypadki przebiegu zużywania  $Z$  w funkcji czasu  $t$*  [16]

Docieraniu poddaje się maszynę nową oraz po naprawie głównej. Czas i sposób przeprowadzania docierania ma istotny wpływ na przebieg dalszej eksploatacji, tj. na długość okresu jej bezawaryjnej pracy (niezawodność maszyny).

*Przypadek I* – jest to najczęściej spotykany przebieg zmian wielkości zużycia, opisany klasyczną krzywą Lorenza, z dobrze zarysowaną fazą docierania eksploatacyjnego (etap I). Ze względu na możliwość zatarcia, maszyna w tej fazie nie może być użytkowana na pełnej swojej mocy.

*Przypadek II* – występuje wówczas, gdy eksploatowany element został poddany jednej z metod obróbki dokładnościowej (docieranie warsztatowe). Zaletą tego rodzaju obróbki jest to, że okres docierania eksploatacyjnego w wielu maszynach może być skrócony, a nawet pominięty.

*Przypadek III* – w okresie zużywania intensywność ciągle maleje. Taki charakter zużywania występuje np. na powierzchniach lemieszy pługów w kierunku poprzecznym do ruchu. Po okresie stosunkowo dużej intensywności prędkość zużywania stabilizuje się.

*Przypadek IV* – zużywanie elementu przebiega wzdłuż linii wklęsłej o intensywności stale wzrastającej. W ten sposób przebiega zużywanie gładzi cylindrowej, łącznie z pierścieniami tłokowymi silników samochodowych, na długości drogi około 100 tys. km.

Docieranie może mieć różne formy lub fazy. Ogólnie rozróżnia się 3 formy:

- docieranie wstępne,
- docieranie zasadnicze,
- docieranie eksploatacyjne.

*Docieranie wstępne* (określane też warsztatowym) ma na celu głównie sprawdzenie prawidłowości działania mechanizmów. Przeprowadza się je u wytwórcy (w przypadku nowej maszyny) lub w zakładzie naprawczym (po naprawie głównej). Polega ono na wykonywaniu ruchów roboczych, jak podczas normalnej pracy, ale bez maksymalnego obciążenia, przy średnich obrotach silnika i stanowi wstęp do docierania zasadniczego.

*Docieranie zasadnicze* jest najważniejszą fazą docierania i wymaga szczególnej staranności. Polega ona na eksploatacji maszyny przy początkowym obciążeniu wynoszącym ok. 1/3 obciążenia nominalnego i zwiększanym stopniowo do ok. 70% obciążenia znamionowego. Po jego zakończeniu należy wymienić np. olej w silniku, skrzyni biegów, w mostach napędowych i przekładniach, a następnie wykonać szczegółowe oględziny i sprawdzenie wszystkich mechanizmów maszyny.

*Docieranie eksploatacyjne* przeprowadza się już w normalnych warunkach pracy, ale przy obniżonym do ok. 70% obciążeniu. W praktyce, oznacza to dla użytkownika nic innego jak normalną eksploatację, oczywiście bez „szaleństw”. W tej fazie docierania obserwuje się poszczególne węzły maszyny, a zwłaszcza sprawdza wskazania przyrządów kontrolnych, przysłuchuje się pracy mechanizmów (przede wszystkim silnika), kontroluje szczelność połączeń na przewodach paliwowych, olejowych i układu chłodzenia. Trzeba też ściśle przestrzegać terminów i sposobów smarowania, właściwej jakości smarów oraz sprawdzać i dokręcić nakrętki i śruby głowic cylindrów, wtryskiwaczy, zamocowania silników i innych ważnych połączeń i zamocowań [141].

Czas trwania poszczególnych faz docierania ustalają normy przedmiotowe, instrukcje i dokumentacje techniczno-ruchowe. Po zakończeniu docierania maszyna może być poddana normalnej eksploatacji przy 100-procentowym obciążeniu nominalnym. Należy pamiętać, że sposób docierania maszyn, nawet podobnych typów, może się różnić. Wynika to z różnic konstrukcyjnych, dokładności pasowania oraz sposobu obróbki poszczególnych części.

Szczególnie starannie należy przeprowadzać docieranie napędowych silników spalinowych, niezależnie od wstępnego docierania na stanowisku w haldowni fabrycznej lub w zakładzie naprawczym. Stosowane dawniej do produkcji silników materiały, technologie i narzędzia powodowały, że nowy silnik montowany był nie z zawsze dobrze pasujących do siebie części i elementów. Ich dopasowanie następowało po wielu miesiącach żmudnego docierania.

Współczesne maszyny są wykonywane bardzo dokładnie i starannie, a stosowane technologie i narzędzia pomiarowo-kontrolne pozwalają na uzyskiwanie lepszego, wzajemnego dopasowania elementów, niż kiedyś było to znane jedynie z teorii. Mimo tak precyzyjnego wykonania, silnik tak jak każda maszyna, wymaga dotarcia tak, aby pasowania były jeszcze precyzyjniejsze, części lepiej ze sobą współpracowały, a ewentualne błędy produkcyjne zostały usunięte. Okres docierania współczesnego silnika nie jest już tak długi jak kiedyś. W praktyce już po 2000 km można maksymalnie obciążać silnik. Nie powinno się jednak przekraczać obrotów maksymalnego momentu obrotowego [141].

Niezależnie od docierania, istotne rezerwy zwiększania niezawodności maszyn tkwią także w ich *prawidłowej (racjonalnej) eksploatacji*. Polega to głównie na: stabilizacji warunków pracy, warunków cieplnych i optymalizacji obciążeń. Ponadto, wybór właściwego harmonogramu pracy maszyny oraz *przestrzeganie terminów określonych obsług*, może w znaczny sposób wpłynąć na zmniejszenie liczby uszkodzeń eksploatacyjnych, a tym samym zapewnić większą jej niezawodność (*działania o charakterze ekonomiczno-organizacyjnym*).



## 12.4. Metody rezerwowania

Do najskuteczniejszych sposobów zwiększania niezawodności elementów maszyn należy jednak zdecydowanie stosowanie wszelkiego rodzaju nadmiarów (konstrukcyjnych i eksploatacyjnych). Ten sposób (metodę) postępowania określa się jako *rezerwowanie* [114]. Postępowanie to należy do grupy metod opartych na redundancji (*redundancja* – obecność w obiekcie więcej niż jednego środka niezbędnego do wypełniania wymaganej funkcji). Jej istota polega na tym, że dla elementów lub zespołów przewiduje się jeden lub kilka elementów zapasowych, które w miarę występowania uszkodzeń zastępują w pracy elementy uszkodzone. Zapewnia to prawidłową pracę całego urządzenia, pomimo wystąpienia uszkodzenia elementu podstawowego. W zależności od tego z jakim przypadkiem mamy do czynienia, różni się redundancję [122]:

- *nieobciążoną (bierną)*, przy której z założenia pracuje tylko część środków przeznaczonych do wypełniania wymaganej funkcji, natomiast pozostała część tych środków jest nieczynna aż do chwili wystąpienia konieczności ich wykorzystania.
- *obciążoną (czynną)*, przy której z założenia wszystkie środki, przeznaczone do wypełniania wymaganej funkcji, mają pracować jednocześnie.

Kryterium tak dokonanego podziału stanowi sposób przyporządkowania elementów rezerwowych elementom podstawowym.

Redundancja (nadmiarowość) ma jednak znacznie szersze formy. Wyróżnia się bowiem nadmiary [102]:

- *parametryczne* – właściwości fizyczne są „lepsze” od potencjalnie niezbędnych do realizacji założonej funkcji, np. w silniku elektrycznym zastosowanie dwóch par szczotek zbierających prąd z komutatora (przy jednej parze znacznie szybciej następuje wypalanie się wycinków komutatora),
- *strukturalne* – wprowadzanie do struktury urządzenia elementów rezerwowych, bez których urządzenie to może działać, a które służą tylko do podniesienia jego niezawodności, np. w silniku elektrycznym uzwojenie szeregowo i bocznikowe,
- *funkcjonalne* – inne elementy urządzenia są w stanie przejąć pewne funkcje elementu uszkodzonego, choć mogą je realizować gorzej, np. zastosowanie prowadnicy posuwisto-obrotowej na wałku rozrusznika z dźwignią, w celu zapewnienia właściwego ząbienia koła zębatego rozrusznika z wieńcem na kole zamachowym silnika spalinowego; dźwignia oraz prowadnica posuwisto-zwrotna umożliwiają pewne ząbienie się zębniaka rozrusznika z wieńcem koła zamachowego silnika,

- *informacyjne* – stosuje się do wiadomości przesyłanych w systemach transmisji danych lub przechowywanych w systemach gromadzenia danych, aby podnieść niezawodność przekazywanej informacji, np. w samolocie stosowane są trzy obwody sterowania, które przekazują informację oddzielnymi kanałami (element generujący błędną decyzję zostaje zdominowany przez dwa pozostałe),
- *czasowe* – uszkodzenie elementu nie powoduje natychmiastowej niezdatności obiektu, dysponuje się pewnym czasem na podjęcie działań przeciwdziałających wystąpieniu uszkodzenia urządzenia jako całości,
- *wytrzymałościowe* – np. w przekładni planetarnej jeden z elementów (koło słoneczne lub satelity) jest wykonany z materiału o większej wytrzymałości.

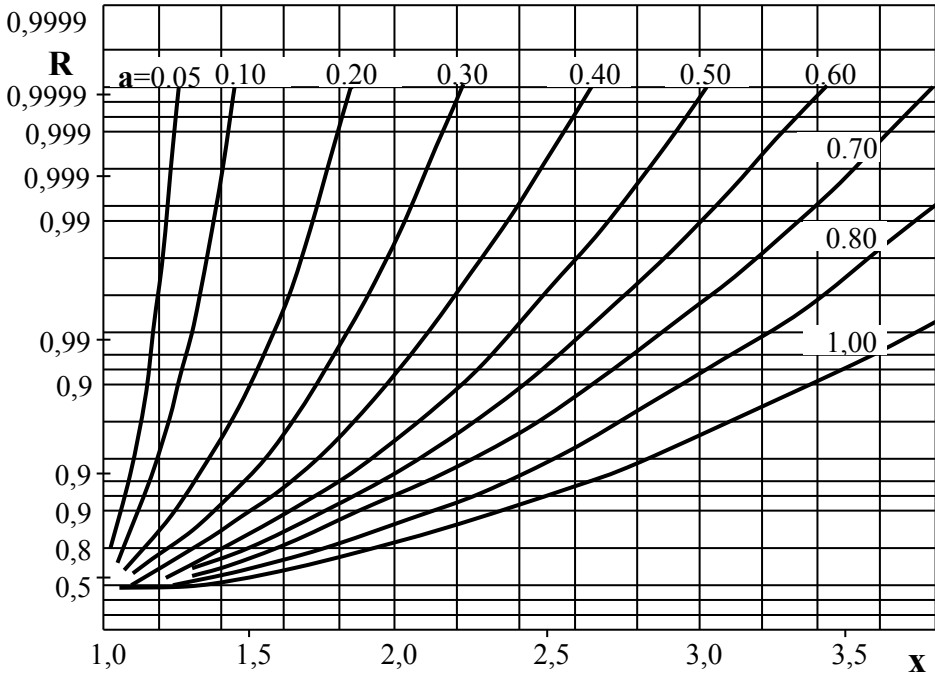
Omawiając zagadnienie nadmiarowości warto zwrócić szczególną uwagę na współczynnik bezpieczeństwa, stosowany powszechnie jako nadmiar wytrzymałości w budowie maszyn. *Współczynnik bezpieczeństwa* – to stosowana w inżynierii liczba niemianowana, mówiąca, ile razy wartość dopuszczalna jest mniejsza od wartości uznawanej za niebezpieczną.

Podczas projektowania wprowadza się współczynnik bezpieczeństwa, ponieważ z reguły nie jest możliwe dokładne określenie wszystkich możliwych obciążeń konstrukcji, metody obliczeniowe cechuje pewien błąd. Oznaczając przez  $Z_z$  wartość nominalną wytrzymałości, a przez  $k$  – naprężenie dopuszczalne, iloraz tych wartości stanowi współczynnik bezpieczeństwa  $x$  [56]:

$$x = \frac{Z_z}{k} . \quad (72)$$

Wartość współczynnika bezpieczeństwa jest zmienna (ogólnie wynosi od 1,5 do 3 dla materiałów plastycznych i od 8 do 12 dla materiałów kruchych). Uwzględnia on bowiem: stopień skomplikowania konstrukcji, wymaganą minimalną niezawodność, cykl obciążenia konstrukcji i dopuszczalne błędy [154]. Zmniejszanie współczynnika bezpieczeństwa (co w praktyce odpowiada zwiększeniu naprężeń dopuszczalnych) jest równoważne ze zmniejszaniem marginesu bezpieczeństwa. Współczynnik bezpieczeństwa  $x$  jest więc związany z tym, czego nie wiemy o obiekcie. Najczęściej nie wiemy dokładnie, jakie są rozkłady wytrzymałości i naprężeń.

Jeżeli znane są (lub można założyć) średnie wartości wytrzymałości i naprężenia oraz ich odchylenia standardowe, to przy założeniu normalności rozkładów można, z zależności opracowanej przez P. Olpińskiego, wyznaczyć związek pomiędzy współczynnikiem  $x$  oraz niezawodnością  $R$ . Nomogram do wyznaczania tej zależności przedstawiono na rys. 110 [56].



Rys. 110. Wykres P. Olpińskiego obrazujący zależność między niezawodnością  $R$  oraz współczynnikiem bezpieczeństwa  $x$  [56]

Współczynnik  $a$  (na nomogramie) ujmuje związek pomiędzy miarami statystycznymi wytrzymałości i naprężenia i obliczany jest wg zależności:

$$a = \sqrt{\left[ \frac{s(\sigma)}{E(\sigma)} \right]^2 + \left[ \frac{s(Z)}{E(Z)} \right]^2}, \quad (73)$$

gdzie:

$\overline{E(\sigma)}$  – średnia wartość wytrzymałości,

$\overline{E(Z)}$  – średnia wartość naprężenia,

$s(\sigma)$  – wartość odchylenia standardowego wytrzymałości,

$s(Z)$  – wartość odchylenia standardowego naprężenia.

Wynika z niej, że im mniejsze są wartości odchyżeń standardowych i większe wartości średnie naprężenia i wytrzymałości, tym większa niezawodność przy tym samym współczynniku bezpieczeństwa  $x$ .

## 12.5. Informatyka w doskonaleniu niezawodności

Współcześnie trudno sobie nawet wyobrazić działania związane z zapewnianiem niezawodności maszyn, pojazdów, czy też innych obiektów technicznych bez komputerów i technologii informatycznej. Skrajnie różne warunki eksploatacyjne, rozbieżne warunki techniczne i sprzeczne niekiedy uwarunkowania systemowe powodują, że sensowne prace z zakresu niezawodności są wykonalne jedynie przy aktywnym wykorzystaniu tej technologii (systemy diagnostyczne, systemy ekspertowe, sztuczna inteligencja, itp.). Głównym powodem odwołania się do tych systemów jest świadomość, że wiedza o rozpatrywanym problemie nie jest ani całkowita, ani w pełni prawdziwa [141].

Systemy informacyjne w eksploatacji maszyn skutecznie wspomagają trzy podstawowe grupy problemowe [159]:

1. Problemy optymalnego kierowania eksploatacją maszyn.
2. Problemy optymalizacji struktur organizacyjnych systemu eksploatacji maszyn.
3. Problemy optymalizacji właściwości eksploatacyjnych maszyn.

Wykorzystanie informatyki w doskonaleniu niezawodności można zakwalifikować do pierwszej grupy problemowej, czyli dotyczącej podejmowania decyzji w sferze szeroko rozumianego zarządzania eksploatacją maszyn. W pierwszym rzędzie jest to konwencjonalne wykorzystanie komputera, umożliwiające przyspieszenie realizacji zadań eksploatacyjnych, dozоровanie obiektu, optymalizację działań podczas obsługi technicznego oraz pomoc podczas badań (modelowanie, symulacja, obróbka statystyczna uzyskanych wyników).

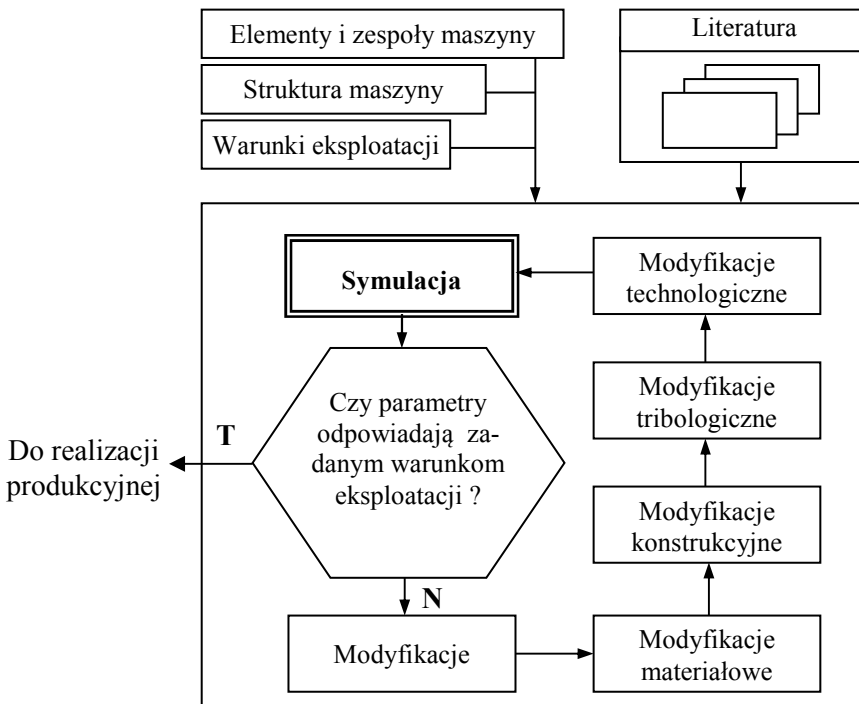
W rozwoju informatyzacji w doskonaleniu niezawodności maszyn można wyodrębnić trzy główne etapy:

- 1) obejmujący systemy dozoru, pracujące na zasadzie wykorzystywania pojedynczego komputera, np. komputer pokładowy zainstalowany w samochodzie. Zwykle mierzy on i wyświetla podstawowe parametry pracy silnika (CHECK CONTROL) oraz podaje użyteczne informacje podczas jazdy (zużycie paliwa, prędkość średnia, czas podróży, itp.). Procesy, które nadzorują komputery pokładowe, zapewniają żywotność samochodowi i są one jednym z najważniejszych czynników uzyskania jego wysokiej niezawodności.
- 2) obejmujący systemy pracujące także na zasadzie wykorzystywania pojedynczego komputera, ale do którego podłączono sieć przekąźnikową (co stało się możliwe dzięki ulepszonemu oprogramowaniu, wykorzystującemu telekomunikację). Dla przykładu można tu wymienić sateli-

tarny system Komtrax, będący na wyposażeniu maszyn budowlanych Maszyna wyposażona w ten system Komtrax w regularnych odstępach czasu przekazuje odpowiednie dane do centralnego serwera Komatsu (znajdującego się u producenta danego typu maszyn). Pozwala to na stworzenie dokładnego protokołu pracy, w dowolnie określonym przedziale czasowym. Ten swoisty „życiorys” pozwala na ustalenie obciążeń, jakim podlegała maszyna oraz wychwycenie ewentualnych usterek lub też zoptymalizowanie stopnia wykorzystania sprzętu [144].

- 3) obejmujący sieci komputerowe, w których elementy „intelektu” systemu są rozproszone, np. system *PVM* (*Parallel Virtual Machine*).

Doskonalenie niezawodności z wykorzystaniem techniki informatycznej może nastąpić także poprzez symulacje. Jest to metoda wykonywania eksperymentu, w którym decydent buduje model imitujący działanie rzeczywistego procesu, np. przy modyfikacji [35]. Schemat kolejnych działań, występujących w wykorzystaniu informatyki do symulacji, przedstawiono na rys. 111 [101].



Rys. 111. Schemat komputerowej procedury doskonalenia niezawodności [101]

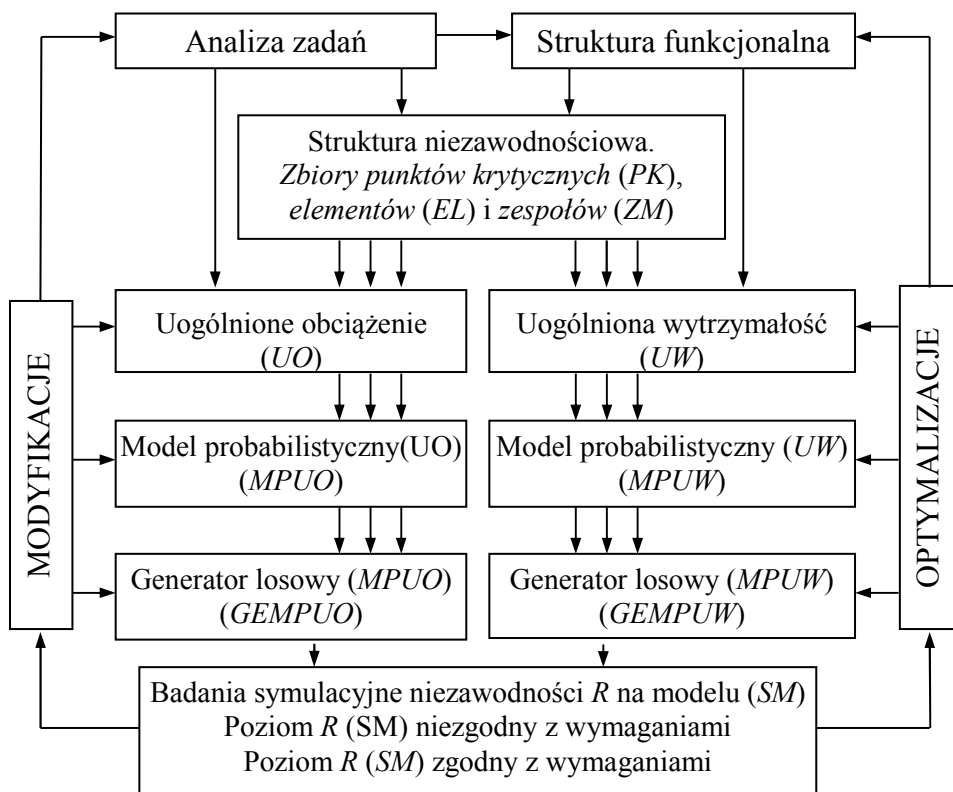
Uogólniona postać niezawodności  $R$  na modelu symulacyjnym  $SM$ , to [102]:

$$R(SM) = P(UW > UO), \quad (74)$$

gdzie:

$P$  – uogólniony wskaźnik niezawodności, np. prawdopodobieństwo,  
 $UW$  – uogólniona wytrzymałość,  
 $UO$  – uogólnione obciążenie (naprężenie).

$UO$  i  $UW$  opisywane są przez przyjęte wielkości mechaniczne, cieplne, i inne. Wychodząc z analizy zadań i struktury funkcjonalnej dochodzi się do struktury niezawodnościowej oraz zbiorów:  $PK$  (punkty krytyczne),  $EL$  (elementy),  $ZM$  (zespoły). Dla tych zbiorów określamy uogólnione obciążenia ( $UO$ ) oraz uogólnione wytrzymałości i odporności ( $UW$ ). Następnie przez modele probabilistyczne  $UO$  i  $UW$  przechodzi się do fazy symulacyjnej, gdzie generatory losowe  $GEMPU$  i  $GEMPUW$  symulują procesy uszkodzeń – rys. 112 [101].



Rys. 112. Schemat procedury postępowania przy badaniach symulacyjnych niezawodności [101]

## 12.6. Podsumowanie

Rozdział 12. poświęcony jest zagadnieniom doskonalenia niezawodności maszyn. Działalność techniczna to ciągle poszukiwanie usprawnień i udoskonaień. Głównym powodem takiego działania jest konieczność sprostania zmieniającym się ludzkim potrzebom. Omówiono podstawowe pojęcia dotyczące doskonalenia niezawodności i wskazano na problemy jakie się z tym wiążą. Podkreślono, że podstawową techniką jest unikanie błędów u źródła, stąd najefektywniejszym sposobem na poprawę niezawodności są metody przedeksplatacyjne.

Metody przedeksplatacyjne, są także najbardziej efektywne z ekonomicznego punktu widzenia. Dokonano klasyfikacji takich metod, wskazując na istotne zagadnienia, jakie z tym się wiążą. Szczególnie ważnym zagadnieniem staje się posiadanie właściwej informacji o intensywności zużycia części maszyn i czynnikach, które je powodują. Wskazuje to na potrzebę badań eksploatacyjnych i ich ścisłą symbiozę z wiedzą projektanta maszyn.

Niezależnie od wnikliwości badań eksploatacyjnych i wiedzy konstruktora maszyn, nie wszystko można przewidzieć na etapie konstruowania maszyny. Stąd też występuje celowość stosowania pewnych sposobów postępowania, zwiększających niezawodność na etapie użytkowania maszyny. W tym zakresie podstawową czynnością jest docieranie. W praktyce wyróżnia się docieranie: wstępne, zasadnicze oraz eksploatacyjne. Omówiono te rodzaje docierania, wskazując na istotne różnice pomiędzy nimi.

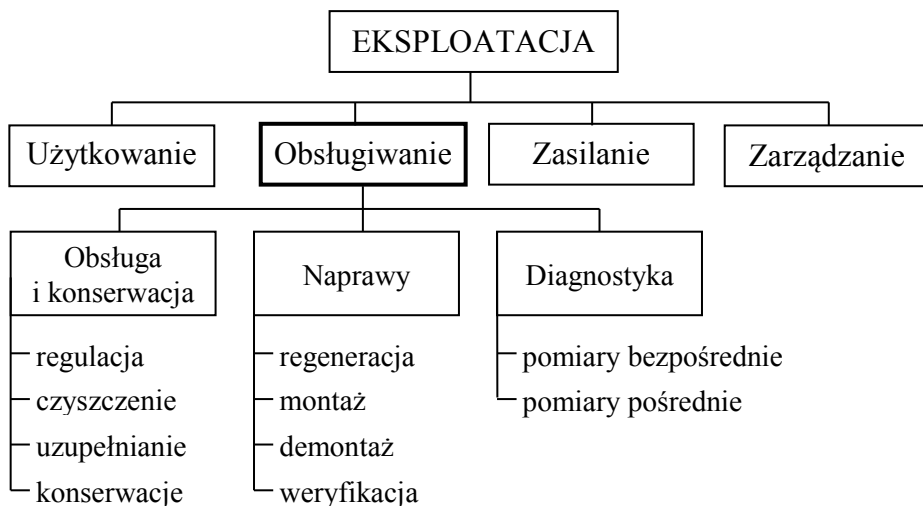
Zdecydowanie jednym z najskuteczniejszych sposobów zwiększania niezawodności maszyn jest jednak stosowanie wszelkiego rodzaju nadmiarów (konstrukcyjnych i eksploatacyjnych). Ten sposób postępowania określa się jako rezerwowanie. Postępowanie to należy do grupy metod opartych na redundancji (*redundancja* – obecność w obiekcie więcej niż jednego środka niezbędnego do wypełniania wymaganej funkcji). Opisano istotę i rodzaje rezerwowania, szczególnie uwagę zwracając na rezerwowanie wytrzymałościowe, określane przez współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji. Omówiono pojęcie tego współczynnika i podano sposób jego powiązania z poziomem niezawodności maszyny.

Współczesne metody zapewniania niezawodności maszyn są mocno zintegrowane z technologią informatyczną i techniką komputerową. Omówiono istotne elementy tego związku. W doskonaleniu niezawodności maszyn przez zastosowanie informatyki można wyodrębnić trzy główne etapy: od pojedynczych komputerów dozorujących pracę maszyn (komputery pokładowe) do systemów rozproszonych. Scharakteryzowano zatem te systemy. Opisano także wykorzystanie techniki informatycznej do symulacji niezawodnościowej.

# 13. PROCESY OBSŁUGI TECHNICZNEJ

## 13.1. Obsługiwanie i jego rodzaje

W procesie eksploatacji maszyny tracą swoje właściwości użytkowe (potencjał sprawczy) i co jakiś czas wykonuje się pewne czynności określane mianem obsługiwanie techniczne [164]. Należy ono do jednego z czterech głównych działań w odniesieniu do eksploatacji – rys. 113 [74].



Rys. 113. *Obsługiwanie jako jedno z podstawowych działań eksploatacyjnych* [74]

Obsługiwanie to całokształt działań organizacyjno-technicznych na obiekcie zdającym, mających na celu przygotowanie obiektu do użytkowania (obsługa i konserwacja), lub na obiekcie niezującym, mających na celu odtworzenie utraconej zdolności użytkowej (naprawy) [158].

Do pierwszej grupy (rys. 113) zaliczane są czynności, które mają na celu zapobieganie starzeniu się mechanizmów maszyn w procesie eksploatacji; czynności te powinny być wykonywane ściśle według obowiązującego programu, zwykle po określonym czasie.

Do drugiej grupy zaliczane są czynności, które mają na celu usunięcie skutków starzenia i uzyskanie stanu zdolności, czyli czynności naprawcze wykonywane w przypadku stwierdzenia rzeczywistej konieczności obsługi.



Trzecia grupa, to czynności związane z diagnostyką techniczną; czynności te wykonuje się w miarę potrzeby, w zależności od warunków eksploatacji i przebiegu pracy obiektu.

Jak podkreślono wcześniej, pojęcie *obsługa* jest pojęciem pokrewnym pojęciu *odnowa*, ale nie jest tym samym. Odnowa dotyczy przywrócenia czemuś wyglądu nowej rzeczy w wyniku jej odbudowy lub naprawy [154]. Może się ona odnosić nie tylko do elementu, ale dotyczyć także podzespołu, układu, a nawet całego pojazdu. Odnowa może mieć przy tym różnorodny charakter: element zamienia się nowym identycznym elementem, bądź poddaje się go takiej naprawie, która w pełni przywróci mu wszystkie jego pierwotne właściwości. W odniesieniu do danego obiektu odnowa jest celem działania (np. przywrócenie potencjału eksploatacyjnego pojazdowi przez zasilenie paliwem), a obsługa jest sposobem działania (np. przez podłączenie węża paliwowego do samochodu).

*Obsługa* stanowi bardzo rozległą pod względem technicznym, organizacyjnym i ekonomicznym dziedzinę działań praktycznych. Najczęściej wyróżnionymi rodzajami obsług ze względu na rozłożenie w czasie są [98]:

- a) *obsługa bieżąca* – to obsługa techniczna o małym zakresie, związana ze sprawdzeniem ukompletowania zestawu, jego stanu rzeczywistego, stopnia przygotowania do działania. Może tu nastąpić uzupełnienie zapasów roboczych, drobna regulacja głównych układów i prace konserwacyjne,
- b) *obsługa sezonowa* (okresowa) – to obsługa techniczna o średnim zakresie, związana z przygotowaniem maszyny do znacznych zmian warunków eksploatacyjnych, np. zima – lato; dominują w niej operacje o charakterze profilaktycznym, konserwacyjnym i ochronnym,
- c) *obsługa wieloletnia* – to obsługa techniczna związana z usuwaniem niekorzystnych skutków funkcjonowania (maszyn pracujących) lub oddziaływania otoczenia (maszyn przechowywanych).

Ze względu na cel obsługi wyróżnia się natomiast takie jak:

- a) *obsługa diagnostyczna* – to obsługa techniczna, której celem jest rozpoznanie stanu niezawodnościowego maszyny. W przypadku stwierdzenia niezdatności rozciąga się ona na lokalizacje miejsca niezdatności,
- b) *obsługa profilaktyczna* – to obsługa techniczna, której celem jest utrzymanie stanu niezawodnościowego maszyny,
- c) *obsługa terapeutyczna* – to obsługa techniczna, której celem jest odtworzenie stanu zdatności wcześniej utraconego (coraz częściej obejmuje ona także określenie przyczyn powstania niezdatności),

- d) obsługa alimentacyjna – to obsługa techniczna, której celem jest uzupełnienie zasobów roboczych, np. paliwa.

Klasyfikując według charakteru obsługi – wyróżnia się dwie grupy:

- a) *obsługa techniczna* – jest związana ze sprawdzeniem parametrów i zmiana stanu maszyny przez wykonanie prac demontażowych, wymianę elementów, pokrywanie powłokami ochronnymi i inne,  
 b) *obsługa organizacyjna* – związana jest ze zmianą instalacji lub postoju, zmiana użytkownika maszyny, zmianą jej klasy itp.

Rodzaje czynności wykonywanych w ramach tych usług podano w tab. 8 [63].

Tab. 8. *Rodzaje obsługi i ich podstawowe czynności* [63]

Nazwa obsługi		Proces obsługowy (obsługa)	Czynności procesu (podstawowe)
Obsługi jednokrotne	Obsługi techniczne	wprowadzenie do eksploatacji	- ustawienie, - przyłączenie, - sprawdzenie, - rozruch.
		wycofanie z eksploatacji (eksploatacja docelowa)	- odłączenie, - usunięcie, - demontaż, - przekazanie.
Obsługi wielokrotne	Obsługi techniczne	konserwowanie (praca okresowa) (obsługa techniczna)	- kontrola stanu. - ochrona. - zapewnienie współpracy elementów.
		naprawa (bieżąca, średnia, główna)	- rozbiórka, - weryfikacja, - renowacja.
		przygotowanie do użytkowania (zasilanie, przegląd)	- kontrola stanu, - zasilanie, - przegląd przed użyciem.
	Obsługi organizacyjne	transportowanie (przewożenie)	- opakowanie, - ładowanie, - transport, - wyładowanie.
		przechowywanie (magazynowanie, składowanie, postój)	- odbiór i przyjęcie, - ulokowanie, - zabezpieczenie, - wydanie.

## 13.2. Organizacja procesu obsługiwanania

Dobra organizacja obsługi zapewnia ich właściwe i bezpieczne wykonywanie oraz ogranicza niepotrzebny wysiłek pracownika. W ramach podejmowania decyzji przez kierowników organizujących obsługiwania techniczne, mogą być wzięte pod uwagę trzy warianty postępowania [55]:

- zlecenie wszystkich czynności obcym, wyspecjalizowanym jednostkom,
- budowa własnego zaplecza, zaspokajającego wszystkie potrzeby w tym zakresie,
- zaspokajanie wybranej części potrzeb w ramach własnego zaplecza, z równoczesnymi zleceniami innych na zewnątrz.

W przeszłości, w związku z niedoborami firm usługowych na rynku, preferowano wariant drugi, wyrażający się w dążeniu do posiadania własnej stacji obsługi o możliwie najpełniejszym zakresie działania. Obecnie o celowości organizowania własnego zaplecza technicznego powinny decydować przede wszystkim względy ekonomiczne [44].

Za punkt wyjścia należy jednak przyjąć fakt, że pełne uzbrojenie przedsiębiorstwa (bez względu na wielkość) w elementy zaplecza technicznego powoduje konieczność zaangażowania nadmiernych środków. Wszystkie z pewnością nie byłyby racjonalnie wykorzystane. Dlatego też stawia się postulat, że wielkość, zakres działania i wyposażenie elementów obsługiwanania technicznego w małych firmach powinno być ograniczone do niezbędnego minimum [144].

Czynnikami przesądzającymi o rozwoju współczesnej organizacji obsługiwanania technicznego stała się umiejętność wykorzystania potencjału intelektualnego wszystkich uczestników organizacji, wsparta technologią informatyczną i automatyzacją. Coraz to wyższy poziom wykształcenia ogólnego i zawodowego pracowników zaplecza technicznego pozwala na pozostawienie im decyzji, co do organizacji ich własnej pracy, zmniejszenie kontroli na rzecz samokontroli, spłaszczanie struktur, a to powoduje redukcję czasu oraz kosztów wytwarzania [144]. Niezależnie jednak od tego, istnieją ogólne przesłanki organizacji obsługi technicznych i na nie zostanie zwrócona tutaj szczególna uwaga.

Proces obsługiwanania technicznego i jego organizacja są determinowane: liczbą stanowisk koniecznych do wykonania programu, technologicznymi właściwościami każdej formy działania, możliwością rozdziału różnej ilości prac na stanowiska z odpowiednim stopniem mechanizacji oraz możliwością specjalizacji stanowisk, jak i wykonawców. Biorąc to pod uwagę klasyfikację metod obsługiwanania przedstawiono na rys. 114 [46].



Rys. 114. *Klasyfikacja metod obsługiwanego technicznego* [46]

Zdecydowanie najczęściej obsługiwaniu podlegają pojazdy i inne urządzenia z zakresu transportu [141]. Na organizację i zarządzanie obsługiwaniem tego rodzaju urządzeń sprzętowo-transportowych składa się [44]:

- zarządzanie przepływem środków transportowych (wprowadzenie i wycofywanie jednostek),
- zarządzanie rozwojem taboru i sprzętu (programy obsługi i doskonalenia zawodowego operatorów, kierowców oraz ocena bieżącej działalności),
- opracowanie systemów wynagrodzeń i motywacji pracowników,
- organizowanie i kształtowanie systemów pracy (rozdział obowiązków i uprawnień, organizacja zespołów ludzkich, organizacja czasu pracy),
- tworzenie warunków i kultury wewnętrznej pracy (badanie relacji międzyludzkich, kształtowanie praw i obowiązków pracowniczych, opracowywanie zasad bezpieczeństwa i higieny pracy).

W poszczególnych gałęziach przemysłu charakter obsługiwanego jest bardzo zróżnicowany. Najbardziej złożony jest dla transportu samochodowego [20]. Ograniczając rozważania do niego można stwierdzić, że podstawowym elementem organizacji obsługiwanego technicznego jest zajezdnia. Powinna ona spełniać następujące funkcje [144]:

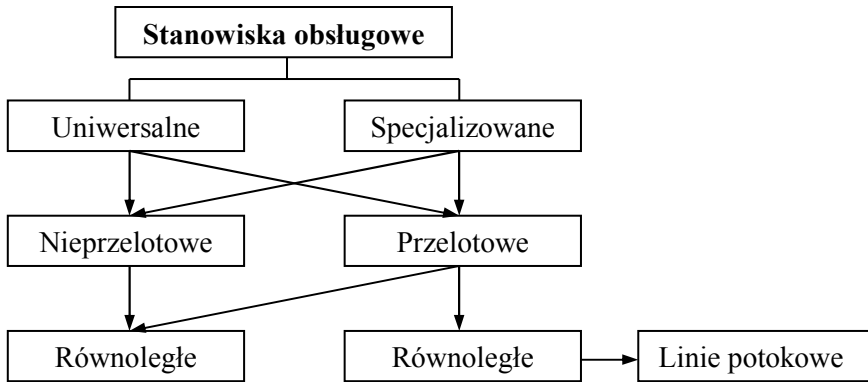
- prowadzenie gospodarki samochodowej,
- przechowywanie pojazdów,
- dysponowanie pojazdami,

- obsługa i naprawy pojazdów,
- zaopatrywanie pojazdów w paliwo i inne materiały eksploatacyjne,
- świadczenie usług socjalnych dla załogi.

W zależności od zakresu wykonywanych funkcji można wyróżnić trzy klasy zajezdni [20]:

- eksploatacyjno-stacjonarne bez stacji obsługi,
- ze stacją obsługi o ograniczonym zakresie pracy,
- ze stacją obsługi o pełnym zakresie obsługowo-naprawczym.

W celu wykonania prac związanych z obsługiwaniem maszyn, pojazdów lub innych złożonych urządzeń technicznych, niezbędne są odpowiednie środki techniczne oraz odpowiednia baza obsługowa. Bazę obsługową tworzy zbiór stanowisk obsługowych wraz z wyposażeniem w narzędzia i przyrządy obsługowe. Stanowiska obsługowe dzieli się na dwie grupy – rys. 115 [46].



Rys. 115. *Klasyfikacja stanowisk obsługowych* [46]

Na stanowiskach uniwersalnych mogą być wykonywane wszystkie lub większość czynności obsługowych, a na stanowiskach specjalizowanych – tylko jedna lub kilka czynności. Wprowadzenie specjalizacji stanowisk obsługowych zależy od rodzaju i powtarzalności (nasilenia) jednakowych lub technologicznie zbliżonych prac [106].

Zgodnie z określonymi przepisami, stanowiska pracy powinny być urządzone stosownie do rodzaju wykonywanych na nich czynności oraz psychofizycznych właściwości pracowników, przy czym wymiary wolnej (nie zajętej przez urządzenia) powierzchni stanowiska pracy powinny zapewnić pracownikom swobodę ruchu, wystarczającą do wykonywania pracy w sposób bezpieczny, z uwzględnieniem wymagań ergonomii.

### 13.3. Zlecenie realizacji usług

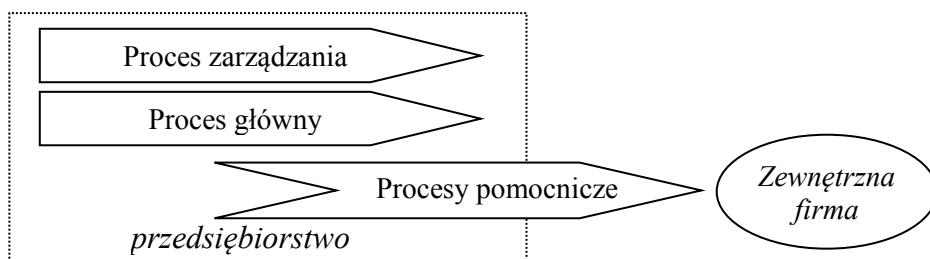
Rosnąca presja na ograniczanie kosztów oraz coraz szybsze tempo unowocześniania środków technicznych, to najważniejsze czynniki skłaniające coraz więcej przedsiębiorstw do poszukiwania nowych rozwiązań organizacyjnych działów zaplecza technicznego. Jeżeli nie umiemy wykonać danych usług maszyn (profilaktycznych bądź wymuszonych uszkodzeniem), to trzeba je oczywiście zlecić tym, którzy wykonać je potrafią. Nie oznacza to, że nie możemy się nauczyć ich wykonywania i wykonać samemu. Co wybrać? O tym można zdecydować po dokonaniu rachunku optymalizacyjnego.

Współcześnie takie zlecenie określonych zadań zewnętrznym firmom nazywa się *outsourcing*. Słowo to pochodzi od ang. *out source* (zewnętrzne źródło) i w terminologii biznesowej oznacza wykorzystywanie innych podmiotów (firm zewnętrznych) do wykonywania określonych zadań [42]. Outsourcing stanowi zatem nową organizację procesów lub sposobów zarządzania przedsiębiorstwem. Można i należy określać go jako innowację z zakresu organizacji przedsiębiorstwa, czyli innowację organizacyjną [135]. Zastosowanie takiej formy prowadzenia działalności w sposób znaczący uelastycznia przedsiębiorstwo.

Ogólnie rozróżnia się dwie podstawowe formy zlecenia usług [98]:

- *pełna (strategiczna)* – przekazanie do pośrednika jakiegoś całego obszaru,
- *selektywna* – przekazanie pośrednikowi kontroli nad określonym (wybranymi) obszarem.

W każdej firmie wyodrębnić można tzw. istotę jej aktywności (czyli proces główny i jego zarządzanie), i to powinno pozostać w firmie. Wszystko, co znajduje się poza tym obszarem, może być zlecane. Zwykle dotyczy to zadań pomocniczych, niezwiązanych bezpośrednio z uzyskiwaniem dochodu [150]. Ogólną koncepcję zlecenia usług przedstawia rys. 116 [135].



Rys. 116. *Ogólna koncepcja zlecenia usług* [135]

Zlecenie – to szczególny model realizacji usług, w którym klient i wykonawca stają się partnerami. Poglądy na tę specyficzną dziedzinę organizacji działań są jednak często rozbieżne. Z jednej strony wydaje się ona podnosząca koszty, ale z drugiej – zdejmuje wiele problemów. Większość z tradycyjnie zarządzanych firm odbiera tę formę organizacji działań w przedsiębiorstwie jako własną przegraną, jednak coraz więcej firm przychyła się do tej formy działania [144].

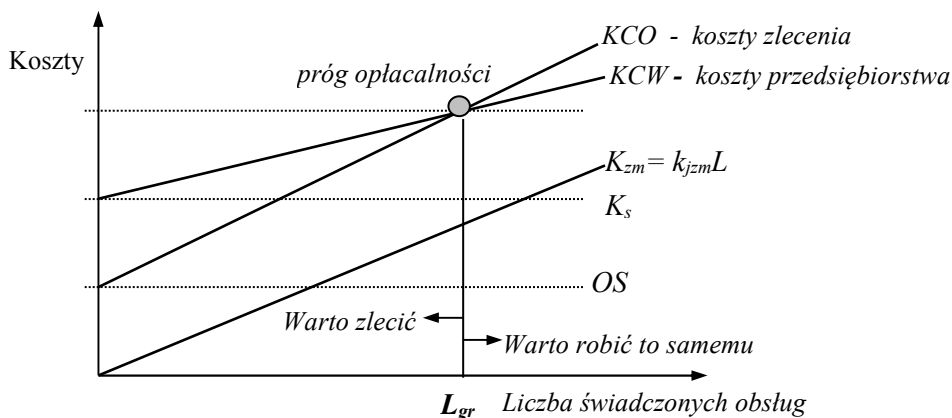
W ostatnich latach zlecenie realizacji usług stało się popularne ze względu na ewidentne oszczędności i zwiększenie jakości wykonywanych usług. Najczęściej kilka firm podpisuje ze sobą umowy na świadczenie określonego rodzaju usług, w ten sposób zwiększając swą efektywność ekonomiczną. Dzięki temu firma może skupić swoje zasoby i środki finansowe na obszarach stanowiących podstawę jej działań, w których osiąga przewagę konkurencyjną [144]. Umowy takie wiążą się ze sporym zaufaniem pomiędzy partnerami, gdyż w celu poprawnego funkcjonowania firmy muszą zazwyczaj przekazać sobie strategicznie ważne informacje na temat swojej działalności. Jak wynika z praktyki w zakresie outsourcingu, firma zewnętrzna, prowadząca zleczone usługi, gwarantuje całkowitą poufność i ochronę danych, które są jej przekazywane. Ponadto, dostarcza raporty i zestawienia z prowadzonych działań, umożliwiając stały nadzór. Wpływa tym samym pozytywnie na efektywność zarządzania [42].

W Polsce zlecenie realizacji usług nie jest jeszcze powszechnie stosowane. Najczęściej można się z nią spotkać w przypadku działów informatycznych, księgowości oraz transportu [128]. W przypadku usług transportowych, coraz częściej zdarza się, iż małe przedsiębiorstwa, hurtownie, a szczególnie sklepy internetowe, nie mają własnego transportu. Zamiast tego, wynajmowane są firmy kurierskie lub firmy transportowe, które przejmują na siebie cały zakres obowiązków nie tylko z dostarczeniem zamówionego towaru, ale także z utrzymaniem samochodów lub innych urządzeń w gotowości technicznej [144].

Chcąc wykorzystać outsourcing do procesów obsługowo-naprawczych najważniejszym problemem staje się dobre zdefiniowanie zlecanej usługi (co do jakości, czasu realizacji i kosztów) oraz wybór przedsiębiorstwa, z którym zamierza się współpracować. Nie ma jednoznacznych kryteriów, na podstawie których można podjąć decyzję o korzystaniu z outsourcingu. Najczęstszym powodem jest chęć obniżki kosztów i uniknięcia sytuacji korupcyjnych, np. wykonywanie tzw. niefakturowanych robót [128].

W idealnym świecie nie byłoby innej jakości obsługi technicznej, niż najwyższa. W rzeczywistości, organizacje obsługowe oferują zróżnicowane standardy, w zależności od posiadanych uprawnień i certyfikacji. Decydując się na zlecenie realizacji wybranych usług, kierownicy działów utrzymania ruchu

muszą dokonać wnikliwej analizy czynników krytycznych. Zależy ono od ilości świadczonych usług ( $L$ ) i przy pewnej ich liczbie ( $L_{gr}$ ) staje się już opłacalne – rys. 117 [42].



Rys. 117. Schemat do analizy opłacalności zlecenia obsługi [42]

Przy podejmowaniu decyzji o wydzieleniu ze struktury przedsiębiorstwa obszaru zlecanego w obsługę, podstawą jest rachunek ekonomiczny, tzn. koszty całkowite zlecenia obsługi ( $KCO$ ) powinny być niższe niż koszty realizacji tych zadań ( $KCW$ ) przez samo przedsiębiorstwo, przy czym krytyczną liczbę opłacalności obsługi  $L_{gr}$  można wyznaczyć z poniższej zależności:

$$L_{gr} = \frac{(K_s - OS)}{(c_j - k_{zmj})}, \quad (75)$$

przy czym:

$K_s$  – koszty stałe funkcji utrzymania ruchu w przedsiębiorstwie,

$OS$  – zryczałtowana opłata stała za obsługę,

$c_j$  – średnia cena jednostkowa określonej obsługi,

$k_{zmj}$  – jednostkowy koszt zmienny świadczonej obsługi.

Reasumując, zlecenie obsługi może być dobrym rozwiązaniem również dla zaplecza technicznego, ponieważ nie tylko podnosi jakość świadczonych usług, ale także minimalizuje problemy związane z utrzymaniem sprzętu w stałej gotowości użytkowej, serwisem oraz personelem obsługowym. Kiedy warto polecić zlecenie obsługi technicznych? Między innymi wtedy, gdy przedsiębiorstwo wymaga inwestycji w zaplecze techniczne, a nie posiada wolnych środków finansowych (lub nie ma możliwości ich zdobycia) [142].

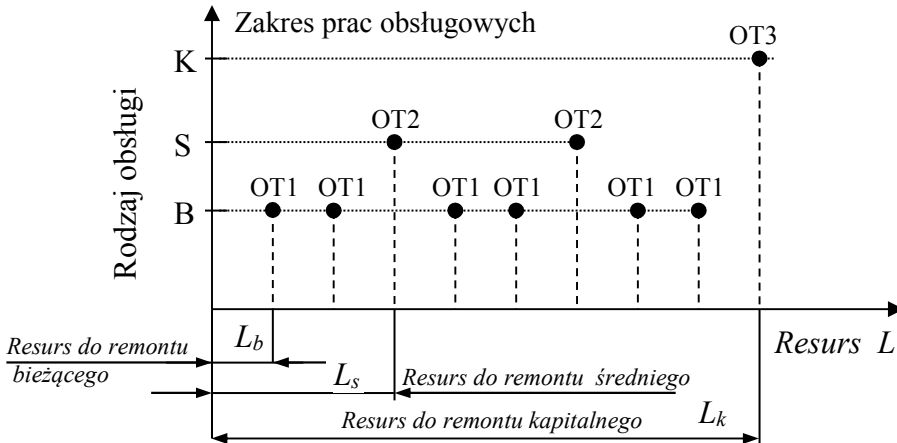


### 13.4. System obsługi planowo-zapobiegawczych

Wraz z rozwojem teorii eksploatacji zmianie ulegał pogląd, że tylko czas jest czynnikiem sprawczym wszelkich awarii sprzętu technicznego. W sposób empiryczny stwierdzono, że odpowiednio konserwując maszyny można przedłużyć ich żywotność, a co za tym idzie, zwiększyć rentowność. Zaczęto zatem planować, kiedy należy dokonać określonych czynności, które zapobiegałyby przyspieszonemu zużyciu maszyn, i tak powstał system planowo-zapobiegawczy.

*System obsługi planowo-zapobiegawczych* (SPZ) to przedsięwzięcia dotyczące konserwacji, obsługi, nadzoru i remontu maszyn, wykonywane według określonego cyklu remontowego. Ideą tego systemu jest wcześniejsze zaplanowanie wszystkich zadań związanych z obsługą i remontami, obejmujące terminy oraz zakresy realizacji poszczególnych zadań. Podstawą planowania są tzw. cykle remontowe, oparte na zasobie pracy określanym jako *resurs* [98].

Dla każdego obiektu technicznego (maszyny, pojazdu) wyznaczyć bowiem można taki zasób pracy  $L$ , określany jako resurs, wyrażony np. liczbą przejechanych kilometrów przez samochód, liczbą wykonanych elementów przez obrabiarkę, po której wymaga ona określonego rodzaju obsługi technicznej (OT1, OT2, OT3), lub wymiany na nową. W Polsce (przykładowo) do obrabiarek stosowany jest sztywny dziewięciopunktowy cykl remontowy o strukturze: BBSBBSBBK, gdzie B – remont bieżący, S – remont średni, K – remont kapitalny. Oznacza to, że pod dwóch bieżących (OT1) jest stosowany remont średni (OT2), a po dwóch średnich następuje remont kapitalny (OT3) – rys. 118 [133].



Rys. 118. *Harmonogram obsługi wg stałego cyklu planowo-zapobiegawczego* [133]

Wyróżnia się dwa typy rewersów: *główny i międzyobsługowe* [141]. Obrabiarka jest kierowana do remontu kapitalnego (OT3), jeżeli wyczerpała swój rewers główny, który ustalony został na poziomie 24000 motogodzin, czyli rzeczywistych godzin pracy [102]. Po przyjęciu tego, standardowego, okresu pracy maszyny do jej gruntownej naprawy (remont kapitalny), istotnym zagadnieniem staje się następnie ustalenie wartości rewersów międzyobsługowych.

Do ustalenia tego rodzaju rewersów wykorzystuje się dwie metody [133]:

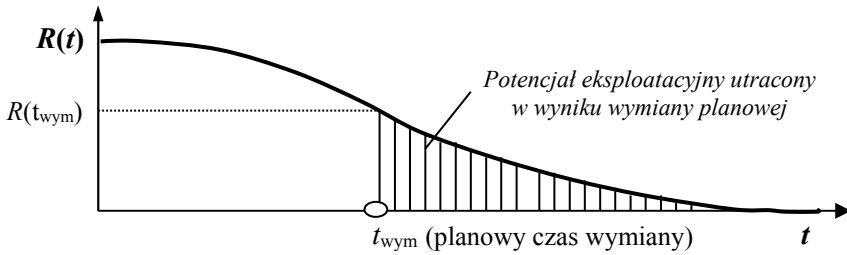
- *techniczno-ekonomiczną*, która oparta jest na wyznaczaniu minimalnych kosztów wynikających z okresowych obsługa (OT2) i kosztów napraw bieżących (OT1),
- *ekonomiczno-probabilistyczną*, w której zakres obsługa technicznych (OT2) może być rozszerzony o niektóre naprawy bieżące, mające znaczenie profilaktyczne.

W metodzie *techniczno-ekonomicznej* przyjmuje się założenie, że prawdopodobieństwo pracy maszyny bez uszkodzeń w okresach międzyobsługowych powinno być nie mniejsze niż 0,8. W celu uzyskania stałej wartości prawdopodobieństw pracy bez uszkodzeń w okresach między obsługami (przy wzroście intensywności uszkodzeń wraz ze wzrostem czasu eksploatacji – co ma miejsce w większości urządzeń technicznych), należy odpowiednio zmniejszać wartości rewersów międzyobsługowych. Zatem: przy podziale całkowitego rewersu  $L_k$  na trzy części:  $L_1 = (0-0,5)L_k$ ,  $L_2 = (0,5-0,75)L_k$ , oraz  $L_3 = (0,75-1)L_k$ , i przyjęciu wartości rewersu międzyobsługowego  $L_1$  za jeden ( $L_1 = 1$ ), otrzymujemy:

- dla przedziału (0,5-0,75) rewers międzyobsługowy  $L_2 = 0,75 L_k$ ,
- dla przedziału (0,75-1) rewers międzyobsługowy  $L_3 = 0,5 L_k$ .

Należy tu zwrócić uwagę, że okresowość obsługa technicznych 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 obsługi i organizacji jego wykonania. Wynika stąd konieczność sprawdzenia i korygowania wartości rewersów międzyobsługowych, korzystając ze wskaźników niezawodności.

Ponieważ system obsługa planowo-zapobiegawczych (SPZ) wykorzystuje jedynie informacje o czasie pracy maszyn, wpływ czasu określonego w planie obsługa, pociąga za sobą realizację tych obsługa w pełnym zakresie. W systemie SPZ nie uwzględnia się bowiem innych środków oceny rzeczywistego stanu obiektów poza miarą wynikającą z rewersu czasowego. Stąd występują duże straty z tytułu niewykorzystania potencjału eksploatacyjnego – rys. 119 [46].

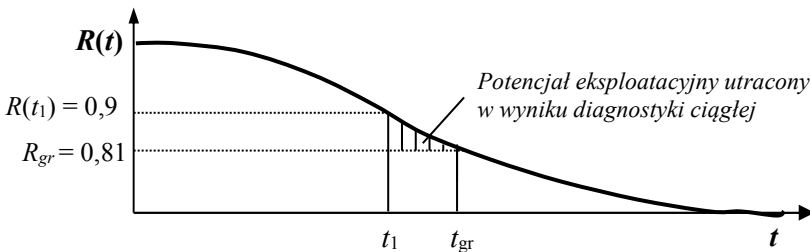


Rys. 119. *Straty potencjału eksploatacyjnego w systemie obsługa planowo-zapobiegawczych* [46]

Ten właśnie aspekt stosowania SPZ jest jego najbardziej istotnym wyróżnikiem z punktu widzenia zarządzania eksploatacją. Czynności ujęte w planie są realizowane niezależnie od tego, czy istnieje potrzeba ich realizacji (np. jeżeli plan przewiduje wykonanie w określonym terminie naprawy średniej, a zakres tej naprawy uwzględnia wymianę w tym urządzeniu wszystkich łożysk, to wymieniane są wszystkie łożyska: także te, które są w znakomitym stanie i mogą być jeszcze długo użytkowane). Zastosowanie tego rodzaju planowania wymaga także [55]:

- sporządzenia kompletnej ewidencji urządzeń (tzw. paszporty maszyn),
- opracowania tzw. normatywów remontowych.

Współcześnie w teorii i praktyce eksploatacyjnej odchodzi się od stosowania obsługi planowo-zapobiegawczych opartych na stałym cyklu. Doskonalszą formą planowania obsługi jest *metoda mieszana*. Polega ona na tym, że obowiązkowo (w zdeterminowanym porządku, zakresie i okresie) wykonywane są prace obsługowe, związane z kontrolą, wzmacnianiem połączeń, uzupełnianiem materiałów eksploatacyjnych itp. Natomiast prace obsługowe związane z naprawą elementów, zespołów itp., wykonywane są w miarę potrzeb ujawnionych podczas diagnostyki lub wynikających z osiągnięcia stanu granicznego. Dzięki temu, unika się ryzyka wykonywania niepotrzebnych napraw przy zminimalizowaniu utraty potencjału eksploatacyjnego – rys. 120 [46].



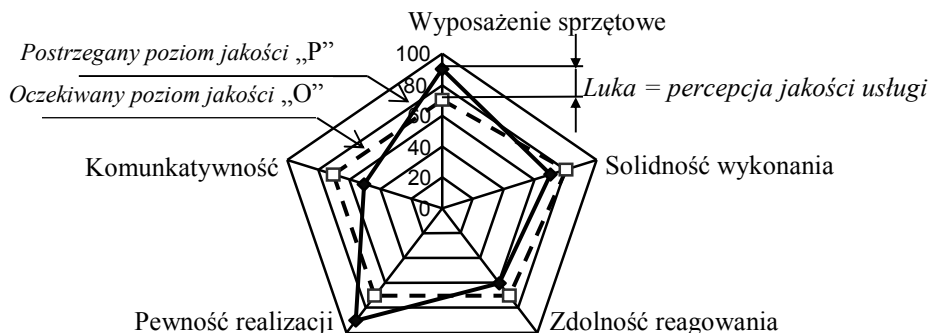
Rys. 120. *Straty potencjału eksploatacyjnego przy mieszanym systemie obsługi* [46]

## 13.5. Metoda oceny jakości usług

W przypadku procesów obsługowo-naprawczych jednym z najistotniejszych aspektów obsługi jest jej jakość. Pożądane są zatem określone procedury i metody służące do oceny poziomu jakości usług. Specyficzny charakter obsługi (niematerialność, nierozdzielność obsługi z osobą wykonawcy, nierozdzielność procesów użytkowania i obsługi, różnorodność, nietrwałość, niemożność nabycia praw własności) powoduje duże trudności w jej pomiarze. Jedną z nielicznych metod w tym zakresie jest *metoda servqual* [59].

Metoda ta jest prostą wielostopniową skalą, za pomocą której można dokonać pomiaru jakości usług z punktu widzenia klienta. Polega ona na dokonaniu pomiaru różnic, jakie występują pomiędzy jakością postrzeganą przez klienta, a jakością, której tenże klient od danej usługi oczekuje. *Oczekiwania* klienta to wyobrażenia koncentrujące się wokół jakości usługi jeszcze przed jej nabyciem. Percepcja usługi to subiektywne odczucia, jakich doznaje klient podczas jej nabywania. W metodzie *servqual* przyjęto założenie, że kluczem do optymalizacji jakości będzie dążenie do sytuacji, w której niwelowana jest różnica (luka) pomiędzy tymi dwoma aspektami [49].

Ocena jakości usług wg tej metody dokonywana jest zatem przez pomiar dysproporcji między postrzeganym, a oczekiwanym poziomem jakości usług. W klasycznej metodzie *servqual* zdefiniowano pięć określonych wymiarów (kryteriów) oceny. Są to: wyposażenie sprzętowe (*materialna obudowa usługi*), solidność wykonania (*terminowość, poprawność, staranność*), zdolność reagowania (*doradztwo, szybkość reagowania*), pewność realizacji (*mobilność, odpowiedzialność*), komunikatywność (*życzliwość, indywidualizowanie oferty*). Przykład wykresu, ujmującego te aspekty jakości, obrazuje rys. 121 [49].



Rys. 121. *Kryteria oceny jakości usług wg metody servqual* [49]

Algorytm postępowania według metody servqual przedstawia rys. 122 [59].



Rys. 122. Algorytm postępowania przy metodzie servqual [59]

Badanie rozpoczyna się od ustalenia pytań ankietowych, ujmujących różne aspekty jakości badanej obsługi. Prowadzi się je zwykle przy użyciu kwestionariusza zawierającego (standardowo) 22 pytania, związane z poszczególnymi wymiarami jakości obsługi. Każdej z wymienionych pięciu cech przypisywanych jest kilka stwierdzeń (cztery lub pięć) – w sumie są to dwadzieścia dwa stwierdzenia dotyczące jakości usługi.

Respondenci udzielają odpowiedzi na te pytania w dwóch aspektach:

- jakie mieli oczekiwania względem danego kryterium oceny jakości (*wskaznik P*),
- jakie są ich spostrzeżenia względem danego kryterium oceny jakości (*wskaznik O*),

Badany klient ocenia punktowo, w skali od 1 do 7, adekwatność określonego stwierdzenia, w odniesieniu do własnych odczuć na temat usług świadczonych przez konkretną firmę [154]. Między ustalone miary jakości rozdziela się 100 punktów, w taki sposób, aby ich wartość wyznaczała wagę poszczególnego wymiaru – tab. 9 [59].

Tab. 9. *Wagi miar jakości obsługi wg metody servqual* [59]

Miary jakości obsługi „j”	Waga ( $W_j$ )
Materialna obudowa obsługi	13,0
Niezawodność	36,0
Odpowiedzialność	18,0
Pewność realizacji	24,0
Komunikatywność	9,0
Łączna liczba punktów	100,0

Powyższe wagi stanowią podstawę do obliczenia ważonego wskaźnika servqual  $SQ_w$  według poniższej zależności [59]:

$$SQ_w = \sum_{j=1}^k W_j (P_j - O_j). \quad (76)$$

Następnie oblicza się różnicę pomiędzy tymi ocenami i wyznacza się tzw. „lukę percepcyjną” w procesie postrzegania danej miary jakościowego obsługi. Dalej mnoży się wyznaczone różnice przez wagi danej miary i oblicza średnią ważoną dla poszczególnych miar.

Im jest większa wartość dla danej miary jakości, tym większa występuje luka w percepcji danej miary i na ten obszar powinny być skierowane w pierwszej kolejności wysiłki, by wyeliminować niedociągnięcia jakościowe. Przedstawiona metoda określa zatem w istocie rzeczy poziom satysfakcji odbiorcy obsługi.

## 13.6. Podsumowanie

Rozdział 13. dotyczy zagadnień związanych z szeroko rozumianymi procesami obsługi technicznej maszyn. Obsługiwanie to całokształt działań organizacyjno-technicznych na obiekcie zdającym, mających na celu przygotowanie obiektu do użytkowania (konserwacja), lub na obiekcie niezdatnym, mających na celu odtworzenie utraconej zdadności użytkowej (naprawy). Podano klasyfikację działań zaliczanych do obsługiowania oraz scharakteryzowano czynności składające się na poszczególne rodzaje obsług.

Omówiono organizację procesu obsługiowania maszyn, wskazując na dwie zasadnicze możliwości działań w tym zakresie: albo wykonywanie wszystkiego w ramach własnego przedsiębiorstwa, albo przekazanie do wyspecjalizowanej firmy. Ten ostatni sposób określa się jako outsourcing (zlecenie). Jest to nowa forma organizacji przedsiębiorstwa, stąd też opisano jej istotę, formy, zalety oraz procedurę wylizania, kiedy opłaca się ją stosować.

Omówiono system obsług planowo-zapobiegawczych; wskazano na ideę tego rodzaju organizacji obsług, jego zalety i wady oraz stosowane modyfikacje. Podkreślono, że w praktyce korzystniej jest stosować metodę mieszaną. Jej idea polega na tym, że obowiązkowo, w zdeterminowanym porządku, zakresie i okresie wykonywane są prace obsługowe związane z kontrolą, wzmocnieniem połączeń, uzupełnianiem materiałów eksploatacyjnych itp. Natomiast prace obsługowe związane z naprawą elementów, zespołów itp. wykonywane są w miarę potrzeb ujawnionych podczas diagnostyki technicznej, lub wynikających z osiągnięcia stanu granicznego. Dzięki temu unika się ryzyka wykonywania niepotrzebnych napraw przy zminimalizowaniu także ryzyka uszkodzeń awaryjnych.

W przypadku procesów obsługowo-naprawczych jednym z najbardziej najistotniejszych aspektów obsługi jest jej jakość. Pożądane są zatem procedury i metody służące do oceny poziomu jakości obsług. Specyficzny charakter obsługi (niematerialność, nierozdzielność obsługi z osobą wykonawcy, nierozdzielność procesów użytkowania i obsługiowania, różnorodność, nietrwałość, niemożność nabycia praw własności) powoduje duże trudności w jej pomiarze. Jedną z nielicznych metod w tym zakresie jest metoda servqual. Omówiono istotę tej metody, stosowane miary oceny jakościowej oraz procedurę postępowania podczas ustalania jakości wykonywanych obsług. Jest to w istocie rzeczy metoda badania satysfakcji (zadowolenia) klienta. W tego rodzaju badaniach bardzo ważne jest to: o co zapytamy, jak zapytamy i kiedy zapytamy. Jeszcze ważniejsze jest jednak to, co zrobimy z uzyskanymi odpowiedziami?

# 14. ZAOPATRYWANIE EKSPLOATACYJNE

## 14.1. System zaopatrywania i jego struktura

Wysoka gotowość do pracy maszyn i innych urządzeń wymaga dostarczania odpowiednich materiałów eksploatacyjnych (paliwo, oleje) oraz określonej liczby części wymiennych. Jest to zadaniem systemu zaopatrywania eksploatacyjnego. Pojęciem tym można określić zbiór wzajemnie ze sobą powiązanych ludzi, sprzętu i procedur, zapewniający realizację zaopatrzenia eksploatacyjnego.

Struktura organizacyjna tego systemu decyduje w bezpośredni sposób o czasowej, przestrzennej, ilościowej i jakościowej niezawodności dostaw tych części i materiałów. W tej strukturze wyróżnia się dwa podzbiory[163]:

- *podsystem informacyjny* (kierowniczy i sterujący),
- *podsystem wykonawczy* (roboczy).

Pojęciem *podsystem informacyjny zaopatrywania* określa się wielopoziomą strukturę, pozwalającą użytkownikowi na przetwarzanie, za pomocą procedur i modeli, informacji wejściowych w wyjściowe. Wydzieloną, skomputeryzowaną, jego część tworzy natomiast system informatyczny [37].

Należy mieć na uwadze, że system informacyjny:

- ma wymiar wewnątrzorganizacyjny i międzyorganizacyjny, czyli obejmuje swoim zasięgiem przedsiębiorstwo oraz jego bliższe i dalsze otoczenie,
- stanowi integralną część systemu informacyjnego przedsiębiorstwa.

Posiadanie dobrze rozwiniętego podsystemu informacyjnego pozwala np. na bezpośrednie zaopatrywanie się u producenta, lub pośredniczenie w zdobyciu materiałów eksploatacyjnych i części zapasowych po konkurencyjnych cenach.

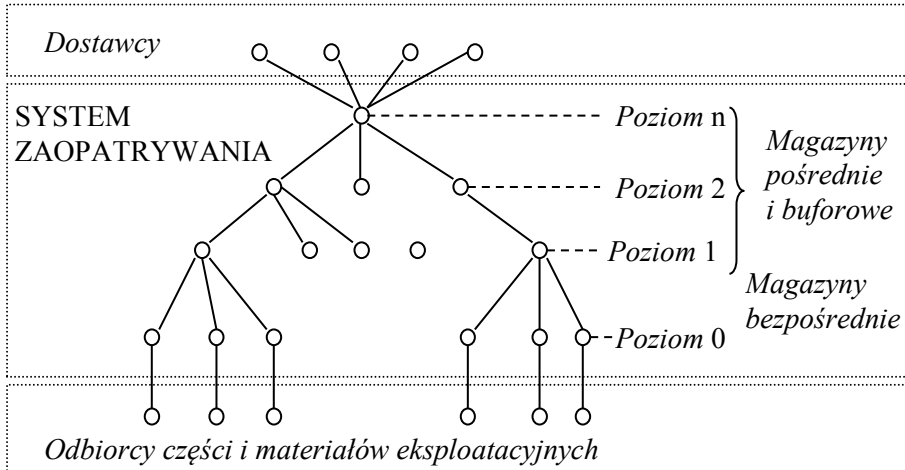
Istotą *podsystemu wykonawczego* jest natomiast emitowanie odpowiednich decyzji z podsystemu informacyjnego do otoczenia w taki sposób, aby przyjmowane przez niego stany należały do stanów pożądanых. Model organizacyjny tego podsystemu jest najczęściej typowym przykładem struktury pionowej, w której czasami pojawiają się pewne elementy struktury macierzowej (komisje przetargowe, zespoły zadaniowe) [55]. Działania jakie trzeba wykonać w podsystemie wykonawczym by odpowiednio kształtować zapasy to [29]:

- ustalić właściwy poziom zakupów,
- ustalić właściwe źródło dostaw,
- złożyć odpowiednie oferty i przeprowadzić pertraktacje handlowe,



- wybrać środek transportu,
- opracować grafik dostaw,
- ewidencjonować, kontrolować i aktualizować realizowane zamówienia.

Systemy zaopatrywania mają na ogół strukturę hierarchiczną – rys. 123 [163].



Rys. 123. *Struktura hierarchiczna systemu zaopatrywania eksploatacyjnego* [163]

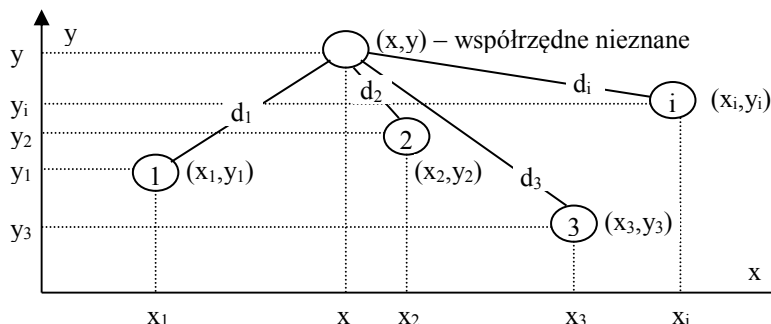
Istniejące rozwiązania organizacyjne systemów zaopatrywania przewidują dwie grupy magazynów: bezpośrednio zaopatrujące odbiorcę (magazyny niższych szczebli) oraz magazyny pośrednie (hurtownie). Możliwości tworzenia struktur organizacyjnych magazynów są praktycznie nieograniczone, np. mogą być systemy jedno- i wielopoziomowe, ujmujące jednego dostawcę (monopol) lub wielu różnych dostawców tego samego produktu.

Ze względu na podległość organizacyjną, składnice i magazyny dzieli się na [163]:

- *terytorialne* (zaopatrujące odbiorców znajdujących się w ich zasięgu terytorialnym, niezależnie od przynależności organizacyjnej),
- *funkcjonalne* (zaopatrujące wyłącznie odbiorców podległych temu samemu, co i one kierownictwu),
- *mieszane* (realizujące potrzeby odbiorców podległych funkcjonalnie).

Aby system wykonawczy mógł realizować swoje zadania, należy przekazać mu (od systemu informacyjnego) co najmniej jedną wartość zadaną, obowiązującą w danej firmie, tzw. normę sterującą. *Norma sterująca zaopatrywaniem* to norma zapasów w danym okresie, biorąca pod uwagę dobowe zużycie materiałów i okresowe zużycie części, cykl dostaw, poziom zapasu minimalnego, itp. Normę taką wypracowuje zaopatrzenie, korzystając np. z teorii obsługi masowej.

Ustalenie *optymalnej normy sterującej zaopatrywania* wymaga zbadania wpływu wielu czynników i analizy kosztowej. Kryterium wyboru najlepszej normy może być zatem koszt lub czas dostawy. W tym drugim aspekcie istotnym staje się zagadnienie dotyczące usytuowania magazynu – rys. 124 [163].



Rys. 124. *Schemat do analizy położenia terytorialnego magazynów* [163]

Znając średnie zapotrzebowanie na dany materiał można ustalić najkorzystniejsze usytuowanie magazynu centralnego ze względu na łączny koszt  $K$  zaopatrywania wg zależności [163]:

$$K = k \sum_{i=1}^n p_i d_i = k \sum_{i=1}^n p_i \cdot \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad (77)$$

gdzie:

- $k$  – koszt wysyłki jednostki materiału eksploatacyjnego na jednostkę odległości,
- $p_1, p_2, \dots, p_n$  – potrzeby występujące w kolejnych  $i$ -tych magazynach,
- $d_i$  – całkowita odległość pomiędzy  $i$ -tymi magazynami ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),
- $(x_i, y_i)$  – znane współrzędne położenia  $i$ -tego magazynu,
- $(x, y)$  – szukane współrzędne położenia magazynu centralnego.

Z zależności tej należy wyznaczyć takie wielkości  $x'$  oraz  $y'$ , dla których koszt  $K$  będzie minimalny (dla uproszczenia można przyjąć, że koszt dostarczenia jednostki materiału do  $i$ -tego magazynu jest proporcjonalny do jego odległości od magazynu centralnego). Można to rozwiązać obliczając pochodne cząstkowe  $K$  względem  $x$  oraz  $y$ , a następnie przyrównując je do zera, wyznaczyć  $x'$  oraz  $y'$ . Z tego wynika, że postępowanie dające rozwiązanie, nawet przy uwzględnieniu tylko jednego kryterium, jakim jest łączny koszt zaopatrywania  $K$ , nie jest proste. Każde dodatkowe kryterium wprowadzane do zależności prowadzi do większej złożoności zagadnienia i braku jednoznaczności rozwiązania.

## 14.2. Zapasy i ich klasyfikacja

Wybór polityki obsługi systemu eksploatacyjnego wymaga rozwiązania wielu problemów cząstkowych, m.in. takich jak utrzymanie określonych zapasów do obsługi systemu [124]. *Zapasem* nazywa się część niewykorzystywanych w danej chwili dóbr materialnych, w tym także części wymiennych i materiałów eksploatacyjnych [129].

Gromadzenie, utrzymywanie i uzupełnianie zapasów znane było od zarania ludzkości. Na początku służyło zapewnieniu podstawowych środków do życia. Ludzie starożytni gromadzili zapasy żywności, czym mogli wyżywić siebie i swoją rodzinę. W latach 80. rzeczą „normalną” było kupowanie większych ilości towaru (np. papieru toaletowego), tworząc w ten sposób większy zapas dla zaspokojenia swoich potrzeb. W dzisiejszych czasach tego już nie trzeba robić. Duża liczba sklepów, nadmiar towarów pozwala na bardziej rozważne zakupy, bez potrzeby tworzenia nadmiaru dóbr. Nadal utrzymujemy i uzupełniamy zapasy; jednak obecnie robimy to coraz oszczędniej i racjonalniej [136]. Podobnie jest i w każdym przedsiębiorstwie, które musi mieć zapasy, by utrzymywać rytmiczność swej produkcji i funkcjonowanie sprzętu. W odniesieniu do działań eksploatacyjnych najważniejsze przyczyny tworzenia zapasów to [79]:

- wahania (często losowe) wielkości zapotrzebowań na części wymieniane i materiały eksploatacyjne w okresie między dostawami,
- brak możliwości dostarczenia (braki w magazynach) do podsystemu obsługi części wymiennych i materiałów eksploatacyjnych w czasie zapotrzebowania,
- nieterminowość i nieregularność dostaw, a także wielkość otrzymywanych dostaw,
- sezonowość zapotrzebowań i dostaw.

Z punktu widzenia inżynierii eksploatacji istotna jest klasyfikacja elementów jako części wymiennych. Należy tu zwrócić uwagę na określenie „*części wymienne*”. Tego rodzaju określenie (zamiast *części zamienne*) jest zgodne z oficjalnym tłumaczeniem Rozporządzenia Komisji Europejskiej nr 1400/2002 w sprawie stosowania art. 81 ust. 3 Traktatu do kategorii parametrów wertykalnych i praktyk uzgodnionych w sektorze motoryzacyjnym. Pojęcie to zostało zaakceptowane w Polsce Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 28.01.2003 r. (Dz. U. 3003 nr 38, poz. 329 zdn.6.03.2003). Mimo, iż określenie „*części wymienne*” dotyczy głównie przemysłu motoryzacyjnego, właściwe jest jego stosowanie i do innych obszarów techniki, stąd też tak będzie dalej używane.

Zapasy części wymiennych różnią się od innych rodzajów zapasów kilkoma istotnymi czynnikami, m.in. [52]:

- pełnią funkcję pomocniczą przy obsłudze systemu technicznego, co powoduje, że zapotrzebowanie wynika z wybranej strategii obsługi,
- wielkość zapasów silnie uzależniona jest od intensywności uszkodzeń danej części,
- uszkodzenia elementów w systemie są często zależne od siebie,
- koszty niezdatności systemów najczęściej zawierają zarówno koszty straconej produkcji, jak i pewien czynnik ryzyka, np. dla personelu, który to koszt trudno oszacować.

Jeden z istotnych podziałów *części wymiennych* to klasyfikacja według sposobów pozyskania. W świetle tego kryterium wystąpią:

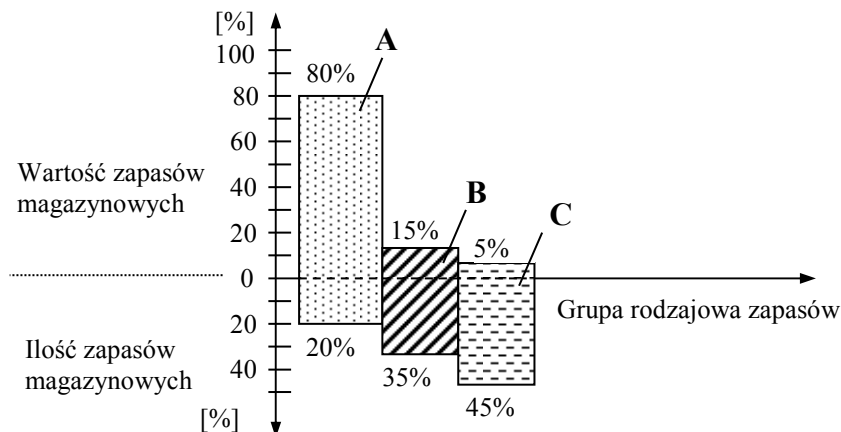
- zapasy nabywane (materiały eksploatacyjne, części zakupywane),
- zapasy wytwarzane (części wytwarzane we własnym zakresie, produkcja w toku).

Szczególnie przydatna jest klasyfikacja w ujęciu logistycznym, według której części wymienne można klasyfikować dwojako [136]:

- według kosztów (metoda ABC),
- według regularności zapotrzebowania (metoda XYZ).

*Metoda ABC* jest klasyfikacją zapasów według malejącej wartości. Istotą klasyfikacji ABC jest to, aby wysiłek zaoszczędzony przy kontroli i ewidencji zasobów grupy C, skierować na pozycje o większej wartości lub większej przydatności. Wyróżnia się tu trzy grupy zapasów – rys. 125 [125].

- grupa A – części najdroższe: 10 - 20% ogólnej masy, o wartości 70 - 80%,
- grupa B – części pośrednie: ilościowo 35%, wartościowo 15% całości,
- grupa C – części masowe (najtańsze): ilościowo 45%, a wartościowo 5%.



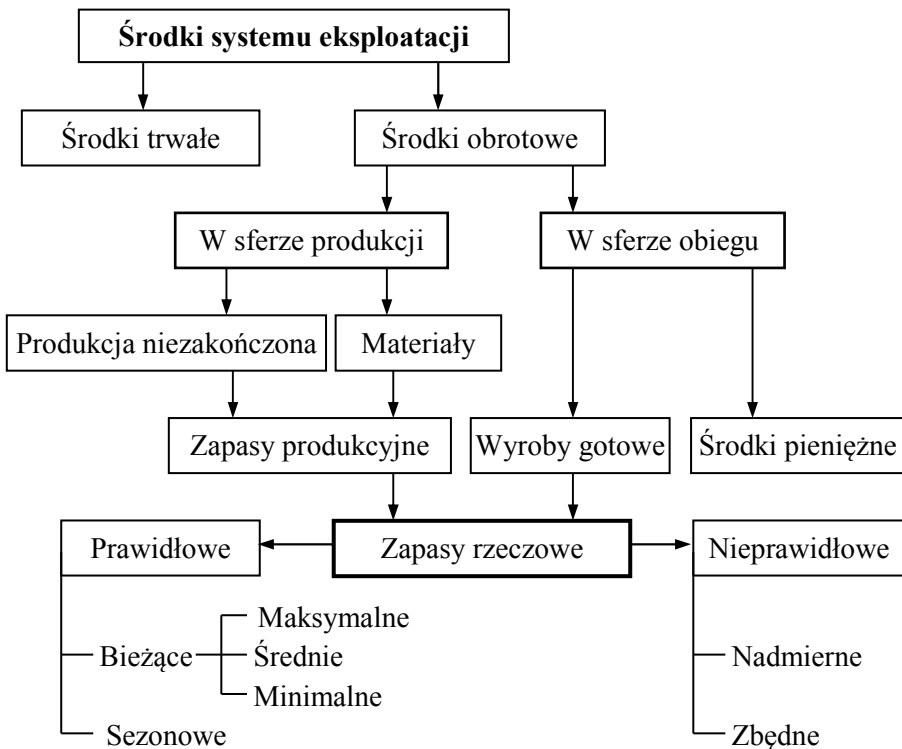
Rys. 125. *Klasyfikacja rodzajowa zapasów pod względem kosztowym* [125]

*Metoda XYZ* dzieli poszczególne rodzaje zapasów na podstawie regularności popytu. Z tego punktu widzenia zapasy są dzielone na 3 grupy:

- grupa *X* – części o regularnym zapotrzebowaniu i wysokiej dokładności prognoz,
- grupa *Z* – części o nieregularnym zapotrzebowaniu i niskiej dokładności prognoz,
- grupa *Y* – części o średnim zapotrzebowaniu i średniej dokładności prognozy.

Zwykle w rozważaniach dotyczących zapasów łączy się metody ABC i XYZ i tworzy się 9 kategorii, różniących się celowością i możliwością sterowania.

Dla potrzeb klasyfikacji części wymiennych i materiałów eksploatacyjnych dokonuje się najczęściej podziału środków znajdujących się w każdym systemie eksploatacji na środki trwałe i środki obrotowe. Części wymienne i materiały eksploatacyjne zalicza się do grupy środków obrotowych, tworzących zapasy rzeczowe – rys. 126 [163].



Rys. 126. Podział środków systemu eksploatacji z uproszczoną klasyfikacją zapasów części wymiennych i materiałów eksploatacyjnych [163]

### 14.3. Sterowanie zapasami

Utrzymywanie zasobów niezbędnych do zapewnienia ciągłej pracy maszyn i innych urządzeń technicznych jest kwestią o ogromnym znaczeniu dla większości istniejących organizacji: produkcyjnych, transportowych, wojskowych, itp. [52]. Likwidacja zapasów nie jest zatem możliwa, dlatego należy skupić się na tym, aby były one optymalnie i racjonalnie sterowane. Odpowiednie sterowanie strumieniami zapasów w sferze zaopatrzenia jest miarą organizacyjnej dojrzałości oraz sprawności służb logistycznych. Właściwe określenie wielkości zapasów części wymiennych, jakości oraz rytmiczności dostaw, wpływa przede wszystkim na proces obsługi maszyn i urządzeń oraz na poziom kosztów.

Zaopatrzenie maszyn w części wymienne jest problematyką z pogranicza dwóch obszarów zainteresowania naukowców: ekonomii i niezawodności:

- z *ekonomicznego punktu widzenia* rozwijana jest teoria nazywana „klasyczną teorią zapasów” [125], gdzie ciężar problemu położony jest na taką organizację procesu zaopatrywania, która zapewnia minimalizację kosztów z nim związanych.
- w *podjęciu niezawodnościowym* wykorzystuje się teorię odnowy oraz stosuje różnego rodzaju nadmiary (rezerwowania). Dzięki określonej wielkości utrzymywanej rezerwy, możliwe jest uzyskanie wymaganego poziomu niezawodności urządzenia.

Wychodząc z ekonomicznego punktu widzenia, do podstawowych problemów sterowania zapasami należą [125]:

- minimalizacja nakładów na zakup, sprowadzanie i utrzymanie zapasów,
- zapewnienie ciągłości funkcjonowania środków technicznych oraz rytmiczności produkcji przy możliwie minimalnych kosztach,
- niedopuszczenie do powstawania nadmiernych i zbędnych zapasów oraz optymalne zagospodarowanie w razie ich wystąpienia,
- przeciwdziałanie stratom ilościowym, jakościowym oraz wyczerpaniu zapasów.

Z punktu widzenia niezawodności sprzętu istotny jest podział zapasów pod względem [48]:

- krytyczności – odnosi się do konsekwencji, spowodowanych brakiem elementu wymiennego w chwili uszkodzenia elementu pracującego,
- specyfiki – określa, czy element jest standardowy (łatwo dostępny),
- rodzaju popytu – w sensie wielkości zapotrzebowania i możliwości jego przewidywania.

Kluczowe zagadnienie zarządzania zapasami wiąże się z przyjętymi zasadami przepływu informacji oraz ewentualnego podziału strumieni tych przepływów na obszary objęte zapotrzebowaniem niezależnym i zależnym, przy czym [69]:

- *zapotrzebowanie niezależne* – określa się jako zapotrzebowanie niepozostające w związku z innymi zapotrzebowaniami na część wymienną, np. potrzeby serwisu. Zapotrzebowanie to *jest na ogół prognozowane*. Niezależność zapotrzebowania rozumie się przy tym jako wynikające z faktu, że powstaje ono poza przedsiębiorstwem. Wielkością charakterystyczną dla tego rodzaju postępowania jest *zapas zabezpieczający* dla pokrycia zmienności dostaw i popytu,
- *zapotrzebowanie zależne* – to zapotrzebowanie wynikające z zapotrzebowania na jednostki o wyższej złożoności. Może ono być *szczegółowo wyliczane*, a nie prognozowane, przykładowo przy naprawie jakiegoś podzespołu (wyższa złożoność) potrzebna jest określona liczba części wchodzących w ten podzespół.

Kształtowanie zapasów w warunkach zapotrzebowania niezależnego i zależnego różni się, zarówno jeśli chodzi o uwarunkowania położenia magazynów, jak i sposób działania. Ponadto, należy mieć jeszcze na uwadze, do jakiej grupy pod względem możliwości zaplanowania zalicza się daną część. Wyróżnia się tu:

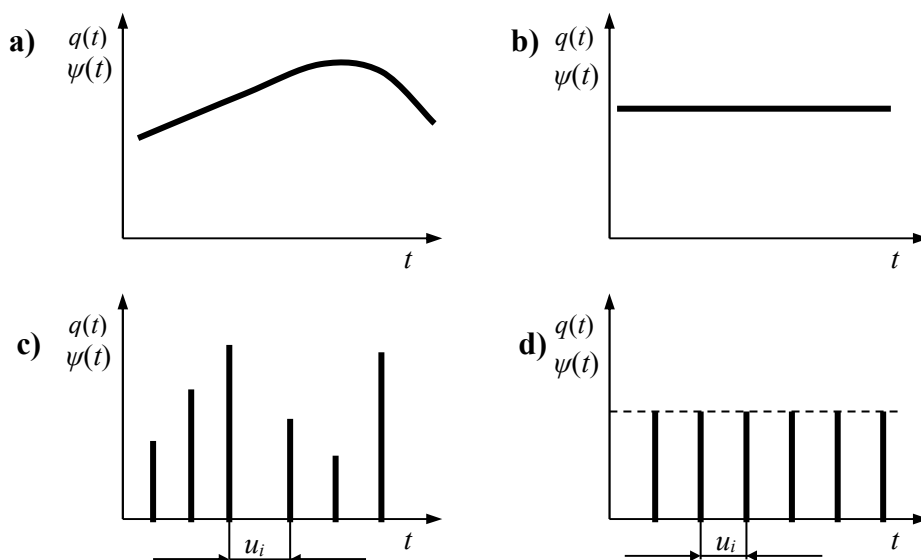
- *zapas rotujący (obrotowy)* – jest to zapas związany z dostawami pod obsługi planowane. Przy obsługach planowych i prewencyjnych, zapotrzebowanie jest przewidywalne,
- *zapas nierotujący (zabezpieczający)* – jest to typowy zapas, np. takich części wymiennych, które stanowią zabezpieczenie na skutek nieprzewidzianych zdarzeń (uszkodzenia awaryjne).

Określenie zapasu niezbędnego do zabezpieczenia potrzeb systemu eksploatacji maszyn wymaga szczególowej *analizy strumieni dostaw i potrzeb*. W praktyce problem kształtowania zapasów sprowadza się zwykle do sterowania tymi strumieniami w już istniejącym systemie zaopatrywania. Standardowe zakupy w większości dokonywane są poprzez wysyłanie zapytań ofertowych do sprawdzonych dostawców. Dla drobnych zakupów firma ma wybranego jednego, dobrego, sprawdzonego dostawcę, który oferuje korzystne ceny i zna wymagania odbiorcy. Przy dużych zakupach, zwłaszcza usług, z dostawcami prowadzone są negocjacje, analizowane są oferty pod względem kosztów, jakości oraz pewności dostawy. Analizując strumienie dostaw, należy mieć też na uwadze dwa elementy [164]:

- zmienność strumienia dostaw w czasie,
- znajomość parametrów strumienia dostaw.

Zmienność strumienia dostaw w czasie wynika, np. z istniejących ograniczeń producenta, możliwości transportowych, posiadanych środków finansowych, itp. Strumienie dostaw mają charakter stały, gdy dostawy realizowane są terminowo, i bez zakłóceń. Podobnie ma się rzecz ze strumieniem zapotrzebowania (ustabilizowane i regularne zapotrzebowanie).

Gdy warunki takie nie zachodzą, mamy do czynienia ze strumieniami losowymi. W tym przypadku ich analiza wymaga znajomości charakterystyk probabilistycznych: funkcji gęstości rozkładu zapotrzebowania lub dostawy, wartości średniej oraz odchylenia standardowego. W praktyce uzyskanie rzeczywistych wartości tych charakterystyk jest niezmiernie trudne, stąd też w większości przypadków przyjmuje się założenie upraszczające, że strumienie dostaw i zapotrzebowania mają charakter dyskretny. Dla części wymiennych i materiałów eksploatacyjnych (paliwa, smary, itp.) jest to w pełni uzasadnione, gdyż są one dostarczane i zużywane partiami o określonych wielkościach i co pewien czas. Dla zilustrowania powyższych rozważań, na rys. 127 pokazano modele strumieni dostaw  $q(t)$  i zapotrzebowań  $\psi(t)$  w funkcji czasu  $t$  [164].



Rys. 127. *Modele strumieni dostaw i zapotrzebowań* [164]:  
 a) *strumień ciągły zmienny*, b) *strumień ciągły stały*,  
 c) *strumień dyskretny zmienny*, d) *strumień dyskretny stały*

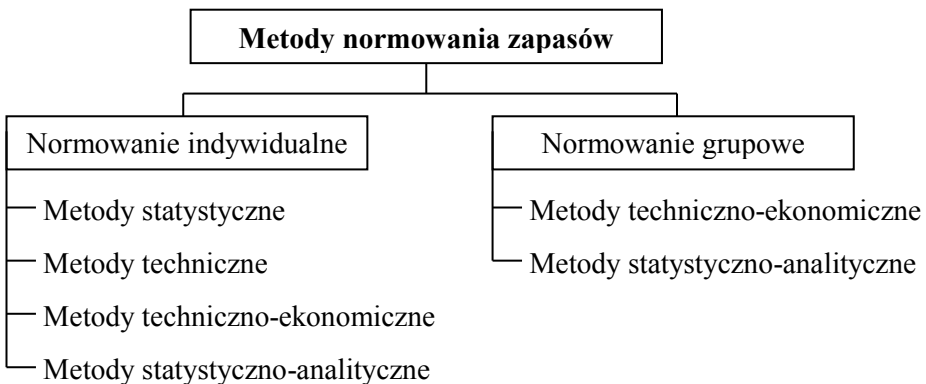
Strumienie ciągłe, zdeterminowane są opisywane zazwyczaj funkcją intensywności dostaw lub potrzeb, a dyskretny – ciągiem wielkości zapotrzebowań.



## 14.4. Normowanie zapasów

W wielu działach zaplecza technicznego, bardzo często wielkość posiadanych zapasów ustalana jest jedynie na podstawie doświadczenia odpowiedzialnego za nie pracownika, bez uwzględnienia matematycznych przesłanek awaryjności maszyn. Praktycy, zwłaszcza z dużym stażem, nie przykładają wagi do niepewności procesu zaopatrywania (w razie potrzeby wykorzystując możliwość uzyskania elementów rezerwowych po wyższym koszcie). Nie zawsze jednak istnieje taka możliwość, np.: w przypadku elementów trudno dostępnych, przy braku możliwości prawnych realizacji takich dostaw lub w sytuacjach nadzwyczajnych [20]. Odpowiednia organizacja procesu zaopatrywania z pewnością jest w tych przypadkach czynnikiem silnie wpływającym na gotowość maszyn.

W celu efektywnego operowania zapasami oraz przeciwdziałania zbędnym zapasom stosuje się ich normowanie. *Norma zapasu* jest to ekonomicznie uzasadniona (wzorcowa) wielkość zapasu, niezbędna do wykonania określonych zadań. Zapasy mogą być wyrażone w dniach, liczbie części, lub wartościowo. W praktyce do ustalania indywidualnych lub grupowych norm zapasów stosuje się różne podejścia (metody) – rys. 128 [86]:



Rys. 128. *Metody planowania zapasów części wymiennych i materiałów eksploatacyjnych* [86]

- w *metodach statystycznych* jako podstawowe założenie przyjmuje się cykliczność procesów eksploatacyjnych i wykorzystuje się dane z poprzednich okresów,
- *metody techniczne* zakładają zdeterminowany (określony) strumień popytu i polegają na obliczeniu wskaźników zapasów (w dniach) dla planowanego okresu,

- *metody techniczno-ekonomiczne* stanowią połączenie metod statystycznych i technicznych, z uwzględnieniem czynników ekonomicznych (ekonomiczna partia dostaw),
- *metody statystyczno-analityczne* są odmianą metod techniczno-ekonomicznych. Podstawę do obliczeń w tej grupie stanowią szczególne dane o strumieniu dostaw (cykliczność, wielkość dostaw, przeciętne odchylenia od cykliczności itp.).

Większość tych metod opiera się na klasycznych modelach ustalania zapasów. W tym zakresie istnieją dwa podstawowe modele [69]:

- *stałego poziomu zamawiania*,
- *stałego cyklu zamawiania*.

Zasadnicze różnice pomiędzy tymi modelami podano w tab. 10 [125].

Tab. 10. *Różnice pomiędzy klasycznymi modelami tworzenia zapasów* [125]

Charakterystyki	Model <i>stałego poziomu zamawiania</i>	Model <i>stałego cyklu zamawiania</i>
Partia zakupu	Stała $Q_{opt}$	Zmienna
Moment zamawiania	Obniżenie się zapasu do poziomu alarmowego A	Ustalony cykl zamawiania $R_{opt}$
Księgowanie obrotów	Ciągłe (po każdej operacji)	W punktach zamawiania
Średnia wielkość zapasu	Mniejsza niż w modelu stałego cyklu zamawiania	Większa
Czasochłonność sterowania	Większa (ciągła ewidencja)	Mniejsza

*Model stałego poziomu zamawiania* zakłada więc stałą wielkość  $Q_{opt}$ , zmienne są natomiast momenty, w których inicjowane są zakupy (wystawienie zamówienia). Normami sterowania są: optymalna partia zakupu ( $Q_{opt}$ ) i poziom alarmowy (A). Poziom alarmowy ma na celu sygnalizowanie konieczności niezwłocznego złożenia zamówienia uzupełniającego z pewnym wyprzedzeniem w stosunku do chwili, w której nastąpi wyczerpanie zapasu.

*Model stałego cyklu zamawiania* opiera się założeniu, że zamówienia uzupełniające wystawiane są w stałych cyklach (odpowiadających optymalnemu cyklowi zamawiania  $R_{opt}$ ), a wielkości zamówień są zmienne. Zmienność ta jest zależna od zapasu istniejącego w punkcie zamawiania. Jeżeli w tym punkcie zapas kształtuje się poniżej zamawiania, wystawiane jest zamówienie. Zamówienie jest dopełnieniem istniejącego zapasu do poziomu maksymalnego S. Model ten wymaga zatem określenia dwóch aspektów:

- optymalnego cyklu zamawiania  $R_{opt}$ ,

- poziomu zapasu maksymalnego  $S$ .

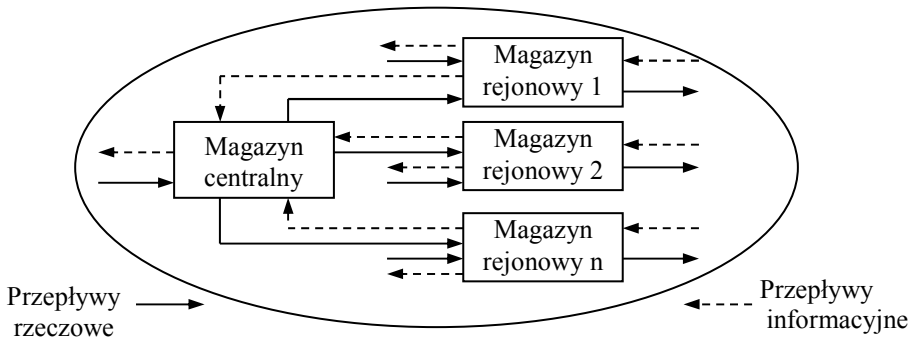
Na modelu klasycznej teorii zapasów w dużej mierze bazują coraz to bardziej rozbudowywane modele zaopatrywania systemu eksploatacyjnego w części wymienne, których istotną cechą jest przyjęcie określonej strategii obsługi (np. wymiany profilaktyczne w przewidzianej wcześniej chwili), lub charakteryzującej proces odnowy w maszynie. Dodatkowym aspektem, często uwzględnianym w tych modelach, jest też koszt naprawy elementów. Do tego rodzaju modelowania zaopatrywania często przyjmuje się również pewne założenia upraszczające, np. znajomość rozkładu prawdopodobieństwa czasu życia maszyny, rodzaj struktury organizacyjnej sterowania zapasami itp. [52].

Nie istnieje jedna uniwersalna organizacja magazynu części wymiennych.

To jak ona powinna być zależy od:

- organizacji firmy (relacje magazyn-dział utrzymania ruchu),
- specyfiki przedsiębiorstwa (udział maszyn i urządzeń),
- struktury magazynowej.

Struktura organizacyjna niektórych rozproszonych geograficznie przedsiębiorstw zakłada np. istnienie dwóch szczebli magazynów części wymiennych: centralnego i rejonowych (rys. 129). Typowymi przykładami w tym zakresie mogą być przedsiębiorstwa budowlane lub usługowe, np. handlu częściami samochodowymi.



Rys. 129. *Dwuszczeblowy system magazynów części wymiennych* [129]

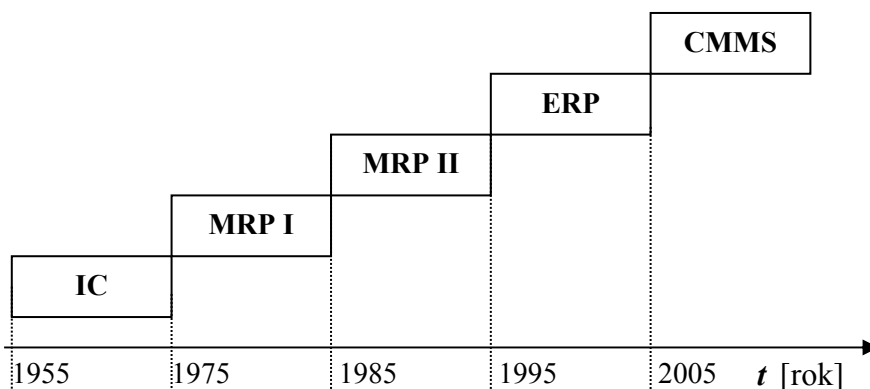
Tego typu struktura, mimo jej korzystnych aspektów w zakresie czasu dostarczenia części wymiennej, stwarza duże problemy w zakresie normowania i sterowania zapasami. Do najistotniejszych można zaliczyć następujące: które pozycje utrzymać i w jakich ilościach w zapasach obu rodzajów magazynów, a które tylko w magazynach rejonowych [129]. Ogólnie w magazynach rejonowych powinny być tworzone zapasy bezpieczeństwa, mające na celu przede wszystkim pokrycie popytu większego od prognozowanego.

## 14.5. Zaopatrzenie wspomagane komputerowo

Rozwój technologii informatycznej powoduje coraz szersze przenikanie jej do różnych dziedzin techniki zarówno całych systemów informatycznych, w tym szczególnie rozpowszechnionych już komputerów jak i ich elementów, takich jak: mikroprocesory, pamięci, układy wejściowe i wyjściowe, itp.

W eksploatacji maszyn istnieje wiele różnych możliwości wykorzystania komputerów, w zależności od sytuacji oraz stopnia automatyzacji procesu i systemu eksploatacji [159]. Podstawowym zadaniem systemu informatycznego jest wykonywanie obliczeń i przedstawianie ich wyników w dogodnej dla użytkownika postaci. Stąd zastosowanie tej technologii znalazło swoje zastosowanie (jako jedno z pierwszych) w gospodarce magazynowej i sterowaniu zapasami [83]. Magazynier wyposażony w kartkę i długopis nie jest już w stanie sprostać złożoności czynności realizowanych we współczesnym magazynie.

Współczesne systemy komputerowe nadal znajdują się jeszcze w stanie ewolucji (rys. 130), przeobrażając się z: kontroli stanów magazynowych (systemy *IC*), w kierunku planowania zapotrzebowania materiałowego (systemy *MRP I*), planowania zasobów produkcyjnych (*MRP II* oraz *ERP*) aż do systemów *CMMS*, związanych z gospodarką remontową i utrzymaniem maszyn w ruchu.



Rys. 130. *Ewolucja systemów komputerowych stosowanych w zaopatrzeniu eksploatacyjnym* [141]

Podstawą wszystkich współczesnych systemów planowania zapotrzebowania materiałowego i sterowania zapasami jest program komputerowy klasy *MRP* (*Material Requirement Planning*), wywodzący się z aplikacji komputerowej opracowanej jeszcze w latach 50. XX w. przez Josepha A. Orlicky'ego [59].

Użycie systemu komputerowego eliminuje potrzebę ręcznego wykonania dużej liczby obliczeń [83]. Przykładowo klasyczny system *MRP* umożliwia dokładne określenie ilości niezbędnych części wymiennych oraz terminy ich dostarczenia do zmieniającego się zapotrzebowania na części lub materiały eksploatacyjne [68]. Istotnym elementem tego systemu jest fakt, iż zapotrzebowanie zależne na poszczególne części, podzespoły lub surowce jest obliczane, przez co unika się błędów prognozy.

Wielkość zapasu bezpieczeństwa ulega obniżeniu, ponieważ uwzględnia tylko możliwość odchyień, które mogą wynikać z czasu dostawy, a nie zawiera odchyień związanych ze zmiennym popytem. Uwzględnia tylko: cykle dostawy, wielkości bieżących zapasów oraz harmonogram zapotrzebowania dla każdej części, podzespołu lub surowca w poszczególnych asortymentach.

System *MRP* w swej klasycznej postaci obecnie jest już pojęciem historycznym. Duży sukces (wynikający z przydatności), rozszerzył jego zastosowanie na wiele różnych gałęzi gospodarki. Zaszła więc konieczność ustalenia określonych standardów w zakresie jego budowy i przeznaczenia. Stąd też Amerykańskie Stowarzyszenie Sterowania Produkcją i Zapasami (APICS) w 1989 r. zdefiniowało i opublikowało standard *MRP II* (*Manufacturing Resource Planning*), określane jako *Planowanie Zasobów Produkcyjnych*. Ze względu na identyczność angielskich skrótów obu systemów starego *MRP* i nowego *MRP*, przyjęto pierwszy z nich oznaczać jako *MRP I* [83].

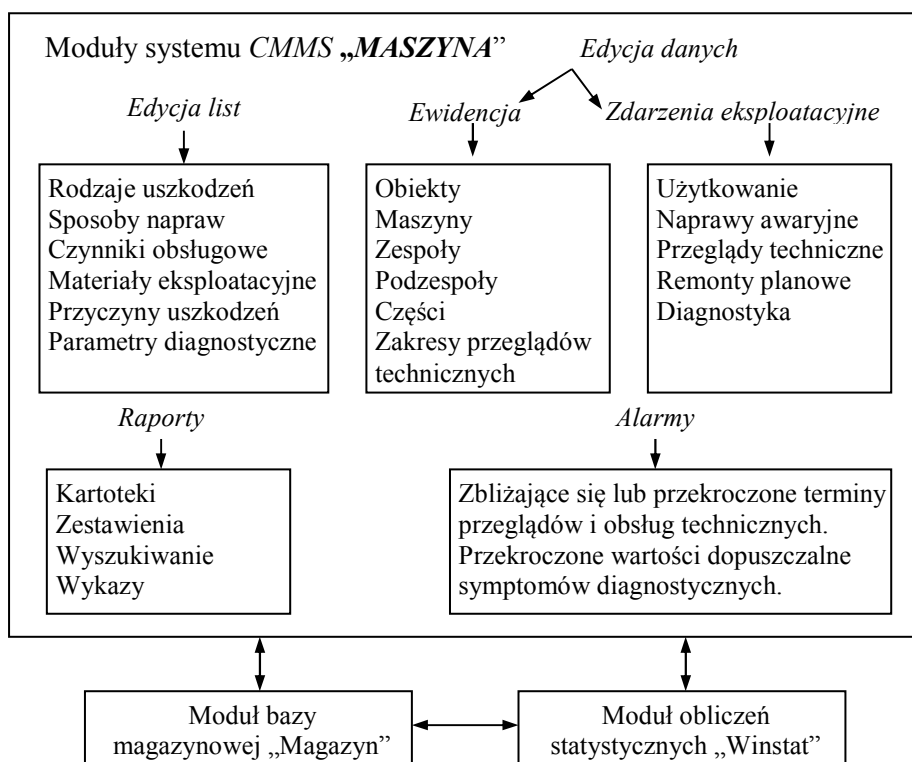
Współczesne systemy zaopatrywania eksploatacyjnego opierają się zatem głównie na algorytmach i *standardzie MRP II*. Jest to kompleksowy system planowania zasobów w przedsiębiorstwie, ułatwiający w sposób zdecydowany pracę zarządu. System ten został poszerzony, w stosunku do *MRP I*, o elementy dotyczące planowania przedsięwzięć produkcyjnych.

Kolejnym etapem rozwoju systemu *MRP* jest system *ERP* (*Enterprise Resource Planning*) – rozbudowany funkcjonalnie system informatyczny, obejmujący procesy produkcji, dystrybucji i finansów. System ten jest systemem *MRP II* powiększonym o moduł dystrybucji, integrując tym samym różne sfery przedsiębiorstwa. Z tego tytułu określane jest czasami jako *MRP III*.

Do zaopatrywania eksploatacyjnego (zwłaszcza w zakresie części wymienionych) z dużym powodzeniem wykorzystywane są systemy komputerowe typu *CMMS* (*Computerized Maintenance Management Systems*). Systemy tego typu, wspomagające utrzymanie ruchu, budowane są na zasadzie transakcyjnych baz danych, w których gromadzona jest informacja o obiektach eksploatacji oraz ich otoczeniu. Z reguły podstawowe funkcje takiego systemu koncentrują się na realizacji oraz kontroli realizacji prac obsługowo-naprawczych [55].

Systemy *CMMS* mogą stanowić samodzielne programy do kompleksowej obsługi maszyn i urządzeń, lub też odpowiednie moduły systemów opartych na standardzie *MRP II*. Przy wykorzystaniu tych systemów inżynierowie mogą sprawdzać i analizować przyczyny wcześniejszych przestojów, jak też zlecać przeglądy maszyn przed wystąpieniem potencjalnej awarii. Za istotną korzyść tych systemów uznaje się też optymalizację magazynów części wymiennych i materiałów eksploatacyjnych oraz minimalizację nakładu pracy związaną z obróbką i analizą danych [52].

Szczególnie interesującym, w aspekcie utrzymania ruchu i zaopatrywania maszyn w części wymienne, jest system *CMMS* „*Maszyna*” [98]. Jest to systemem ekspertowy, który ma na celu dostarczenie dużej ilości informacji o danej maszynie (rys. 131). Koncentruje się na tworzeniu i kolejkowaniu harmonogramów czynności oraz gromadzeniu pełnej historii awarii i eksploatacji wraz z ich szczegółowymi opisami. Pozwala również na dozorowanie terminów określonych obsług technicznych oraz symptomów diagnostycznych [98].



Rys. 131. *Struktura systemu CMMS „Maszyna”* [98]

## 14.6. Podsumowanie

Rozdział 14. obejmuje zagadnienia związane z zaopatrywaniem eksploatacyjnym. Podstawowe zadania systemu zaopatrywania dotyczą gromadzenia, utrzymywania i dystrybucji materiałów eksploatacyjnych oraz części wymiennych. Omówiono strukturę organizacyjną systemu zaopatrywania podkreślając, że musi spełniać dwa podstawowe warunki – być szybka i pewna. Ułatwia to na pewno wprowadzenie systemów komputerowych umożliwiających łączność i szybkie składanie zamówień. Równie istotna jest niezawodność, bo to daje w każdym przypadku przewagę konkurencyjną.

Z punktu widzenia inżynierii eksploatacji istotna jest klasyfikacja zapasów. Dokonano zatem takiej klasyfikacji, biorąc pod uwagę różne kryteria. Podkreślono, że szczególnie przydatna jest klasyfikacja według kosztów, którą określa się jako metodę ABC oraz klasyfikacja według regularności zapotrzebowania – metoda XYZ. Scharakteryzowano obie te klasyfikacje rodzajowe.

Likwidacja zapasów nie jest możliwa, dlatego należy skupić się na tym, aby były one optymalnie i racjonalnie sterowane. Wskazano zatem na kluczowe zagadnienia sterowania zapasami takie jak: zmienność strumienia dostaw w czasie oraz znajomość parametrów strumienia dostaw. Wyróżniono tu różne procedury postępowania w zależności od tego, czy jest to zapotrzebowanie zeterminowane czy losowe.

Omówiono metody normowania zapasów, szczególną uwagę zwracając na procedurę klasycznych modeli sterowania zapasami: według stałego poziomu zamawiania oraz według stałego cyklu zamawiania. Wskazano, że na tych modelach w dużej mierze bazują coraz to bardziej rozbudowywane modele zaopatrywania maszyn w materiały eksploatacyjnego i części wymienne.

Rozwój technologii informatycznej powoduje coraz szersze przenikanie jej do różnych dziedzin techniki. Zastosowanie tej technologii znalazło swoje zastosowanie (jako jedne z pierwszych) w gospodarce magazynowej i sterowaniu zapasami. Scharakteryzowano podstawowe aplikacje w tym względzie, zwłaszcza *MRP* oraz *CMMS*. Podkreślono, że są to aplikacje uniwersalne, przy czym do zadań eksploatacyjnych najbardziej przydatny jest system *CMMS*. W tym zakresie przybliżono jeden z bardziej rozpowszechnionych systemów pt. *CMMS* „*Maszyna*”. Jest to system ekspertowy, który umożliwia śledzenie wszelkich czynności formalnych związanych z funkcjonowaniem maszyny. Pozwala również na dozorowanie terminów określonych obsług technicznych oraz symptomów diagnostycznych.

# 15. PRZYKŁADY ROZWIĄZYWANIA ZADAŃ

## Zad. 1.

### Treść zadania

Trwałość żarówek 60 W różni się od przeciętnej trwałości żarówek tego producenta wynoszącej  $\bar{T} = 1000$  h, co najwyżej o  $\pm 150$  h (godzin). Oblicz, jaki procent żarówek tego typu będzie miał trwałość większą niż przeciętna, lecz nie większą niż 1100 h?

### Dane i założenia

Średnia trwałość  $\bar{T} = 1000$  h (godzin)

$$T_{min} \geq 1000 \text{ h}$$

$$T_{max} \leq 1100 \text{ h}$$

Dopuszczalny rozrzut trwałości  $\sigma_{n-1} = \pm 150$  h. Jeżeli nie zaznaczono wyraźnie, iż uzyskane dane dotyczą konkretnej próbki, można przyjąć, że są one podawane w odniesieniu do populacji (czyli  $\sigma_n$  przeliczona została na  $\sigma_{n-1}$ ). Ponadto, jeżeli nie określono w zadaniu, dla jakiego poziomu ufności należy prowadzić rozważania, to obowiązuje ogólna reguła minimalnego ryzyka  $\alpha = 0.01$ , stąd  $p = 1 - \alpha = 0.99$ . Tym samym rozrzut  $\pm 150$  h odpowiada zmienności  $\pm 3\sigma_{n-1}$ .

### Szukane

Typ rozkładu

$$R(\Delta T) = ?$$

### Rozwiązanie

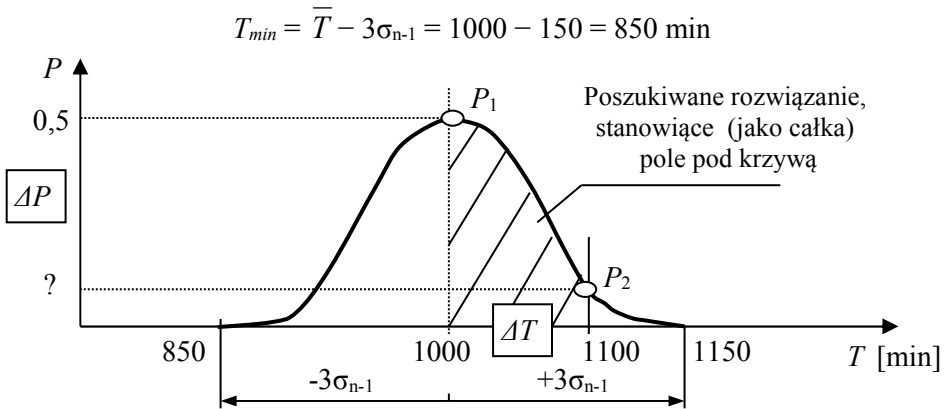
Przeciętna trwałość żarówek  $\bar{T}$  jest wielokrotnie większa od odchylenia standardowego  $\sigma_{n-1}$ , stąd można wnioskować, że dobrym przybliżeniem rozkładu zmiennej losowej  $T$  badanych żarówek jest rozkład normalny. Sprawdzamy jednak zawsze typ rozkładu. Dla przypomnienia, rozkład normalny przyjmuje my wówczas, jeżeli współczynnik zmienności  $v = \sigma_{n-1}/\bar{T} \leq 0,33$ .

### Szkic pomocniczy i obliczenia

Jeżeli jest to możliwe, zawsze warto sporządzić sobie szkic pomocniczy (rysunek). Na szkicu tym nanosimy wartości wynikające z danych oraz z założeń. Biorąc pod uwagę, że będzie to rozkład normalny, graniczne wartości tego rozkładu opisane są wartościami (przy założeniu  $\alpha = 0,01$ ):

$$T_{max} = \bar{T} + 3\sigma_{n-1} = 1000 + 150 = 1150 \text{ min}$$





Przy takich założeniach całkowity rozstęp  $T_{max} - T_{min}$  wynosi  $6\sigma_{n-1}$ .

$$T_{max} - T_{min} = 1150 - 850 = 300 \text{ min.}$$

Zatem jedno odchylenie standardowe  $\sigma_{n-1}$  wynosi  $300/6 = 50 \text{ min}$ .

Mając wartość średnią  $\bar{T}$  (miarę położenia) oraz odchylenie standardowe  $\sigma_{n-1}$  (miarę rozproszenia) można sprawdzić, czy jest to rozkład normalny, wyznaczając współczynnik zmienności  $v$ :

$$v = 50/1000 = 0,05.$$

Wartość ta jest dużo mniejsza od wartości granicznej  $v_{gr} = 0,33$  co świadczy o tym, że dokonane przez nas założenie, dotyczące typu rozkładu, było prawidłowe (należy zawsze sprawdzać, czy dany zbiór można opisać rozkładem normalnym, ze względu na prostotę obliczeń według tego rozkładu).

Aby wyznaczyć procent żarówek, które będą świecić przez okres czasu  $\Delta T = 1100 - 1000 \text{ min}$ , należy obliczyć całkę oznaczoną od punktu  $P_1$  do punktu  $P_2$ , czyli wartość  $\Delta P$ . W tym celu można skorzystać z tablicy dystrybuanty rozkładu normalnego  $F(T)$ , zamieszczonej w załączniku lub w prawie każdej książce z zakresu rachunku prawdopodobieństwa.

Chcąc pobrać określoną wartość prawdopodobieństwa z tej tablicy, należy najpierw obliczyć wartość zmiennej standaryzowanej  $u_m$ , opisaną wzorem (41). Wobec powyższego:

– dla punktu  $P_2$

$$u_2 = \frac{1100 - 1000}{50} = 2,00$$

dla tej wartości odszukujemy w tablicy wartość  $p = 0,9773$   
 – dla punktu  $P_1$  (analogicznie)

$$u_2 = \frac{1000 - 1000}{50} = 0,00$$

dla tej wartości odszukujemy w tablicy wartość  $p = 0,5000$  (wartość tę można było przyjąć bez wyliczania z samej konstrukcji rozkładu normalnego – jako krzywej symetrycznej).

Wartość całki jest różnicą  $\Delta P = 0,9773 - 0,5000 = 0,4773$  (można wartość tę wyrazić w procentach i wówczas otrzymamy końcowy wynik 47,73%).

**Odp.** W analizowanym okresie czasu można oczekiwać, że będzie sprawnych około 47% żarówek badanego producenta.

## **Zad. 2.**

### **Treść zadania**

Zbadano, że rozkład trwałości gwintowników może być opisany rozkładem Weibulla o wartościach: parametr skali  $a = 40$  min oraz parametr kształtu  $b = 1,3$  min. Oblicz, jaka będzie niezawodność tych gwintowników w operacji trwającej  $t_m = 6$  min.

### **Dane i założenia**

Typ rozkładu – Weibulla

- parametr skali  $a = 40$  min
- parametr kształtu  $b = 1,3$  min

Oczekiwany czas pracy  $t_m = 6$  min

### **Szukane**

$R = ?$

### **Obliczenia**

Funkcja niezawodności  $R$  rozkładu Weibulla opisana jest zależnością (55). Po podstawieniu powyższych danych do tej zależności otrzymujemy związek:

$$R(t_m) = \exp\left(-\frac{6^{1,3}}{40}\right) = e^{-0,256} = 0,7773 = 77,73\%.$$

**Odp.** W analizowanej operacji można oczekiwać niezawodności badanych gwintowników na poziomie około 77%.

### **Zad. 3.**

#### **Treść zadania**

Wkręty do drewna pakuje się automatycznie w woreczki foliowe (na zasadzie ich ciężaru). Zbadano próbkę składającą się z 36 woreczków i określono, że liczba wkrętów w woreczkach jest zmienną losową o wartości średniej = 200 sztuk i rozrzucie opisywanym odchyleniem standardowym wynoszącym 3 sztuki. Oblicz wartość średniej (przeciętnej) liczby wkrętów w tych woreczkach na poziomie istotności  $\alpha = 5\%$ .

#### **Dane i założenia**

Liczność próbki  $n = 36$  szt.

Wartość średnia  $\bar{x} = 200$  szt.

Odchylenie standardowe dla próbki  $\sigma_n = 3$  szt.

Poziom istotności  $\alpha = 5\%$

#### **Szukane**

Zadanie dotyczy analizy wartości przeciętnej  $u$  (średniej), dotyczącej badanej populacji, przy założeniu poziomu istotności  $\alpha = 5\%$ .

#### **Obliczenia**

Postępuje się tak samo jak przy badaniu populacji. Sprawdzenie typu rozkładu  $v = \sigma_n / \bar{x} = 3/200 = 0,015 < 0,33$ , co potwierdza normalność rozkładu.

Statystyczne reguły postępowania dotyczące zmienności wartości przeciętnej są takie same jak dla całej populacji, z wyjątkiem tego, że należy w tym przypadku stosować odchylenie standardowe nie dla populacji  $\sigma_n$ , ale odchylenie standardowe wartości przeciętnej  $\sigma_x$ , wyliczane z zależności:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_n}{\sqrt{n}} .$$

Wobec powyższego:

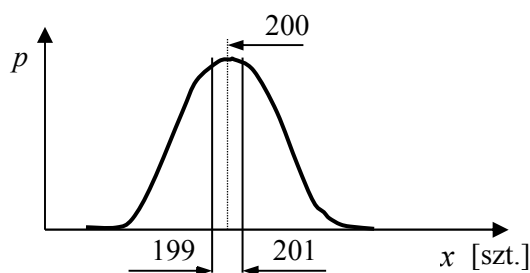
$$\sigma_x = \frac{3}{\sqrt{36}} = 0,5$$

$\alpha = 5\%$  czyli poziom ufności  $p = 1 - \alpha = 1 - 0,05 = 0,95$ .

Przy takim poziomie ufności obowiązuje ogólnie reguła 2 sigmowa, czyli:

$$u_{\max} = u + 2 \sigma_x = 200 + 2 \cdot 0,5 = 201 \text{ sztuk}$$

$$u_{\min} = u - 2 \sigma_x = 200 - 2 \cdot 0,5 = 199 \text{ sztuk}$$



**Odp.** Przeciętna liczba wkrętów w woreczkach wynosi od 199 do 201 sztuk.

## Zad. 4.

### Treść zadania

Metodą wibroakustyczną przeprowadzono badania twardości ściernic ceramicznych według modułu  $E$  i uzyskano następujące wyniki wyrażone w [GPa]: 38, 32, 45, 47, 22, 40, 48, 55, 68, 57, 40, 39, 67, 56, 50. Które (ewentualnie) wyniki należy odrzucić jako błędne, przy założeniu dopuszczalnego błędu  $\rho = 1\%$ ?

### Dane i założenia

Liczebność próbek  $n = 15$

Wartości  $E_1$  do  $E_{15}$  [Gpa]

Dopuszczalny błąd pomiaru  $q = 0,01$

### Szukane

Które z tych wyników mogą być błędne przy podanym błędzie pomiaru?

## Obliczenia

Do rozwiązania zadania zastosujemy test Grebbsa, którego wartości krytyczne, dla odrzucenia wyraźnie wyróżniających się wartości ze zbioru wyników badań, podaje tablica zamieszczona w załączniku.

Porządkujemy najpierw dane, aby określić wartości skrajne szeregu. Mamy więc:  $E = 22, 32, 38, 39, 40, 40, 45, 47, 48, 50, 55, 56, 57, 67, 68$  [GPa].

Jest to zmienna losowa, zatem wyliczamy miary probabilistyczne dla próbki:

- wartość średnia  $\bar{E} = 46,93$  [GPa],
- odchylenie standardowe  $\sigma_n = 12,09$  [GPa].

Sprawdzamy normalność rozkładu:

$v = \sigma_{n-1} / \bar{E} = 12,09/46,93 = 0,2576 < 0,33$ , co upoważnia do opisu badanej próbki rozkładem normalnym i korzystania z testu Grebbsa. Statystyka tego testu wyraża się zależnością:

$$\eta = \left| \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_n} \right|.$$

Jeżeli zachodzi relacja  $\eta_g \leq \eta$ , badaną wartość  $x_i$  z szeregu rozdzielczego należy odrzucić jako błędną (kryterium Grebbsa  $\eta_g$  ujmuje właśnie tablica w załączniku). Dla  $n = 15$  oraz  $q = 0,01$  z tablicy Grebbsa,  $\eta_g = 3,075$ .

Obliczamy pierwsze skrajne wartości:

- najmniejszą:

$$\eta_{22} = \left| \frac{22 - 46,93}{12,09} \right| = 2,06 \text{ mniejsza od } 3,075 \text{ co oznacza, że wartość tę}$$

i wszystkie od niej większe, jako prawidłowe, należy pozostawić do dalszych badań.

- największą:

$$\eta_{68} = \left| \frac{68 - 46,93}{12,09} \right| = 1,74 \text{ mniejsza od } 3,075 \text{ co oznacza, że wartość tę oraz}$$

wszystkie od niej mniejsze, jako prawidłowe, należy pozostawić do dalszych badań. Gdyby zachodziła relacja odwrotna, należy sprawdzać kolejne wyniki.

**Odp.** Wszystkie dostarczone wyniki badań należy pozostawić jako prawidłowe do dalszych badań.

## **Zad. 5.**

### **Treść zadania**

Obliczyć, jaka jest szansa funkcjonowania pewnego układu scalonego o intensywności uszkodzeń  $\lambda = 0,01\%$  na 1000 h, zastosowanego w automatycznej krawalnicy masy czekoladowej, jeżeli wiadomo, że urządzenie to ma pracować nieprzerwanie przez 1000 h, a rozkład uszkodzeń układów tego typu najlepiej opisuje model wykładniczy.

### **Dane i założenia**

Typ rozkładu – wykładniczy

Intensywność uszkodzeń  $\lambda = 0,01\%/1000$  h

Hala zakładu produkcyjnego, stąd współczynnik warunków pracy  $k = 50$

Oczekiwany czas pracy obiektu  $t_m = 1000$  h

### **Szukane**

Niezawodność obiektu w czasie  $t_m$ .

### **Obliczenia**

Do rozwiązania zadania zastosujemy prognozowanie według rozkładu wykładniczego (patrz p. 9.3). Skorzystamy z zależności (51) na wyznaczenie funkcji niezawodności  $R$  z uwzględnieniem warunków pracy obiektu, czyli:

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

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$R(t_m) = \exp\left(-\frac{0,0001 \cdot 1000 \cdot 50}{1000}\right) = 0,995$$

**Odp.** Szansa na poprawną pracę badanego obiektu w określonym czasie wynosi około 99,5 %.

**Zad. 6.****Treść zadania**

W laboratorium zbadano pewne urządzenie techniczne i otrzymano poniższe wyniki określonego parametru  $x = 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 35, 40, 45, 50, 55$  [ju] jednostek umownych.

Należy określić, jaka jest szansa wykonania pracy przez badany obiekt w czasie 40 ju.

**Dane i założenia**

Zbiór wartości  $x_1$  do  $x_n$  tworzących próbkę o licznosci  $n$ .

Licznosc próbki  $n = 27$

Oczekiwany czas pracy obiektu  $t_m = 40$  ju

**Szukane**

Niezawodność obiektu w czasie  $t_m$ .

**Obliczenia**

Obliczamy miary probabilistyczne z próbki (korzystając z kalkulatora):

- miarę położenia  $\bar{x} = 22,4$  [ju],
- miarę rozproszenia  $\sigma_n = 13,0$  [ju].

Dokonujemy estymacji (przeszacowania) wyników z próbki na populację:

- estymator wartości średniej  $u \equiv \bar{x} = 22,4$  [ju],
- estymator odchylenia standardowego  $\sigma_{n-1}$ , (przeszacowany wg wzoru):

$$\sigma_{n-1} = \sigma_n \sqrt{\frac{n}{n-1}} = 13 \sqrt{\frac{27}{27-1}} = 13,25 \text{ [ju]}$$

Sprawdzenie normalności rozkładu

$v = \sigma_{n-1} / \bar{x} = 13,25 / 22,4 = 0,591 > 0,33$ , co oznacza, że badany rozkład nie może być przybliżony modelem rozkładu normalnego. Należy zatem posłużyć się innym typem rozkładu. Spróbujmy to zrobić, stosując uogólniony rozkład gamma. Z zależności (56) i (57) wyznaczamy parametry rozkładu gamma:

$$\lambda = \frac{u}{\sigma_{n-1}^2} = \frac{22,4}{13,25^2} = 0,127$$

$$\varphi = \left( \frac{u}{\sigma_{n-1}} \right)^2 = \left( \frac{22,4}{13,25} \right)^2 = 2,858$$

Ponieważ rozkład gamma nie posiada własnych tablic, podających wartości dystrybuanty tego rozkładu, należy dokonać dodatkowego przeliczenia na parametry rozkładu  $\chi^2$ , wg wzorów:

$$\chi = 2\lambda \cdot t_m = 2 \cdot 0,127 \cdot 40 = 10,16$$

$$r = 2\varphi = 2 \cdot 2,858 = 5,72$$

Dla tych wartości z tablicy dystrybuanty rozkładu  $\chi^2$  (podrozdział 9.5) wyznaczamy wartość  $F(t_m)$ .

W tablicy tej istnieją dane dla liczb całkowitych. Aby wyznaczyć wartości dla liczb innych niż całkowite (jak to ma miejsce w powyższym przykładzie) należy zastosować standardową aproksymację.

Parametr  $\chi = 10,16$  jest bardzo bliski liczbie całkowitej, przyjmiemy więc dla niego wartość 10.

Parametr  $r$  wymaga przeprowadzenia jednak aproksymacji;

$$\text{dla } \chi = 10 \text{ oraz } r = 5 \quad F(t) = 0,925$$

$$\text{dla } \chi = 10 \text{ oraz } r = 6 \quad F(t) = 0,875$$

Różnicę  $0,925 - 0,875 = 0,05$  dzielimy na 100 jednostek i bierzemy z nich 72, a następnie odejmujemy je od wartości dla  $r = 5$

$$0,05/100 = 0,0005 \cdot 72 = 0,036$$

$$F(t_m) = 0,925 - 0,036 = 0,889$$

Biorąc po uwagę podstawowy związek:

$$R(t_m) + F(t_m) = 1,$$

obliczamy poszukiwaną wartość funkcji niezawodności

$$R(t_m) = 1 - F(t_m) = 1 - 0,889 = 0,111$$

**Odp.** Można oczekiwać, że szansa na poprawną pracę obiektu w wyznaczonym czasie wynosi około 10%.



**Zad. 7.****Treść zadania**

Dyrektor pewnego zakładu twierdzi, że tylko 3% produkowanych przez jego firmę wyrobów ma trwałość mniejszą niż okres gwarancji wynoszący 1 rok.

Podaj, czy dyrektor tego zakładu ma rację, jeżeli zbadano 200. elementową próbkę tych wyrobów i określono, że liczby uszkodzeń tych wyrobów w kolejnych miesiącach przedstawiały się w następującym porządku: 12, 9, 7, 3, 4, 4, 4, 4, 3, 5, 2, 4, 3, 4, 5.

**Dane i założenia**

Twierdzenie (teza) dotycząca niezawodności obiektów  $R_{gr} = 0,97$

Okres czasu objęty gwarancją  $t = 1$  rok = 12 miesięcy

Liczba obiektów funkcjonujących w czasie  $t = 0$   $Q_o = 200$  sztuk

Liczba obiektów uszkodzonych w kolejnych miesiącach 12, 9, 7, 3, 4, 4, 4, 4, 4, 3, 5, 2, 4, 3, 4, 5

**Szukane**

Potwierdzenie tezy, że:  $R(t_m) \geq R_{gr}$ .

Szukamy wartości funkcji niezawodności  $R$  po zakończeniu roku czasu czyli na początek 13 miesiąca, tj. dla  $t_m = 13$ .

**Obliczenia**

Skumulowana liczba uszkodzeń obiektów po 12 okresach obliczeniowych

$12 + 9 + 7 + 3 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 3 + 5 + 2 = 57$  sztuk.

Liczba obiektów funkcjonujących na początku 13. miesiąca

$Q_t = 200 - 57 = 143$  sztuk.

Funkcja niezawodności:

$$R(t_m) = \frac{Q_t}{Q_o} = \frac{143}{200} = 0,715$$

stąd:

$$R(t_m) < R_{gr}$$

**Odp.** Stawiana przez dyrektora teza nie potwierdziła się.

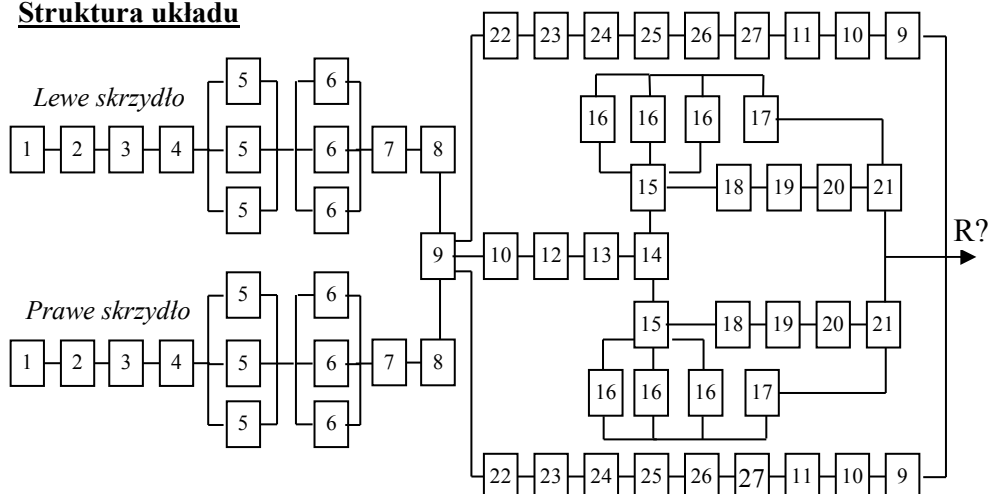
## Zad. 8.

### Treść zadania

Obliczyć, jaka jest niezawodność  $R$  układu złożonego z wielu elementów o różnej niezawodności  $R_r$  (według tabeli danych) oraz poniższej strukturze.

nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_e$	0,990	0,993	0,989	0,995	0,987	0,956	0,995	0,996	0,995
nr	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$R_e$	0,991	0,993	0,996	0,986	0,991	0,980	0,965	0,989	0,992
nr	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$R_e$	0,987	0,998	0,995	0,996	0,995	0,999	0,994	0,995	0,995

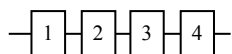
### Struktura układu



### Obliczenia

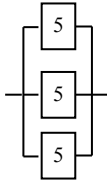
Wstępnie dokonujemy obliczeń części układu (jako układy zastępcze), korzystając z podstawowych zależności na strukturę szeregową (zależność 61 lub 62) oraz strukturę równoległą (zależność 66 lub 67).

Obliczamy układ zastępczy  $Rz_1$  dla elementów ustawionych w ten szereg



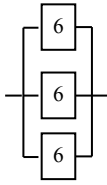
$$Rz_1 = 0,990 \times 0,993 \times 0,989 \times 0,995 = 0,9674$$

Obliczamy układ zastępczy  $Rz_2$  dla tych elementów ustawionych równoległe



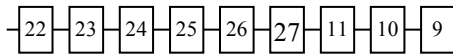
$$Rz_2 = 1 - [(1 - 0,987)^3] = 1 - 0,013^3 = 0,9999$$

Obliczamy układ zastępczy  $Rz_3$  dla tych elementów ustawionych równolegle



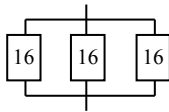
$$Rz_3 = 1 - [(1 - 0,956)^3] = 1 - 0,044^3 = 0,9999$$

Obliczamy układ zastępczy  $Rz_4$  dla elementów ustawionych w ten szereg



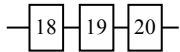
$$Rz_4 = 0,996 \times 0,995 \times 0,999 \times 0,995 \times 0,993 \times 0,991 \times 0,995 = 0,9645$$

Obliczamy układ zastępczy  $Rz_5$  dla tych elementów ustawionych równolegle



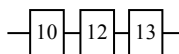
$$Rz_5 = 1 - [(1 - 0,965)^3] = 1 - 0,035^3 = 0,9999$$

Obliczamy układ zastępczy  $Rz_6$  dla elementów ustawionych w ten szereg



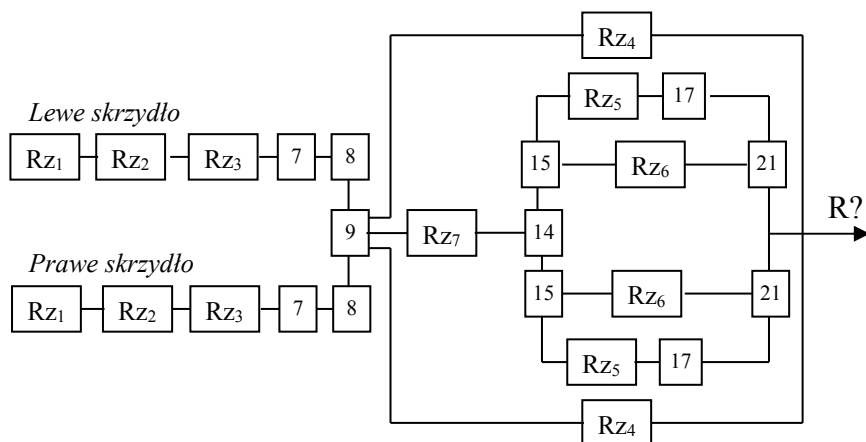
$$Rz_6 = 0,992 \times 0,987 \times 0,998 = 0,9771$$

Obliczamy układ zastępczy  $Rz_7$  dla elementów ustawionych w ten szereg



$$R_{Z7} = 0,991 \times 0,996 \times 0,986 = 0,9732$$

### Budujemy schemat zredukowanego układu



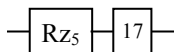
### Obliczamy układy zastępcze $R_z$ dla zredukowanego układu.

Obliczamy układ zastępczy  $R_{z8}$  dla elementów ustawionych w ten szereg

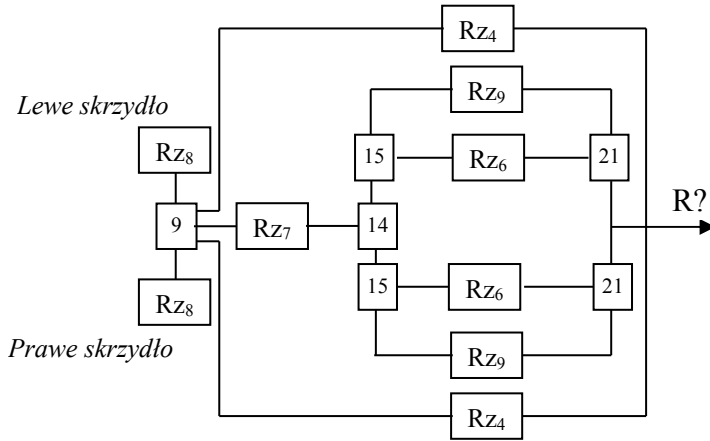


$$R_{z8} = 0,9999 \times 0,9999 \times 0,9999 \times 0,995 \times 0,996 = 0,9847$$

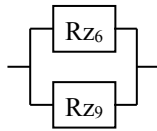
Obliczamy układ zastępczy  $R_{z9}$  dla elementów ustawionych w ten szereg



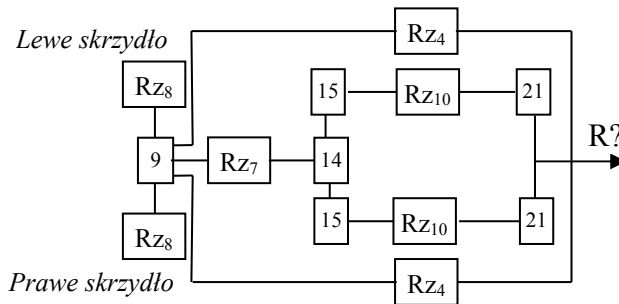
$$R_{z9} = 0,9999 \times 0,995 = 0,9949$$

**Budujemy kolejny schemat zredukowanego układu**

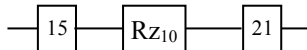
Obliczamy układ zastępczy  $R_{z10}$  dla tych elementów ustawionych równolegle



$$R_{z10} = 1 - [(1 - 0,9771) \times (1 - 0,9949)] = 0,9998$$

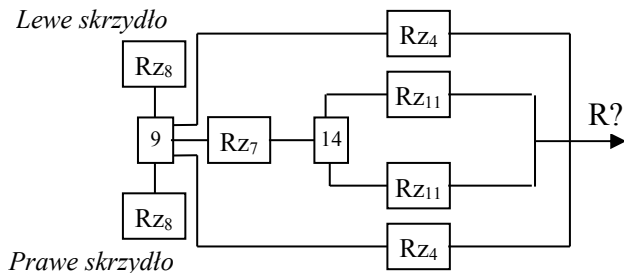
**Budujemy kolejny schemat zredukowanego układu**

Obliczamy układ zastępczy  $R_{z11}$  dla elementów ustawionych szeregowo

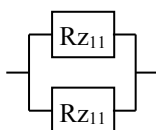


$$R_{z11} = 0,980 \times 0,9998 \times 0,995 = 0,9749$$

### Budujemy kolejny schemat zredukowanego układu

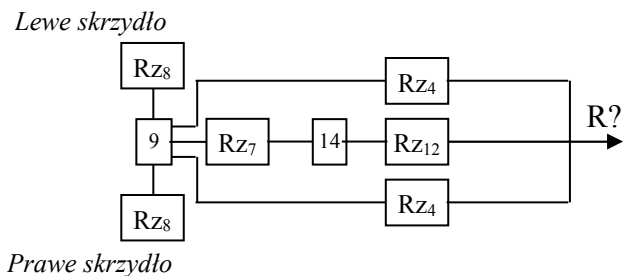


Obliczamy układ zastępczy  $Rz_{12}$  dla elementów ustawionych równolegle

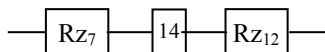


$$Rz_{12} = 1 - [(1 - 0,9749)^2] = 0,9993$$

### Budujemy kolejny schemat zredukowanego układu

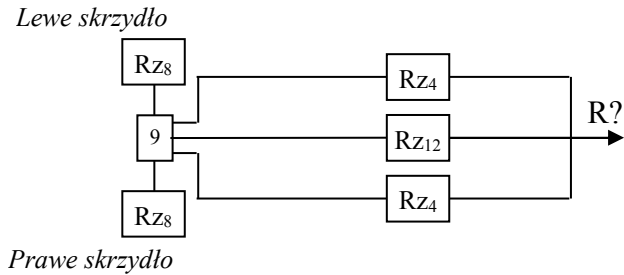


Obliczamy układ zastępczy  $Rz_{13}$  dla elementów ustawionych szeregowo

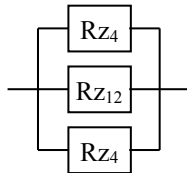


$$Rz_{13} = 0,9732 \times 0,991 \times 0,9993 = 0,9637$$

### Budujemy kolejny schemat zredukowanego układu

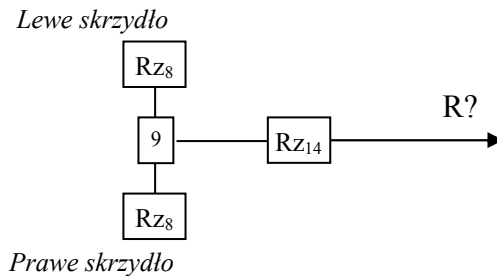


Obliczamy układ zastępczy  $Rz_{14}$  dla elementów ustawionych równolegle



$$Rz_{14} = 1 - [(1 - 0,9645)^2 \times (1 - 0,9993)] = 0,9999$$

### Budujemy kolejny schemat zredukowanego układu



Obliczamy końcową niezawodność badanego układu

$$R = 0,9847 \times 0,995 \times 0,9999 = 0,9796$$

**Odp.** Niezawodność badanego układu (zarówno dla lewego jak i prawego skrzydła) wynosi  $R = 0,9796$ .

Jak można się było spodziewać, „wąskim gardłem” tego układu (decydującym w największym stopniu o pewności jego działania) jest element nr 9 i on w pierwszej kolejności winien być poddany wszechstronnym badaniom.

## BIBLIOGRAFIA

1. **Adair Ch. B., Murray B. A.:** *Radykalna reorganizacja firmy*. Warszawa, Wyd. PWN 2002.
2. **Adamkiewicz W. i inni:** *Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym*. Warszawa, Wyd. Komunikacji i Łączności 1983.
3. **Adamik A.:** *Kształtowanie przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw*, *Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa* 6/1998, s. 5.
4. **Augustyńska D., Zawieska W. M.:** *Ochrona przed hałasem i drganiami w środowisku pracy*. Warszawa, Wyd. Centralnego Instytutu Ochrony Pracy 1999.
5. **Balicki A., Makać W.:** *Metody wnioskowania statystycznego*. Gdańsk, Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego 2000.
6. **Bartosiewicz J.:** *Niezawodność narzędzi skrawających*. Warszawa, Wyd. WNT 1982.
7. **Beichelt F.:** *Problemy niezawodności i odnowy urządzeń technicznych*. Warszawa, Wyd. WNT 1974.
8. **Bello G.C., Colombari V.:** *The Human Factors in Risk Analyses of Process Plants: The Control Room Operator Model TESEO*. *Reliability Engineering* Nr 1, 1980, pp 3-14.
9. **Bertalanffy L.:** *Ogólna teoria systemów*. Warszawa, Wyd. PWN 1984.
10. **Będkowski L.:** *Procesy diagnostyczne w aspekcie potencjału użytkowego obiektów technicznych*. Warszawa, Mat. V Kongresu Eksploatacyjnego, 27-29.09.1983, Sekcja III Diagnostyka techniczna, s. 72-77.
11. **Białek M., Bacia A.:** *Maszyny technologiczne w konwencjonalnej technologii formującej i kształtujące*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2002.
12. **Bojarski W.W.:** *Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych*. Warszawa, Wyd. PWN 1967.
13. **Borowiecki A.:** *Obciążenie psychonerwowe*. *Czasopismo „Atest Ochrona Pracy”*, Nr 2, 2003, s. 37-38.
14. **Brandowski A.:** *Nauka o bezpieczeństwie*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1993.
15. **Brzeski J., Figas M.:** *Autonomous Maintenance*. *Lean Vision*. [http://www.leanvision.com/upload/files/3/Autonomous\\_Maintenance\\_-\\_Lean\\_Vision](http://www.leanvision.com/upload/files/3/Autonomous_Maintenance_-_Lean_Vision). [dostęp 06.2009].
16. **Bąk R.:** *Podstawy eksploatacji maszyn technologicznych*. Gdańsk, Wyd. Politechniki Gdańskiej 1978.



17. **Celiński Z.:** *Spoleczna percepcja ryzyka*. Energetyka Jądrowa, Problemy, Nr 9/1991.
18. **Cempel Cz.:** *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. Warszawa, Wyd. WNT 1982.
19. **Cempel Cz.:** *Teoria i inżynieria systemów. Zasady i zastosowania myślenia systemowego*. Radom, Wyd. ITE-PIB 2008.
20. **Chałaciński J., Jędrzejowski Z.:** *Zaplecze techniczne transportu samochodowego*. Warszawa, Wyd. WKiŁ 1982.
21. **Checkland P.:** *Information Systems and Systems Thinking; Time to Unite?*. International Journal of Information Management, vol 8/1988, s.239-248.
22. **Cholewa W., Kiciński J.:** *Diagnostyka Techniczna. Metody odwracania nieliniowych modeli obiektów*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej, Seria Monografie, Zeszyt 120/2001.
23. **Cieślak M.:** *Prognozowanie gospodarcze. Metody i zastosowania*. Warszawa, Wyd. PWN 2005.
24. **Ciesielski M.:** *Instrumenty zarządzania logistycznego*. Wyd. PWE, Warszawa 2006.
25. **Czaplicki J.:** *Terotechnology versus Exploitation Theory – some remarks*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, v 43, Nr 2/2008.
26. **Dietrych J.:** *System i konstrukcja*. Warszawa, Wyd. Wiedza Powszechna 1985.
27. **Дмитрюк Г.Н., Пясик И.Б.:** *Надежность механических систем*. Москва, Изд. Машиностроение 1966.
28. **Dąbrowski L.:** *Probabilistyczny model eksploatacji pewnej klasy obiektów technicznych..* Wybrane problemy eksploatacji technicznych systemów okrętowych. Sesja Środowiskowa Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM-PAN, Gdynia, wrzesień 1990 r. s. 68-84.
29. **Downarowicz O.:** *System eksploatacji. Zarządzanie zasobami techniki*. Gdańsk-Radom, Politechnika Gdańska, ITE-PIB 2005.
30. **Drucker P.F.:** *Innowacje i przedsiębiorczość. Praktyka i zasady*. Warszawa, Wyd. PWE 1992.
31. **Dudkowska B.:** *Systemy CMMS w Polsce*. Inżynieria i Utrzymanie Ruchu, 07/2009. [http://www.utrzymanieruchu.pl/nc/menu\\_gorne/artukul/article/archiwum/lipiec-2009/](http://www.utrzymanieruchu.pl/nc/menu_gorne/artukul/article/archiwum/lipiec-2009/). [dostęp 09. 2009].
32. **Durlik I.:** *Inżynieria zarządzania. cz. II*, Warszawa, Agencja Wydawnicza Placet 2005.
33. **Dyche J.:** *CRM. Relacje z klientami*. Gliwice, Wyd. Helion 2002.
34. **Engel E.:** *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Warszawa, Wyd. PWN 1997.

35. **Fiszman G.**: *Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody*. Warszawa, Wyd. PWE 1981.
36. **Flakiewicz W.**: *Pojęcie informacji w technologii multimedialnej*. Warszawa Oficyna Wydawnicza SGH 2005.
37. **Florek J., Barczak A.**: *Procesy informacyjno-decyzyjne w eksploatacji obiektów technicznych*. Telekomunikacja i techniki informacyjne, Nr 1-2/2004, s. 31-40.
38. **Franus E.**: *Model niezawodności człowieka i jego znaczenie dla ergonomii*. Przegląd Psychologiczny, Nr 1/1977.
39. **Gawrysiak M.**: *Analiza systemowa urządzenia mechatronicznego*. Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 2003.
40. **Greń J.**: *Statystyka matematyczna. Podręcznik programowany*. Warszawa, Wyd. PWN 1987.
41. **Gronowicz J.**: *Eksploatacja techniczna i utrzymanie samochodów*. Szczecin, Wyd. Politechniki Szczecińskiej 1997.
42. **Góralczyk A.**: *Elementarna ekonomika outsourcingu*. [dostęp 11.2009] <http://dyrekcja.pl/2009/09/04/elementarna-ekonomika-outsourcingu/>.
43. **Góralczyk A.**: *Niezawodność bez mitów i złudzeń*, Magazyn kadry zarządzającej CEO. 04/2004. <http://www.cxo.pl/artykuly/40387.html> [dostęp 07. 2009].
44. **Gubała M., Dembińska-Cyran I.**: *Podstawy zarządzania transportem w przykładach*. Poznań, Wyd. Instytut Logistyki i Magazynowania 2005.
45. **Günther H. O., Tempelmeier H.**: *Production und Logistik*. Berlin, Wyd. Springer-Verlag 2003.
46. **Hebda M., Mazur T., Pelc H.**: *Teoria eksploatacji pojazdów*. Warszawa, Wyd. Komunikacji i Łączności 1978.
47. **Hellwig Z.**: *Zarys ekonometrii*. Warszawa, Wyd. PWE 1973.
48. **Hetmański M.**: *Rzeczywista autonomia maszyny*. Computerworld, Nr 13/03.2003.
49. **Hys. K., Knosala R.**: *Badania jakości usług w praktyce przemysłowej*. Zarządzanie przedsiębiorstwem, Nr 2/2006, s. 17-30.
50. **Jaworski J., Morawski R., Olędzki J.**: *Wstęp do metrologii i techniki eksperymentu*. Warszawa, Wyd. WNT 1992.
51. **Jethon Z.**: *Działalność operatorowa – nowa postać pracy człowieka*. Warszawa Wyd. PWN 1976.
52. **Jodejko A.**: *Model procesu zaopatrzenia z uwzględnieniem skutków niezdatności systemu technicznego*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Raport serii PRE 3/2006.

53. **Juziuczuk M.:** *Ergonomia w projektowaniu*. [dostęp. 11.2009], [http://www.bialystok.edu.pl/cen/archiwum/mat\\_dydz/rozne/Ergonom.html](http://www.bialystok.edu.pl/cen/archiwum/mat_dydz/rozne/Ergonom.html)
54. **Karpiński T.:** *Inżynieria produkcji*. Warszawa, Wyd. WNT 2004.
55. **Kaźmierczak J.:** *Eksploatacja systemów technicznych*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
56. **Kiliński A.:** *Podstawy teorii procesów realizacji*. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej 1972.
57. **Klimek T.:** Komentarz do standardu wycena wartości środków technicznych. Katowice <http://www.bomis.pl/download.php?id=92>. [dostęp 08. 2009].
58. **Klir G. J.:** *Ogólna teoria systemów. Tendencje rozwojowe*. Warszawa, Wyd. WNT 1976.
59. **Knosala R. i zespół:** *Komputerowe wspomaganie zarządzania przedsiębiorstwem*. Warszawa, Wyd. PWE 2007.
60. **Kołodziński E.:** *Inżynieria systemów zarządzania bezpieczeństwem – nowa oferta kształcenia Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie*. Olsztyn, Mat. VI Międzynarodowej Konf. N-T „Zarządzanie Kryzysowe”, 19-21.06.2008.
61. **Konarska M.:** *Monotonia jako czynnik obciążenia podczas pracy – ocena ryzyka zawodowego*. Czasopismo: Bezpieczeństwo Pracy, Nr 3(380), marzec 2003.
62. **Konieczny J.:** *Sterowanie eksploatacją urządzeń*. Warszawa, Wyd. PWN 1975.
63. **Konieczny J.:** *Wstęp do teorii eksploatacji urządzeń*. Warszawa, Wyd. WNT 1971.
64. **Konieczny J., Olearczuk E., Żelazowski W.:** *Elementy nauki o eksploatacji*. Warszawa, Wyd. WNT 1969.
65. **Koradecka D.:** *Bezpieczeństwo pracy i ergonomia*. Warszawa, Wyd. CIOP 1999.
66. **Kotarbiński T.:** *Dzieła wszystkie. Prakseologia*. Wrocław, Wyd. Ossolineum 2003.
67. **Kotarbiński T.:** *Traktat o dobrej robocie*. Wrocław, Wyd. Ossolineum 1975.
68. **Krupa M.:** *Komputerowo zintegrowane zarządzanie – wprowadzenie*. Rzeszów, University of Information Technology and Management 2003.
69. **Krzyżaniak S.:** *Podstawy zarządzania zapasami w przykładach*. Poznań, Biblioteka Logistyka 2005.

70. **Krzywka A.**: *Informacja-wiedza-mądrość*. Edukacja i Dialog, Nr 2 (165). [www.vulcan.edu.pl/eid/archiwum/2005/02/informacja.html](http://www.vulcan.edu.pl/eid/archiwum/2005/02/informacja.html) [dostęp 09.2008].
71. **Kurowski W.**: *Podstawy diagnostyki systemów technicznych. Metodologia i metodyka*. Warszawa-Płock, Wyd. ITE- PIB 2008.
72. **Latzko W.J., Saunders D.M.**: *Cztery dni z dr Demingiem. Nowoczesna teoria zarządzania*. Warszawa, Wyd. WNT 1998.
73. **Langlois-Berthelot R.**: *Trwałość, niezawodność, funkcjonalność wyrobów przemysłowych*. Warszawa. Wyd. WNT 1972.
74. **Legutko S.**: *Podstawy eksploatacji maszyn*. Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej 1999.
75. **Legutko S.**: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Warszawa, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne 2004.
76. **Legutko S.**: *Trendy rozwoju utrzymania ruchu urządzeń i maszyn*. Eksploatacja i Niezawodność, Nr 2/2009, s. 8-16.
77. **Leon J., Frackiewicz J.**: *Systemy sprawnego działania*. Warszawa, Wyd. Antyk 2000.
78. **Leszek W.**: *Metodologiczne podstawy badań trybologicznych*. Warszawa, Wyd. PWN 1981.
79. **Łopuszański B., Okreglicki W.**: *Użytkowanie urządzeń mechanicznych*. Warszawa, Wyd. WNT 1980.
80. **Łuczak A., Mazur T.**: *Fizyczne starzenie elementów maszyn*. Warszawa, Wyd. WNT 1981.
81. **Macha E.**: *Niezawodność maszyn*. Opole, Wyd. Politechniki Opolskiej, Skrypt Nr 237 (wyd. elektroniczne) 2001.
82. **Magnuszewski P.**: *Myslenie systemowe*. Zielone Brygady. Pismo Ekologów, Nr 12(233)/2007.
83. **Majewski J.**: *Informatyka dla logistyki*. Poznań, Biblioteka Logistyka 2006.
84. **Majka W.**: *Poprawnie smarować i diagnozować, czy przedwcześnie remontować*. Szczyrk, Ref. na konf. N-T, Udział chemii energetycznej we wzroście efektywności urządzeń, 24-26.05. 2006.
85. **Maksymiuk J.**: *Niezawodność maszyn i urządzeń elektrycznych*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2003.
86. **Małek A.**: *Optymalizacja zapasów części zamiennych w celu zapewnienia ekonomicznej eksploatacji maszyn i urządzeń*. Warszawa, Wyd. WAP 1976.
87. **Mazur T., Małek J.**: *Zarządzanie eksploatacją systemów technicznych*. Wyd. WNT, Warszawa 1979.
88. **Mazur M.**: *Cybernetyka i charakter*. Warszawa, Wyd. PIW 1976.

89. **Mazur M.:** *Pojęcie systemu i rygory jego stosowania.* Postępy cybernetyki, Z.2, 1987, s. 21-29.
90. *Metody analizy bezpieczeństwa systemów komputerowych czasu rzeczywistego.* <http://docs.google.com/gview?a> [dostęp 30.08.2009].
91. **Mikler J.:** *Jak usprawnić proces utrzymania ruchu?.* <http://www.it-expert.com.pl/jakusprawnic.html> [dostęp 07. 2009].
92. **Mikler J.:** *Strategie utrzymania ruchu – przegląd i analiza.* Seminarium Protech, Warszawa. <http://www.it-expert.com.pl/bazawiedzy.html> [dostęp 08. 2009].
93. **Mises L.:** *Ludzkie działanie – traktat o ekonomii.* Warszawa, Wyd. Fundacja Instytutu von Misesa 2007.
94. **Moczulski W.:** *Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy.* Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej 2002.
95. **Monieta J., Towiański P.:** *Badania zdarzeń niepożądanych systemu antropo-technicznego siłowni okrętowych.* Szczecin, ZN Akademii Morskiej, Nr 10(82), 2006, s.319-328.
96. **Mudyń K.:** *Zdarza się, że myślimy.* Kraków, Wyd. Profesjonalnej Szkoły Biznesu 1997.
97. **Napiórkowski J.:** *Wycena maszyn i urządzeń.* [dostęp 09.2009]. <http://www2.wpia.uw.edu.pl/>
98. **Niziński S., Michalski R.:** *Utrzymanie pojazdów i maszyn.* Radom, Wyd. ITE-PIB 2007.
99. **Nowakowski T.:** *Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych.* Rozprawa habilitacyjna, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej 1999.
100. **Olearczuk E.:** *Zakres pojęciowy, problemowy i aplikacyjny eksploatacji w gospodarowaniu nieruchomościami.* Warszawa, Konf. N-T „Eksploatacja budynków i urządzeń technicznych w gospodarowaniu nieruchomościami, Wyższa Szkoła Gospodarowania Nieruchomościami”, 17 marca 2005.
101. **Oprzędkiewicz J.:** *Komputerowa technologia jakości i niezawodności samochodów.* <http://riad.usk.pk.edu.pl/~janoprze/KTJiNS.htm> [dostęp 11.2009].
102. **Oprzędkiewicz J.:** *Podstawy niezawodności obrabiarek i systemów produkcyjnych.* Warszawa, Wyd. WNT 1989.
103. **Osiński Z., Wróbel J.:** *Teoria konstrukcji.* Warszawa, Wyd. PWN 1995.
104. **Ossimitz G.:** *The Development of Systems Thinking Skills Using Systems Dynamics Modeling Tools.* [dostęp 05. 2003] [http://www.uniklau.ac.at./users/gossmi/sdyn/gdm\\_eng.htm](http://www.uniklau.ac.at./users/gossmi/sdyn/gdm_eng.htm)

105. **Oziemski S.:** *Efektywność eksploatacji maszyn. Postawy techniczno-ekonomiczne.* Radom, Wyd. ITE- PIB 1999.
106. **Ożadowicz A.** (red.): *Praktyczne działania w zakresie profilaktyki i utrzymania ruchu.* Utrzymanie Ruchu, Nr 9/2006 [dostęp 06.2009] <http://www.utzymanieruchu.pl/nc/menu-gorne/arttykul/>
107. **Pabis S.:** *Metodologia Nauk Empirycznych.* Koszalin, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2009.
108. **Penc J.:** *Decyzje w zarządzaniu.* Kraków, Wyd. Profesjonalnej Szkoły Biznesu 1996.
109. **Piasecki S.:** *Elementy teorii niezawodności i eksploatacji obiektów o elementach wielostanowych dla inżynierów.* Warszawa, Wyd. Instytutu Badań Systemowych PAN 1995.
110. **Piasecki S.:** *Struktura problemowa nauk o eksploatacji obiektów technicznych.* Eksploatacja i niezawodność, Nr 3/1999, s. 5-15.
111. **Pietrzyk A., Uhl T.:** *Integracja niezawodności i diagnostyki.* Czasopismo Diagnostyka, Nr 35/2005, s. 85-88.
112. **Pihowicz W.:** *Inżynieria bezpieczeństwa technicznego – problematyka podstawowa.* Warszawa, Wyd. WNT 2008.
113. **Piotrowski J.:** *Teoria pomiarów.* Warszawa, Wyd. PWN 1986.
114. **Plizga K.:** *Model symulacyjny sygnału diagnostycznego.* <http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/Motrol10b/Plizga.pdf> [dostęp 11.2009].
115. **Pogorzelski W.:** *Inżynieria badań systemowych-Prolegema.* Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1999.
116. **Pszczolowski T.:** *Mala encyklopedia prakseologii i teorii organizacji.* Wrocław, Wyd. Ossolineum 1978.
117. **Radkowski S.:** *Podstawy bezpiecznej techniki.* Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2003.
118. **Ratajczak Z.:** *Niezawodność człowieka w pracy.* Warszawa, Wyd. PWN 1988.
119. **Robertson J., Robertson S.:** *Pełna analiza systemowa.* Warszawa, Wyd. WNT 1999.
120. **Rutkowski T.:** *Teoria niezawodności i bezpieczeństwa.* Preskrypt Politechniki Warszawskiej, <http://www.it.pw.edu.pl/~tru/Wyklad05.pdf>. [dostęp 06.2009].
121. **Rączkowski B.:** *BHP w praktyce.* Białystok, Wyd. Impuls 2009.
122. **Rączkowski B.:** *Szkolenie wstępne. Instruktaż stanowiskowy – typowe zagrożenia dla stanowisk pracy.* Gdańsk, Wyd. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr Sp.oo 2006.
123. **Sadowski W. M.:** *Podstawy ogólnej teorii systemów.* Warszawa, Wyd. PWN 1978.

124. **Sarker R., Haque A.:** *Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation.* Applied Mathematical Modelling Nr 24/2000.
125. **Sariusz-Wolski Z.:** *Sterowanie zapasami w przedsiębiorstwie.* Warszawa, Wyd. PWE 2000.
126. **Sienkiewicz P.:** *Geneza i rozwój koncepcji holistycznych i systemowych we współczesnej nauce.* Zeszyty Naukowe AON, Nr 1(50)2003.
127. **Sikora M.:** *Optymalizacja rozwiązań konstrukcyjnych na przykładzie przekładni pasowej.* [dostęp 05. 2009] <http://www.oeiizk.edu.pl/zawodowe/sikora/pasy/opt.htm>
128. **Siluszek A.:** *Outsourcing a koszt.* <http://www.komputerwfirmie.pl> [dostęp 02.2009].
129. **Skowronek Cz., Sariusz-Wolski Z.:** *Logistyka w przedsiębiorstwie.* Warszawa, Wyd. PWE 2003.
130. **Słowiński B.:** *Ćwiczenia z eksploatacji.* wyd. 3, Koszalin, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2001.
131. **Słowiński B.:** *Forecasting the Reliability of Automated Grinding Systems on the Basis of Young's Modulus of Grinding Wheels.* JSME International Journal Tokyo, Japan, series C, vol.49, nr 2/2006, p.612-617.
132. **Słowiński B.:** *Systemowa ocena jakości ściernic ceramicznych.* Koszalin, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2004.
133. **Słowiński B.:** *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych.* Wyd. 4, Koszalin, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2002.
134. **Słowiński B.:** *Podstawy sprawnego działania.* Koszalin, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2008.
135. **Słowiński B.:** *Inżynieria zarządzania procesami logistycznymi.* Koszalin, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2009.
136. **Słowiński B.:** *Wprowadzenie do logistyki.* Koszalin, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2008.
137. **Słowiński B.:** *Wprowadzenie do nauki o technice.* Koszalin, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2007.
138. **Smalko Z.:** *Metody eksploatacji badań niezawodności i trwałości maszyn urządzeń mechanicznych.* Cz. II Warszawa, Wyd. IMER 1968.
139. **Smalko Z.:** *Podstawy projektowania niezawodnych maszyn i urządzeń mechanicznych.* Warszawa, Wyd. PWN 1972.
140. **Soroczyński B.:** *Wprowadzenie do metodyki wdrażania systemów klasy CMMS.* „Inżynieria i Utrzymanie Ruchu”, Nr 07/2005.

- <http://www.utrzymanieruchu.pl/menu-gorne/czasopismo/archiwum/lipiec-2005/>. [dostęp 06. 20009].
141. **Szadziul R.**: *Studium eksploatacji maszyn*. Koszalin, Wyd. Politechniki Koszalińskiej 2006.
  142. **Szadziul R., Słowiński B.**: *Kierowanie systemem eksploatacji*. Koszalin, ZN Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, Nr 40/2007, s. 257-263.
  143. **Szadziul R., Słowiński B.**: *Miejsce diagnostyki w cyklu życia obiektu technicznego*. Szczecin, ZN WM Politechniki Szczecińskiej: „Eksploatacja silników samochodowych”, Nr 16/2007, s. 97-107.
  144. **Szadziul R., Słowiński B.**: *Organizacja obsługi sprzętowo-transportowych w dużych przedsiębiorstwach z kapitałem polskim*. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Transport XXI wieku”, Warszawa Stare Jabłonki, 18-21.09.2007.
  145. **Szopa T.**: *Niezawodność i bezpieczeństwo*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2009.
  146. **Szybka J.**: *Prognozowanie niezawodności urządzeń mechanicznych funkcjonujących w układach z rezerwą*. Kraków, Wyd. AGH, z 34. 1996.
  147. **Szymczak M.**: *Słownik Języka Polskiego*. Warszawa, Wyd. PWN 1978.
  148. **Ślipek Z., Frączek J., Cieślukowski B.**: *Specyfikacja ogólnych wymagań projektowych dla maszyn rolniczych*. Inżynieria Rolnicza, Nr 9 (107) 2008.
  149. **Tarnowski W.**: *Modelowanie systemów*. Koszalin, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2004.
  150. **Tomczyk Z.** (red.): *Podstawowe problemy zarządzania systemem utrzymania ruchu maszyn i urządzeń*. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej 1980.
  151. **Tworkowski K, Hanc A., Uhl T.**: *Technologie bezprzewodowe w systemach monitorowania mostów*. Mosty, Nr 3, 7-9, 2008, s. 26-36.
  152. **Tyszner J.**: *Symulacja cyfrowa*. Warszawa, Wyd. WNT 1990.
  153. **Weinberg G. M.**: *Myślenie systemowe*. Warszawa, Wyd. WNT 1979.
  154. Wolna Encyklopedia Wikipedia
  155. **Wrona R.**: *Zużycie ekonomiczne maszyn i inwestycje modernizacyjne*. Biuletyn konferencyjny P.P.P. „Technical”, 2002, s. 40-47.
  156. **Zeliaś A.**: *Teoria prognozy*. Warszawa, Wyd. PWE 1997.
  157. **Zmysłowski A. J.**: *Ontologiczne uwarunkowania nauki*. [http://www.woiz.polsl.pl/zmyslo/Ontologiczne\\_uwarunkowania\\_nauki](http://www.woiz.polsl.pl/zmyslo/Ontologiczne_uwarunkowania_nauki). [dostęp 3.2010].



158. **Żółtowski B.:** *Identyfikacja a diagnostyka*. Zeszyty Naukowe 5(77) Akademii Morskiej w Szczecinie, 2005, s. 499-510.
159. **Żółtowski B.:** *Podstawy diagnostyki maszyn*. Bydgoszcz, Wyd. Uczelniane ATR 1996.
160. **Żółtowski B.:** *Wybrane problemy diagnozowania maszyn*. Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów Diag' 2003, V Krajowa Konferencja, 13-17.10.2003, Ustroń, Biuletyn WAT, 2004, Vol. 53, Nr 7, s. 81-95.
161. **Żółtowski B., Cempel Cz.:** *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Warszawa, Bydgoszcz, Radom, Wyd. ITE- PIB 2004.
162. **Żółtowski B., Ćwik Z.:** *Leksykon diagnostyki technicznej*. Bydgoszcz, Wyd. Uczelniane ATR 1996.
163. **Żółtowski J.:** *Wybrane zagadnienia z podstaw konstrukcji i niezawodności maszyn*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.
164. **Żuk T.:** *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej 1984.

# LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA – ZALECANA DO POGŁĘBIENIA ZAGADNIEŃ Z WYKŁADU

## 1. Problematyka eksploatacji

- Legutko S.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Warszawa, Wyd. WSiP 2004.
- Oziemski S.: *Efektywność eksploatacji maszyn. Podstawy techniczno-ekonomiczne*. Radom, Wyd. ITE-BIP 1999.
- Słowiński B.: *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*. Koszalin, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Wyd. 4, 2002.

## 2. Działanie ze środkiem technicznym

- Dietrych J.: *System i konstrukcja*. Warszawa, Wyd. WNT 1985.
- Niziński S., Michalski R.: *Utrzymanie pojazdów i maszyn*. Radom, Wyd. ITE-PIB 2007.
- Oziemski S.: *Efektywność eksploatacji maszyn. Podstawy techniczno-ekonomiczne*. Radom, Wyd. ITE-BIP 1999.

## 3. Systemowe ujęcie eksploatacji

- Downarowicz O.: *Podstawy inżynierii eksploatacji środków technicznych*. Gdańsk, Wyd. Politechniki Gdańskiej 1987.
- Mazur M.: *Cybernetyka i charakter*. Warszawa, Wyd. PIW 1976.
- Niziński S., Michalski R. (red.): *Utrzymanie pojazdów i maszyn*. Radom, Wyd. ITE-PIB 2007.

## 4. Utrzymanie ruchu maszyn

- Kaźmierczak J.: *Eksploatacja systemów technicznych*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej 2000.
- Legutko S.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Warszawa, Wyd. WSiP 2004.
- Niziński S., Michalski R. (red.): *Utrzymanie pojazdów i maszyn*. Radom, Wyd. ITE-PIB 2007.

## 5. Trwałość i zużycie maszyn

- Legutko S.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Warszawa, Wyd. WSiP 2004.
- Łuczak A., Mazur T.: *Fizyczne starzenie elementów maszyn*, Warszawa, Wyd. WNT 1981.
- Żuk T.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*, Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej 1984.

## 6. Elementy diagnostyki maszyn

- Kaźmierczak J.: *Eksploatacja systemów technicznych*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej 2000.
- Kurowski W.: *Podstawy diagnostyki systemów technicznych. Metodologia i metodyka*. Warszawa-Płock, Wyd. ITE-PIB, 2008.
- Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*, Bydgoszcz, Wyd. ATR 1996.

## 7. Podstawy badań eksploatacyjnych

- Jaworski J., Morawski R., Olędzki J.: *Wstęp do metrologii i techniki eksperymentu*. Warszawa, Wyd. WNT 1992.
- Kurowski W.: *Podstawy diagnostyki systemów technicznych. Metodologia i metodyka*. Radom, Wyd. ITE-PIB 2008.
- Moczulski W.A.: *Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej 2002.
- Słowiński B.: *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*. Koszalin, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Wyd. 4, 2002.
- Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*. Bydgoszcz, Wyd. ATR 1996.

## 8. Elementy teorii niezawodności

- Bucior J.: *Podstawy teorii i inżynierii niezawodności*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
- Słowiński B.: *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*. Koszalin, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Wyd. 4, 2002.
- Szopa T.: *Niezawodność i bezpieczeństwo*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2009.
- Żółtowski J.: *Wybrane zagadnienia z podstaw konstrukcji i niezawodności maszyn*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.

## 9. Prognozowanie niezawodności

- Bucior J.: *Podstawy teorii i inżynierii niezawodności*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
- Kaźmierczak J.: *Eksploatacja systemów technicznych*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej 2000.
- Słowiński B.: *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*. Koszalin, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Wyd. 4, 2002.
- Żółtowski J.: *Wybrane zagadnienia z podstaw konstrukcji i niezawodności maszyn*. Warszawa, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 2004.

## 10. niezawodność układu złożonego

- Bucior J.: *Podstawy teorii i inżynierii niezawodności*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
- Macha E.: *Niezawodność maszyn*. Opole, Wyd. Politechniki Opolskiej, Skrypt Nr 237/2001 (wyd. elektroniczne).
- Słowiński B.: *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*. Koszalin, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Wyd. 4, 2002.
- Żółtowski J.: *Wybrane zagadnienia z podstaw konstrukcji i niezawodności maszyn*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.

## 11. Człowiek w systemie eksploatacji

- Bucior J.: *Podstawy teorii i inżynierii niezawodności*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
- Pihowicz W.: *Inżynieria bezpieczeństwa technicznego – problematyka podstawowa*. Warszawa, Wyd. WNT 2008.
- Radkowski S.: *Podstawy bezpiecznej techniki*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2003.

## 12. Metody poprawy niezawodności maszyn

- Oprzędkiewicz J.: *Podstawy niezawodności obrabiarek i systemów produkcyjnych*, Warszawa, Wyd. WNT 1989.
- Słowiński B.: *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*. Koszalin, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Wyd. 4, 2002.
- Smalko Z.: *Podstawy projektowania niezawodnych maszyn i urządzeń mechanicznych*, Warszawa, Wyd. PWN 1972.

## 13. Procesy obsługi technicznej

- Hebda M., Mazur T., Pelc H.: *Teoria eksploatacji pojazdów*, Warszawa, Wyd. Komunikacji i Łączności 1978.
- Kaźmierczak J.: *Eksploatacja systemów technicznych*, Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej 2000.
- Niziński S., Michalski R.: *Utrzymanie pojazdów i maszyn*, Radom, Wyd. ITE-PIB 2007.

## 14. Zaopatrywanie eksploatacyjne

- Krzyżaniak S.: *Podstawy zarządzania zapasami w przykładach*. Poznań, Biblioteka Logistyka 2005.
- Sariusz-Wolski Z.: *Strategia zarządzania zaopatrzeniem*. Warszawa, Agencja Wydawnicza Placet 1998.
- Sariusz-Wolski Z.: *Sterowanie zapasami w przedsiębiorstwie*. Warszawa, Wyd. PWE 2000.



# ZAŁĄCZNIK

Zał. 1. *Wartości dystrybuanty F (t) rozkładu normalnego* [5]

<b>u</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>
<b>0,00</b>	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
<b>0,10</b>	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
<b>0,20</b>	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
<b>0,30</b>	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
<b>0,40</b>	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
<b>0,50</b>	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
<b>0,60</b>	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
<b>0,70</b>	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
<b>0,80</b>	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
<b>0,90</b>	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
<b>1,00</b>	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
<b>1,10</b>	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
<b>1,20</b>	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
<b>1,30</b>	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
<b>1,40</b>	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
<b>1,50</b>	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
<b>1,60</b>	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
<b>1,70</b>	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
<b>1,80</b>	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
<b>1,90</b>	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
<b>2,00</b>	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
<b>2,10</b>	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
<b>2,20</b>	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
<b>2,30</b>	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
<b>2,40</b>	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
<b>2,50</b>	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
<b>2,60</b>	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
<b>2,70</b>	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
<b>2,80</b>	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
<b>2,90</b>	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
<b>3,00</b>	0,998	0,99869	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9990

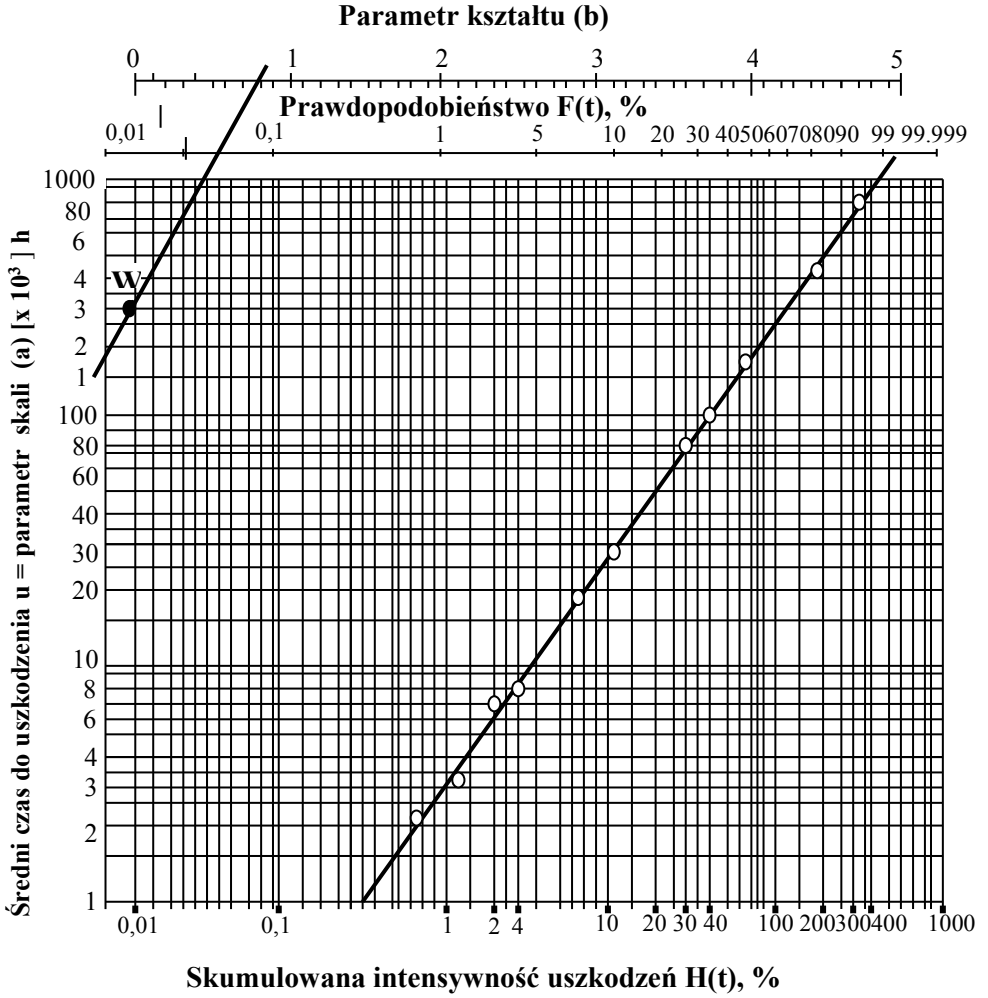
Uwaga: Ponieważ rozkład normalny jest rozkładem symetrycznym, to w przypadku wartości  $u$  o znaku ujemnym należy zastosować wzór:

$$(-u) = 1 - u$$

Przykładowo:

dla wartości  $u = -1,55$  z tablicy  $u = 0,9394$ , stąd  $(-u) = 1 - 0,9394 = 0,0606$ .

Zał. 2. Nomogram rozkładu Weibulla [133]



Zał. 3. Wartości krytyczne  $\eta_g$  dla testu Grebbsa [133]

$n$	$q = 0,05$	$q = 0,02$	$q = 0,01$	$q = 0,001$
2	15,561	68,973	77,964	777,686
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	3,789
27	2,094	2,524	2,830	3,775
28	2,088	2,517	2,820	3,773
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	2,362	2,576	3,291

$q$  – założona wartość dopuszczalnego błędu,

$n$  – liczność próbki.