

Marek Młyńczak

**Metodyka badań eksploatacyjnych  
obiektów mechanicznych**



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej  
Wrocław 2012

Recenzenci  
Tomasz NOWAKOWSKI  
Jan SZYBKA

Opracowanie redakcyjne i korekta  
Alina KACZAK

Projekt okładki  
Marcin ZAWADZKI

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>  
e-mail: [oficwyd@pwr.wroc.pl](mailto:oficwyd@pwr.wroc.pl)  
[zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl](mailto:zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl)

ISBN 978-83-7493-683-5

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 546/2012.

## Spis treści

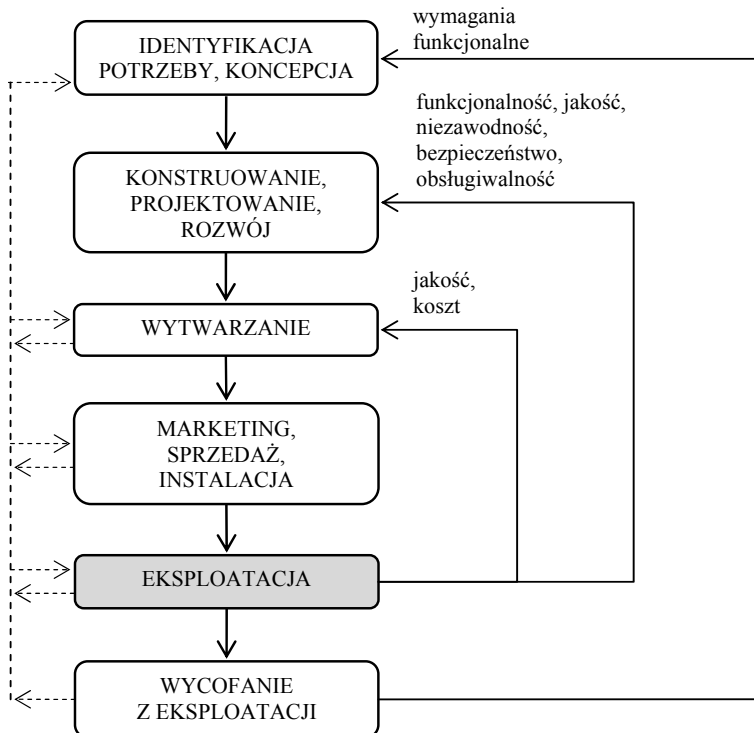
1. Wprowadzenie.....	5
1.1. Geneza zagadnienia .....	5
1.2. Cel pracy.....	10
1.3. Zakres pracy .....	13
2. Analiza problematyki badań eksploatacyjnych .....	15
2.1. Rys historyczny systemów badań eksploatacyjnych .....	15
2.2. Ważniejsze polskie systemy badań eksploatacyjnych .....	21
2.3. Analiza systemów badań .....	24
2.4. Ocena efektywności badań eksploatacyjnych.....	26
2.4.1. Ocena skuteczności informacyjnej badań.....	26
2.4.2. Ocena ekonomiczności.....	27
2.4.3. Ocena efektywności .....	29
3. Metodyka badań eksploatacyjnych .....	33
3.1. Założenia metodyki badań.....	33
3.2. Charakterystyka metod cząstkowych.....	36
3.2.1. Cel badań – <i>CBE</i> .....	37
3.2.2. Sytuacja eksploatacyjna obiektu mechanicznego – <i>SEOM</i> .....	38
3.2.3. Model badawczy – <i>MOD</i> .....	38
3.2.4. Moduł badawczy – <i>MBE</i> .....	39
3.3. Opis metod składowych metodyki badań.....	39
3.3.1. Metoda opracowania akceptowalnego celu badawczego – <i>CBE</i> .....	39
3.3.2. Metoda identyfikacji sytuacji eksploatacyjnej obiektu mechanicznego – <i>SEOM</i> .....	41
3.4. Metoda opracowania modelu badawczego – <i>MOD</i> .....	46
3.4.1. Model sytuacji eksploatacyjnej – <i>MSEOM</i> .....	47
3.4.2. Wyniki badań – <i>RBE</i> .....	48
3.5. Metoda opracowania modułu badawczego – <i>MBE</i> .....	48
3.5.1. Metoda badawcza – <i>MET</i> .....	48
3.5.2. System badawczy – <i>SBE</i> .....	50
3.5.3. Program badawczy – <i>PBE</i> .....	51
3.5.4. Wdrożenie systemu badań – <i>WSB</i> .....	53
4. Modelowanie eksploatacji obiektów mechanicznych.....	57
4.1. Modelowanie obiektu mechanicznego w systemie i procesie eksploatacji.....	57
4.2. Identyfikacja obiektów w systemie eksploatacji.....	60
4.3. Struktura obiektu mechanicznego.....	63
4.3.1. Struktura konstrukcyjna obiektu mechanicznego .....	65
4.3.2. Struktura funkcjonalna obiektu .....	75
4.3.3. Struktura niezawodnościowa obiektu.....	80
4.3.4. Struktura bezpieczeństwa obiektu .....	82

4.4. System eksploatacji obiektu .....	92
4.4.1. Klasyczne ujęcie systemu eksploatacji .....	92
4.4.2. System eksploatacji w ujęciu obiektowym.....	97
4.5. Proces eksploatacji .....	98
4.6. Naprawa i obsługa obiektu mechanicznego.....	101
4.6.1. Uszkodzenie obiektu mechanicznego.....	101
4.6.2. Naprawa obiektu mechanicznego.....	107
5. Modelowanie danych eksploatacyjnych .....	111
5.1. Klasyfikacja danych eksploatacyjnych .....	111
5.2. Generowanie danych w eksploatacji.....	114
5.3. Niepewność danych.....	120
5.4. Przepływ danych eksploatacyjnych.....	122
5.5. Model informatyczny danych eksploatacyjnych .....	124
6. Gromadzenie i przetwarzanie danych.....	127
6.1. Gromadzenie danych eksploatacyjnych.....	127
6.1.1. Dokumentacja identyfikacyjna .....	132
6.1.2. Dokumentacja operacyjna .....	133
6.1.3. Dokumentacja zdarzeniowa.....	133
6.1.4. Baza danych eksploatacyjnych.....	134
6.2. Przetwarzanie danych.....	136
6.2.1. Model oceny eksploatacyjnej obiektu badań .....	139
6.2.2. Przykłady oceny obiektów w świetle badań własnych.....	141
6.3. Zakres wykorzystania wyników badań.....	147
6.3.1. System badań w zarządzaniu eksploatacją.....	147
6.3.2. System badań w zarządzaniu ryzykiem.....	153
6.3.3. System badań w zarządzaniu kosztami eksploatacji.....	153
7. Weryfikacja metodyki BEOM w badaniach eksploatacyjnych autobusów szynowych.....	157
7.1. Założenia budowy badań eksploatacyjnych .....	157
7.2. Cel badań autobusów szynowych.....	158
7.3. Analiza sytuacji eksploatacyjnej autobusów szynowych.....	159
7.4. Analiza dokumentacji eksploatacyjnej .....	162
7.5. Struktura bazy danych systemu wspomaganego zarządzaniem eksploatacją autobusów szynowych.....	163
7.6. Interpretacja wyników badań.....	168
8. Wnioski .....	173
Załącznik – baza pojęciowa .....	179
Z.1. Pojęcia dotyczące metodyki badań.....	179
Z.2. Pojęcia dotyczące eksploatacji i bezpieczeństwa systemów technicznych.....	182
Z.3. Pojęcia dotyczące informacji.....	185
Literatura .....	187

# 1. Wprowadzenie

## 1.1. Geneza zagadnienia

Obiekty techniczne stanowią zarówno efekt twórczy działań inżynierskich w fazie konstruowania, projektowania i wytwarzania, jak i obiekt działań w fazie eksploatacji. Cykl „życia” obiektów obejmuje sześć zasadniczych faz [122, 289], spośród których eksploatacja to zwykle około 90% czasu trwania całego cyklu od koncepcji do wycofania z eksploatacji. W całym cyklu życia zauważa się liczne sprzężenia zwrotne dotyczące przepływu informacji dla poprawy samego obiektu i procedur jego eksploatacji (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Eksploatacja w cyklu życia obiektu technicznego [122]

Obiekt w systemie eksploatacji jest przedmiotem lub pośrednikiem działania dla człowieka jako sprawcy działania (użytkownika lub obsługownika) [149, 150]. Obiekt mechaniczny to dowolne urządzenie techniczne, maszyna, pojazd, w którym zachodzą przemiany energii, materii i informacji [40, 62, 72, 112, 154, 240, 287, 292], choć w ujęciu cybernetycznym są dostrzegane przemiany tylko energii i informacji [175]. Obiekty mechaniczne są wytworem myśli inżynierskiej obejmującej projektowanie, a wytworzone, w fazie eksploatacji są także sterowane i zarządzane przez użytkownika. Podlegają ogólnym prawom fizyki, ulegają procesowi degradacji, uszkadzają się i mogą być naprawiane w skończonym cyklu „życia”. Umieszczenie wytworu technicznego w eksploatacji i jego celowe działanie pozwala na traktowanie go jako środka technicznego będącego narzędziem lub pomieszczeniem [62]. Innymi terminami, pokrewnymi obiektom mechanicznym, są: maszyny, pojazdy, urządzenia, aparaty, przyrządy, zespoły, części i detale maszynowe zróżnicowane według stopnia złożoności [240].

Obiekty mechaniczne są specyficzne w świecie techniki ze względu na ruchliwość całego obiektu bądź jego elementów. Przeznaczone są do zwielokrotniania wydajności pracy człowieka, przetwarzania energii w pracę lub odwrotnie, oraz mają zamierzoną ruchomość elementów w zależności od elementu wiodącego [292]. Trudno jest jednak wyznaczyć wyraźną granicę między narzędziem a maszyną [72, 292], nie biorąc pod uwagę innych kryteriów podziału. Kryteriami klasyfikacji obiektów technicznych i wyróżniania spośród nich obiektów mechanicznych może być: cel działania, kinematyka elementów składowych, rodzaj napędu, stopień złożoności, rodzaj procesu roboczego, sposób wytwarzania i diagnozowania [112, 292]. Maszyny dzieli się ogólnie na maszyny napędowe – silniki (przetwarzanie energii na inny rodzaj energii) oraz maszyny robocze (wykonywanie pracy mechanicznej – maszyny produkcyjne, transportowe, energetyczne). Zachodzące przemiany energetyczne oraz uczestnicząca w działaniu obiektu mechanicznego masa powodują także niepomijalne zagrożenia destrukcji dla samego obiektu, jak też dla ludzi i otoczenia systemu eksploatacji. Klasyfikacja obiektów mechanicznych, ze względu na spełnianie zamierzonego konstrukcyjnie zadania, dzieli je na obiekty wytwórcze, przetwórcze, przemieszczające i narzędzia, których użyteczne działanie przynosi wymierne (materialne) korzyści [72, 292].

Do najważniejszych właściwości obiektu mechanicznego i jego komponentów należy zaliczyć: złożoność obiektu, funkcjonalność, niezawodność, bezpieczeństwo i efektywność działania. Właściwości te wynikają z wymagań projektowych oraz wzajemnego oddziaływania na siebie elementów systemu eksploatacji, w tym również człowieka. Oddziaływania te określane jako relacje systemowe opisywane są też poprzez struktury, tj. funkcje odwzorowujące właściwości komponentów we właściwości obiektu (nadrzędnego systemu) [157].

Współczesne obiekty mechaniczne, takie jak: maszyny robocze, wytwórcze i przetwórcze, transportowe oraz pojazdy, charakteryzują się znaczną złożonością konstrukcyjną. Stawiane im wymagania eksploatacyjne są ukierunkowane natomiast na osiągnięcie gotowości, funkcjonalności, efektywności i bezpieczeństwa, przy czym dotyczy to zarówno maszyn wąsko specjalizowanych, jak i uniwersalnych. Uwzględnienie obu

podanych cech, to jest: znacznej złożoności i dużych wymagań użytkowych, inicjuje w działalności inżynierskiej nowe zadania, wyzwania i utrudnienia występujące zarówno w fazie projektowania, wytwarzania, jak i w eksploatacji [31, 221, 273, 310]. Spełnienie podanych postulatów jest realizowane często poprzez wprowadzanie różnego rodzaju nadmiarów, takich jak: funkcjonalne, parametryczne, niezawodnościowe czy bezpieczeństwa [128, 129].

Projektowanie złożonych obiektów technicznych opiera się najczęściej na doborze komponentów spełniających funkcje cząstkowe tworzące wspólnie zakładaną funkcję główną obiektu. Na tym etapie projektowania generuje się strukturę funkcjonalną, a następnie strukturę konstrukcyjną, odwzorowującą wzajemne relacje geometryczne materialnych komponentów obiektu. Dobór postaci geometrycznej i układu wymiarów oraz cech materiałowych i technologii wytwarzania kończy ten etap istnienia obiektu [29, 62, 72, 105, 240, 281, 282]. Projektowanie odbywa się ponadto w zależności od wymagań odbiorcy na zadany czas eksploatacji, określoną gotowość czy zadany koszt obiektu [21, 112].

Obliczenia konstrukcyjne obiektów są oparte na zdeterminowanym współczynniku bezpieczeństwa i coraz częściej uzupełniane o charakterystyki probabilistyczne uwzględniające losową i czasową zmienność warunków eksploatacji (obciążenia) i właściwości tworzywa obiektu (wytrzymałości) [3, 64, 105, 121, 130, 296]. Rozwój metod projektowania i komputerowego ich wspomaganie oraz świadomość istnienia losowości w systemie i procesie eksploatacji sprzyja rozwijaniu metod konsolidujących obserwacje rzeczywistości z możliwościami oferowanymi przez sprzęt i oprogramowanie komputerowe.

Prognozowanie niezawodności i bezpieczeństwa w fazie projektowania opiera się przede wszystkim na budowie modeli obiektów z wykorzystaniem banków danych o charakterze a'posteriorycznym, wiedzy ekspertowej bądź z użyciem modeli symulacyjnych [15, 63, 93, 121, 147, 148, 179, 206, 213, 216, 219, 231, 241, 316]. Modelowanie to jest jednak znacznie utrudnione, co wynika z wprowadzanych założeń i uproszczeń modelowych, a także braku jednoznacznych relacji pomiędzy cechami strukturalnymi: konstrukcyjną i funkcjonalną oraz niezawodnościową i bezpieczeństwem. Na wszystkie te cechy nakładają się ponadto wymagania minimalizacji kosztów projektowych, wytwarzania i eksploatacji [20, 21, 239].

Wytwarzanie obiektów staje coraz bardziej zintegrowane z projektowaniem przy daleko posuniętej automatyzacji obu procesów [35, 44, 183]. Komputerowe systemy wspomaganie projektowania i wytwarzania CAD/CAM zapewniają szybki i pewny przepływ informacji pozwalający na uzyskiwanie sprzężenia zwrotnego do projektowania w celu najpełniejszego spełnienia wymagań odbiorcy.

Weryfikacja właściwości niezawodnościowych i bezpieczeństwa następuje w fazie testów poligonowych i w rzeczywistej eksploatacji. Aktualne działania w obszarze bezpieczeństwa systemów technicznych ograniczają się najczęściej do retrospektywnych analiz zdarzeń niepożądanych bądź też do analizy ryzyka w początkowej fazie projektowania [117, 261]. Brak jest natomiast udokumentowanych podstaw projektowania, które stwarzałyby możliwość prognozowania skutków zawodności obiektu

technicznego jeszcze podczas fazy tworzenia projektu lub modernizowania obiektu. Integracja procesu projektowania z oceną niezawodności i bezpieczeństwa systemów maszynowych, nawet w zakresie teoretycznym, może przyczynić się do podniesienia efektywności ich wykorzystania, obniżenia kosztów eksploatacji i poprawy bezpieczeństwa. Jednakże najmniej rozpoznanym i opisanym zjawiskiem w eksploatacji obiektów technicznych jest ich zmienność obserwowana poprzez zmienność właściwości i struktur obiektu, zmienność otoczenia i zachowań człowieka w czasie i funkcji realizowanych zadań.

Podczas długotrwałej eksploatacji urządzeń mechanicznych zachodzą liczne zmiany zarówno w systemie i procesie ich eksploatacji, warunkach eksploatacji, jak i w samym obiekcie [66, 82, 106, 173, 294, 318]. Zmienność wymienionych czynników wpływa w znacznym stopniu na ocenę efektywności eksploatacji przede wszystkim poprzez zmiany funkcjonalności, niezawodności i bezpieczeństwa. Do zmian systemu eksploatacji można zaliczyć reorganizacje przedsiębiorstw, zmiany właściciela, sposobu zarządzania czy zmiany profilu działalności. Są to działania, podczas których dochodzi niejednokrotnie do przekazywania obiektów bez niezbędnej dokumentacji i wiedzy o ich stanie bieżącym. Podobne zjawiska, aczkolwiek bliższe czynnikom bezpośrednio wpływającymi na stan obiektu, obserwuje się podczas zmian procesu i warunków eksploatacji. Nadmiarowość obiektów technicznych dopuszcza w trakcie eksploatacji na pewne odstępstwa od założonych konstrukcyjnie parametrów, jednak często błędy w eksploatacji i degradacja obiektów kumulują się w strukturze ustrojów nośnych i układach napędowych. Zmiany te są początkowo mało dostrzegalne, mogą jednak po dłuższym czasie spowodować niezdatność obiektu. Tego typu zjawiska obserwuje się najczęściej w strukturze nośnej maszyn w postaci deformacji prętów czy blachownic, odkształceń, pęknięć, przemieszczeń węzłów itp. [9, 139, 151], jak również w parach kinematycznych ulegających zużyciu ciernemu zwiększającemu ruchliwość, czy odkładaniu produktów zużycia zmniejszającemu ich ruchliwość. Naprawy główne i modernizacje wykonywane w chwili osiągnięcia stanu granicznego stanowią kolejny potencjalny czynnik mogący powodować zmiany obiektu [9, 132, 214].

Przedstawione procesy eksploatacyjne w połączeniu ze zdarzeniami losowymi wynikającymi z błędów człowieka, działaniami środowiska naturalnego i otoczenia eksploatacji oraz wtórnych uszkodzeń systemu stanowią zbiór losowych czynników wpływających na efektywność eksploatacji obiektu i bezpieczeństwo [168]. Świadomość tych zjawisk jest obok metod zarządzania eksploatacją podstawową wiedzą stanowiącą podstawę podejmowania decyzji projektowych, wytwórczych i eksploatacyjnych.

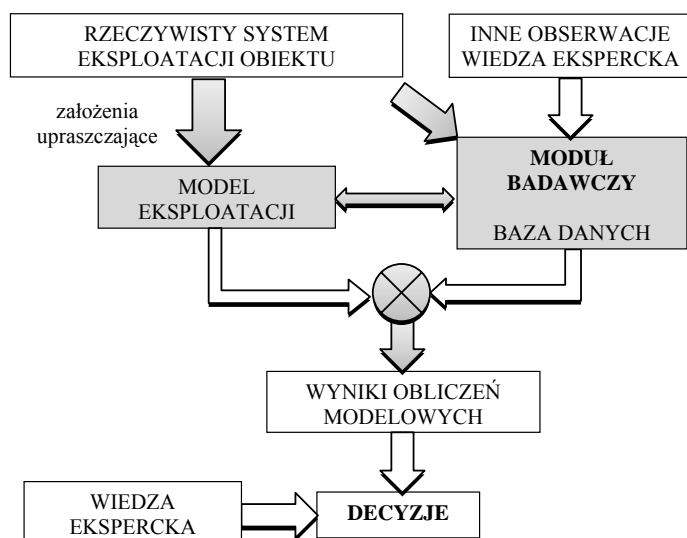
Badania eksploatacyjne, rozumiane szerzej niż wcześniej prowadzone badania ocenowe, stanowią proces ciągłej obserwacji systemu eksploatacji w celu racjonalnego nim zarządzania. Proponowana metodyka projektowania badań eksploatacyjnych umożliwia opracowanie modelu eksploatacji obiektu oraz sprzężonego z nim modułu badawczego włączanego w schemat zarządzania przedstawiony na rysunku 1.2.

Ogólne podejście do zagadnienia zarządzania eksploatacją opiera się na pięciu wskaźnikach zdolności operacyjnej systemu: jakości działania (dostarczenie dobra lub



usługi najlepiej jak to możliwe), szybkości (krótki czas dostarczenia dobra/usługi), niezawodności (zapewnienie dobra/usługi zgodnie z oczekiwaniem), elastyczności (dostosowaniu do zmiennych wymagań) i kosztu (dostarczenie dobra/usługi możliwie najtaniej) [16]. W przedstawionym podejściu brakuje natomiast wskaźnika bezpieczeństwa oznaczającego działanie ograniczające straty wywołane niespodziewanymi zdarzeniami niepożądanymi.

Obserwacje i badania eksploatacyjne dostarczające rzetelnych danych do zarządzania eksploatacją, zarządzania ryzykiem i prognozowania niezawodności były szczególnie rozpowszechnione w latach 80. XX wieku, dając w efekcie liczne banki danych: US Military Handbook 217, OREDA, francuska baza danych CNET, HRD (brytyjski Telecom), RADC (RAC), europejskie stowarzyszenie ESREDA i inne [79, 294]. Przegląd literatury, dyskusje konferencyjne w gronie specjalistów oraz obserwacje własne skłaniają do podjęcia badań w tym kierunku, zmierzając do wypracowania formalnego opisu oraz metodyki projektowania badań eksploatacyjnych.



Rys. 1.2. Schemat przepływu informacji i podejmowania decyzji w eksploatacji obiektu technicznego

Proponowana w pracy metodyka uwzględnia metody szczegółowe dotyczące: analizy i modelowania sytuacji eksploatacyjnej obiektu badań, przygotowania merytorycznego i formalnego badań, sposobów gromadzenia i przetwarzania danych oraz wdrażania i wykorzystania informacji w zarządzaniu eksploatacją i bezpieczeństwem. Podstawą opracowania warstwy modelowej i badawczej są własne doświadczenia nabyte w trakcie tworzenia i realizacji badań różnorodnych obiektów mechanicznych (maszyn i pojazdów) w rzeczywistych warunkach eksploatacji [4, 34, 83–91, 192, 196, 197, 200, 201].

Utylitarny cel pracy zawiera się w aplikacji metodyki do uruchomienia obserwowanej eksploatacji pojazdów szynowych i wykorzystaniu systemu badawczego do zarządzania eksploatacją, zwłaszcza obsługiwania oraz w zarządzaniu ryzykiem w eksploatacji pojazdów.

## 1.2. Cel pracy

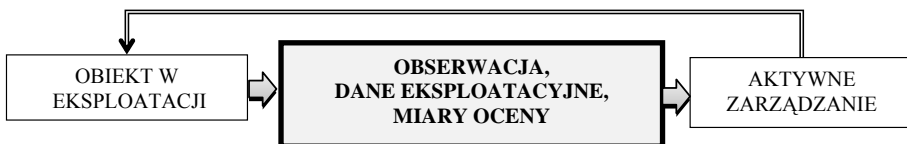
Badania eksploatacyjne są rozumiane jako zespół działań polegających na: obserwacji obiektu w naturalnych warunkach eksploatacji, pozyskiwaniu i archiwizacji danych oraz ich przetwarzaniu. Badania takie stanowią jedno z najlepszych źródeł wiedzy decyzyjnej zarówno w bieżącym zarządzaniu, jak i projektowaniu przyszłych obiektów i systemów ich eksploatacji.

Brak formalnego podejścia oraz metody tworzenia badań eksploatacyjnych skłania do podjęcia prac zmierzających do identyfikacji problemów i sformułowania zaleceń służących efektywnemu opracowaniu takich badań.

Istniejące dotychczas systemy badań eksploatacyjnych, zarówno własne, jak i przedstawiane w literaturze, ograniczały się najczęściej do wykorzystania wyników tych badań w bieżącej ocenie obiektu badań oraz w sferze projektowej w odniesieniu do obiektu, jak również systemu jego eksploatacji. Na podstawie uzyskanych miar oceny wprowadzano modernizacje układów i elementów obiektów oraz dostosowywano elementy systemu eksploatacji do lepszego wykorzystania obiektu. Wyniki badań nie znajdowały zastosowania w ciągłym, bieżącym utrzymaniu obiektów, ani w procesie zarządzania ryzykiem zaleconym w Dyrektywie Unii Europejskiej, jako procedura eksploatacyjna [69].

Celem pracy jest opracowanie metodyki badań eksploatacyjnych ukierunkowanych na wykorzystanie wyników w zarządzaniu eksploatacją, zarządzaniu ryzykiem oraz projektowaniu nowych obiektów mechanicznych. Metodyka badań eksploatacyjnych obejmuje zbiór metod analitycznych, eksperymentalnych i syntezujących opisanych w postaci algorytmicznej, których wynikiem jest model badań eksploatacyjnych (teoretyczne podstawy badań eksploatacyjnych) i moduł badań eksploatacyjnych (praktyczny opis sposobu realizacji badań) umożliwiające na wdrożenie systemu badawczego.

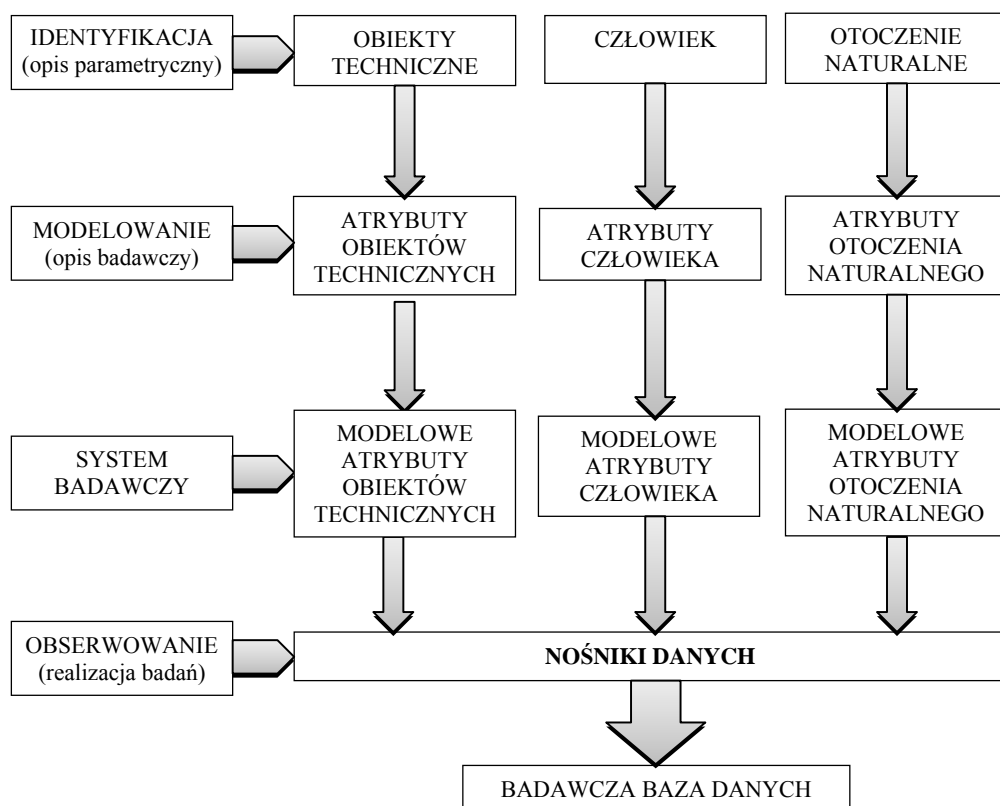
Miejsce badań w pętli kierowania eksploatacją, której dotyczy metodyka, pokazano na rys. 1.3. Pokazano przepływ informacji od ich źródła, czyli obiektu w eksploatacji, poprzez system badań eksploatacyjnych, obejmujący metody pozyskiwania danych, ich



Rys. 1.3. Badania eksploatacyjne w pętli kierowania eksploatacją

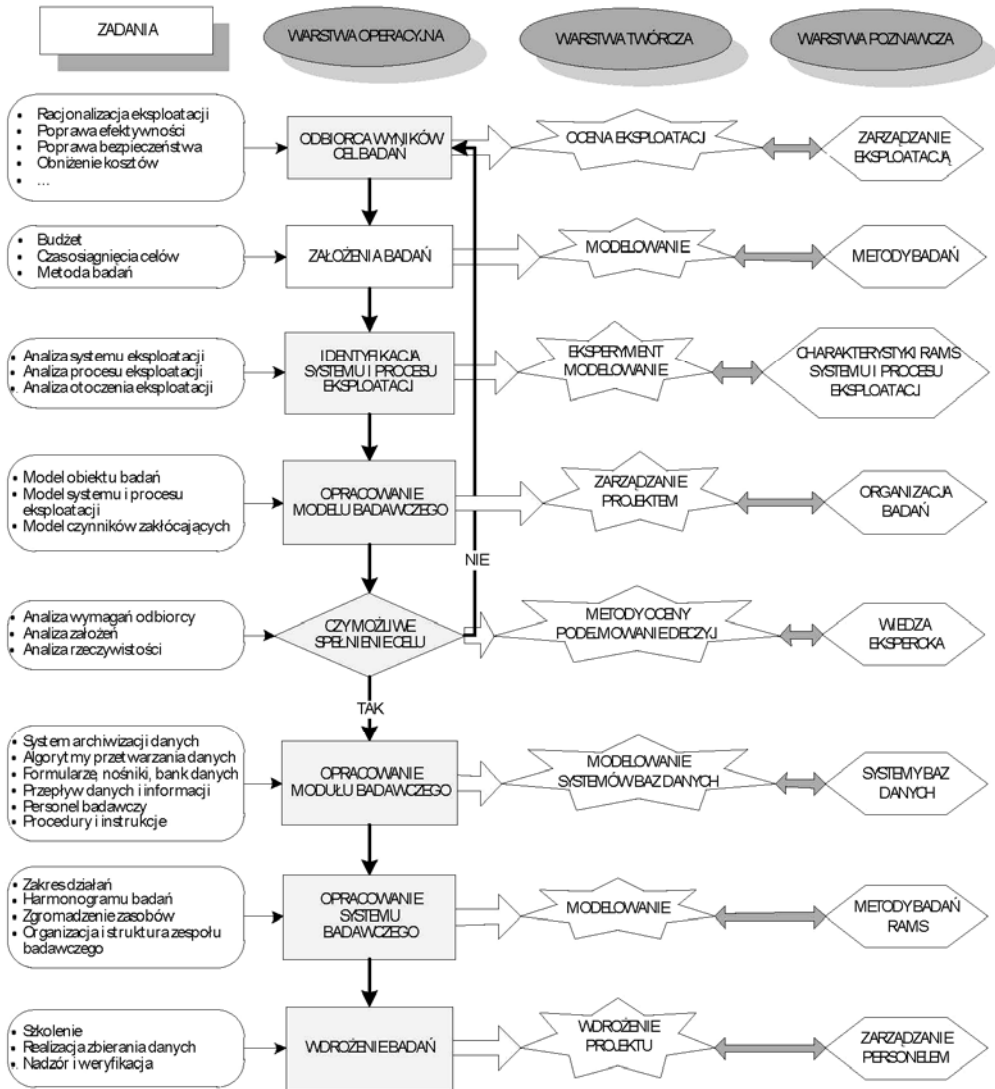
archiwizacji i przetwarzania, aż po element decyzyjny zarządzania sprzężony zwrotnie z eksploatacją obiektu. Realizacja badań dostarcza danych do wyznaczania miar oceny w uzyskiwaniu pożądaných efektów działania obiektu badań, zarówno w bieżącym kierowaniu eksploatacją, jak i długookresowym ustalaniu strategii eksploatacji.

Koncepcja projektowania badań eksploatacyjnych zasada się na obiektowym, wielowarstwowym podejściu do obserwowania obiektu. Wyróżnia się tu warstwę analityczną (identyfikacja obiektów wymagających analizy), koncepcyjną (modelowanie obiektów i ich atrybutów, tworzenie bazy danych i systemu bazy danych), realizacyjną (ciągła obserwacja i gromadzenie danych) oraz warstwę ocenową (przetwarzanie danych do wykorzystania miar oceny w zarządzaniu eksploatacją i ryzykiem eksploatacyjnym) (rys. 1.4).



Rys. 1.4. Schematyczny zakres pracy obejmujący modelowanie obiektu badań i tworzenie eksploatacyjnej bazy danych

Opracowanie badań eksploatacyjnych realizowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji (bez intensyfikacji czynników wymuszających) obejmuje siedem etapów działań przedstawionych na rysunku 1.5.



Rys. 1.5. Schemat opracowania badań eksploatacyjnych

Tok postępowania projektowego zawiera się w warstwach operacyjnych, które bardziej szczegółowo opisane są przez konieczne do wykonania zadania. Wiedza twórcza i poznawcza jest zarówno źródłem opracowywanych metod działania, jak i może być potencjalnie zasilana innowacyjnym podejściem do projektowania badań.

Zaletą proponowanej metodyki jest systemowe i modelowe ujęcie problemu projektowania badań eksploatacyjnych, opracowanie formalnego modelu badań, wskazanie zakresu badań dostosowanego do celu badań oraz włączenie do problematyki badawczej zagadnienia bezpieczeństwa. Szczególny nacisk położono na systemową analizę eksploatacji i obiektu badań. Przedstawiono nowatorskie ujęcie struktur obiektu po-

zwalające na bardziej szczegółową analizę związków przyczynowo-skutkowych w analizie niezawodności i ryzyka w systemach technicznych. Metodyka oparta jest na źródłach literatury światowej i krajowej, a przede wszystkim na własnych doświadczeniach badawczych.

Proces zarządzania eksploatacją obejmuje zbieranie, przechowywanie i przetwarzane danych w celu ich wykorzystania w planowaniu i realizacji eksploatacji. Proces zarządzania jest procesem równoległym z procesem eksploatacji w procesie operacyjnym [178, 235]. Informacje uzyskane z procesu eksploatacji na podstawie przedstawionej metodologii wspierają merytorycznie proces decyzyjny.

### 1.3. Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje:

- dyskusję dotyczącą zakresu i struktury metod projektowania i prowadzenia badań eksploatacyjnych,
- sformułowanie założeń metodyki badań eksploatacyjnych,
- modelowanie eksploatacji obiektu badań w jego systemie eksploatacji z uwzględnieniem zasobów ludzkich, technicznych i otoczenia naturalnego,
- opracowanie modeli obiektów, zjawisk i relacji w eksploatacji obiektu badań,
- opracowanie założeń modelu bazy danych do wspierania zarządzaniem eksploatacją i bezpieczeństwem,
- weryfikację metodyki na przykładzie wdrożenia systemu badań do rzeczywistego systemu eksploatacji.

Badania eksploatacyjne obiektów mechanicznych w rzeczywistych systemach eksploatacji są przedsięwzięciem realizowanym zwykle w długim okresie, wymagającymi znacznych zasobów ludzkich i finansowych. Faza ich przygotowania odgrywa największą rolę w uzyskaniu oczekiwanych wyników. W kolejnych rozdziałach pracy analizowane są problemy związane z właściwym rozpoznanie eksploatacji i dopasowania do rzeczywistych warunków właściwych metod i narzędzi realizacyjnych. Omawiane są poszczególne fazy tworzenia systemu badań eksploatacyjnych wymagające wykonania analiz i syntez modelujących obiekt w eksploatacji.

Wprowadzenie do tematu pracy, a także cel i program pracy zawarto w rozdziale 1.

W rozdziale 2 przedstawiono rozwój wiedzy o badaniu niezawodności i bezpieczeństwa w technice w ostatnim półwieczu. Zestawiono najważniejsze projekty badawcze zrealizowane w tym zakresie, zwracając uwagę szczególnie na obiekty mechaniczne. Pokazano osiągnięcia zespołów badawczych w Polsce oraz w Politechnice Wrocławskiej z udziałem autora. Przeanalizowano i zestawiono główne problemy wynikające z dotychczasowych doświadczeń. W rozdziale tym przedstawiono koncepcję sposobu oceny efektywności metodyki w rzeczywistych systemach eksploatacji opartą na kompleksowym wskaźniku *CEM*.

Rozdział 3 stanowi formalną syntezę metod składających się na całościową metodykę projektowania badań eksploatacyjnych. Przedstawiono koncepcję metody projek-

towania badań eksploatacyjnych obejmującą: systemową analizę obiektu badań i jego sytuacji eksploatacyjnej, charakterystykę modelu obiektu w eksploatacji, metodę budowania badań, systemu gromadzenia i przetwarzania danych oraz sposobu wspierania zarządzania eksploatacją informacjami z bieżących i historycznych obserwacji. Metodyka oparta jest na współczesnym ujęciu zjawisk zachodzących w eksploatacji i bezpieczeństwie systemów mechanicznych oraz na doświadczeniu i dorobku autora, jako członka zespołu zajmującego się tematyką badań eksploatacyjnych oraz kierownika projektów badawczych w tym zakresie.

Opis najważniejszych metod dotyczących: modelowania systemów i zjawisk zachodzących w eksploatacji oraz analizy systemowej obserwowanych obiektów podano w rozdziale 4. Najważniejsze zagadnienia poruszane w tym obszarze to: systemowe podejście do eksploatacji obiektów mechanicznych, pojęcie zdarzeń i danych eksploatacyjnych, generowanie danych, ich wiarygodność, sposób gromadzenia i kierunki przetwarzania. **Istotnym elementem pracy jest opracowanie metody modelowania rozwijającej się struktury konstrukcyjnej obiektu w obserwacjach eksploatacyjnych.** Każdy obszar modelowania scharakteryzowany jest przeglądem aktualnych metod postępowania, zawiera formalny model zagadnienia i przykłady z rzeczywistych badań i analiz.

W rozdziale 5 przeanalizowano metodę modelowania danych eksploatacyjnych w tworzeniu bazy danych. Przedstawiono tu źródła danych eksploatacyjnych oraz koncepcję bazy danych w badaniach eksploatacyjnych obiektów mechanicznych ukierunkowaną na wyznaczanie miar oceny w zarządzaniu eksploatacją.

Przetwarzanie danych odpowiadających przyjętym obszarom obserwacji zawiera rozdział 6. Zakres przetwarzania danych obejmuje opis miar oceny punktowych i porządkowych, prostych i złożonych wskaźników, charakterystyk statystycznych oraz analizę niepewności danych wspomagających podejmowanie decyzji eksploatacyjnych.

Weryfikację metodyki pokazującą wariantowość postępowania w budowie i prowadzeniu badań eksploatacyjnych autobusów szynowych przedstawiono w rozdziale 7.

W końcowym podsumowaniu, w rozdziale 8, zestawiono wnioski wynikające z opracowanej metodologii oraz kierunki dalszych działań w obszarze badań eksploatacji i bezpieczeństwa obiektów mechanicznych. Zakres prac prowadzący do zbudowania badań eksploatacyjnych oraz jego efekty są w końcowej części podsumowującej zestawione w postaci zwięzłych akapitów algorytmizujących zadania i efekty.

W załączniku podano wykaz najważniejszych pojęć wykorzystanych w treści pracy.

## **2. Analiza problematyki badań eksploatacyjnych**

### **2.1. Rys historyczny systemów badań eksploatacyjnych**

Świadomość i potrzeba poznawania losowości obserwowanych w eksploatacji obiektów technicznych pojawiła się wraz z opublikowaniem w 1966 roku teorii niezawodności [18, 19]. Szczególnego znaczenia nabrało wyznaczanie charakterystyk statystycznych opisujących zachowanie się obiektów technicznych w rzeczywistej eksploatacji. Wcześniejsze prace dotyczące niezawodności prowadzone przez Chinczyna, Palma, Erlanga, Fellerę, Gumbela, Weibulla, Birnbauma, Duncana i innych dały podwaliny teorii niezawodności.

Już wcześniej zauważono, że uszkodzenia pierwszych pojazdów mechanicznych oraz skutki przypadkowego utknięcia w drodze były uciążliwe dla użytkowników, a często groźne dla ich życia. Do najbardziej charakterystycznych działań zapobiegawczych w sferze niezawodności można uznać wyposażanie samochodów w korbę rozruchową, koło zapasowe czy przydzielanie licencji przewozowych na liniach transatlantycznych tylko samolotom dwusilnikowym [79].

Gwałtowny rozwój techniki po II wojnie światowej widoczny był przede wszystkim w elektronice, lotnictwie i powstającej technice kosmicznej. Katastrofy pierwszego, liniowego samolotu odrzutowego, brytyjskiego De Havilland Comet (1949 r.) oraz niepowodzenia w amerykańskim programie kosmicznym sprawiły, że Boeing Scientific Research Laboratories w Seattle realizację programu budowy Boeinga 707 zdecydowało wesprzeć podstawami naukowymi. Konsorcjum Boeinga powołało grupę badawczą pod kierunkiem Zygmunta Williama Birnbauma, który był uczniem między innymi Hugo Steinhausa i Stefana Banacha. Było to początkiem naukowego podejścia do zjawisk hamujących rozwój techniki, a pierwsze profesjonalne aplikacje wdrażała powołana w 1952 roku grupa badająca niezawodność sprzętu elektronicznego w lotnictwie Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment (AGREE) [2, 176]. Już we wstępnych doniesieniach AGREE zalecała producentom prowadzenie prac rozwojowych i opracowywanie lepszych obiektów. W zakresie dostaw dla wojska wymagano realizacji dostaw zgodnych z wytycznymi zamawiającego oraz opracowanie jakościowych i niezawodnościowych wymagań dla sprzętu. Zauważono także konieczność gromadzenia danych eksploatacyjnych w celu ustalania pierwotnych przyczyn problemów technicznych [181].

W 1950 r. Wallo die Weibull opublikował w *ASME Journal of Applied Mechanics* swoją pierwszą i najdonioślejszą dla niezawodności pracę zatytułowaną *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability (Rozkład statystyczny o szerokim zakresie stosowania)* [1, 181]. Uniwersalność rozkładu sprawiła, że stał się standardowym narzędziem do modelowania statystycznego wielu zjawisk fizycznych, technicznych i eksploatacyjnych. Genezą rozkładu były badania w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej prowadzone w 1939 r. [1, 19].

Dobrej jakości dane wykorzystywane w niezawodności są jednym z najważniejszych czynników decydujących o wynikach i wnioskach statystycznych. Wiedza o postaciach i skutkach uszkodzeń oraz procesie odnowy jest kluczowa w poznawaniu mechanizmów uszkodzeń i zapobieganiu im [79], a zarządzanie eksploatacją i bezpieczeństwem procesów technicznych wymaga zdobywania takiej wiedzy w celu uzyskiwania dużej efektywności przy możliwie niskich kosztach działania. Analiza przedstawionej tematyki w literaturze umożliwia krytyczne spojrzenie na procedury badawcze i wypracowanie uogólnień oraz wytyczenie kierunków prac usprawniających to podejście.

W literaturze przedmiotu stosunkowo rzadko poruszane jest zagadnienie organizacji, procedur i obserwacji rzeczywistych systemów technicznych oraz sposobu zbierania informacji o zachodzących procesach, głównie ze względu na poufność danych oraz sposób ich pozyskiwania. Znacznie więcej opracowań dotyczy modelowania zjawisk, przetwarzania danych oraz ich wiarygodności, jednak ta część wykorzystania danych musi być poprzedzona ich pozyskaniem. Opracowanie programu badań wymaga od jednostki badawczej rozwiązania zagadnień, takich jak: wybór odpowiedniego rodzaju gromadzonych danych, w jaki sposób je obserwować i pozyskiwać z rzeczywistych warunków eksploatacji (pierwotny nośnik danych), gdzie i w jakiej postaci przechowywać dane, jak przetwarzać je i jak wykorzystać wiedzę w nich zawartą oraz jak połączyć dane z różnych źródeł o różnej jakości i niepewności w zagregowane wskaźniki i miary użyteczne dla wielu odbiorców.

Problematykę badań eksploatacyjnych można sklasyfikować według klucza terytorialnego: świat i Polska oraz przedmiotowego: prace opisowe i historyczne, rzeczywiste systemy badań oraz modelowanie danych. Próbę syntetycznego zestawienia najważniejszych osiągnięć w zakresie zbierania danych i ich rozpowszechniania przedstawiono w tabeli 2.1. wykorzystując światowe źródła literaturowe [2, 48, 79, 273, 275, 294], w dalszej części rozdziału omówiono polskie systemy badań eksploatacyjnych.

W 1996 roku poświęcono 51. numer czasopisma *Reliability Engineering and System Safety* problematyce baz danych, wskazując na wiele zagadnień teoretycznych i praktycznych wymagających opracowania nowych modeli i metod aplikacyjnych.

Wartościowe opracowanie historyczne na temat badań eksploatacyjnych i baz danych przedstawił Fragola [79], podając wiele przykładów praktycznego wykorzystania obserwacji eksploatacyjnych. Jedną z pierwszych udokumentowanych baz danych była publikowana w latach pięćdziesiątych baza danych General Electric [226] i Motoroli w postaci podręczników zawierających wartości trwałości i uszkodzalność elementów elektronicznych. Fragola [79] podzielił rozwój niezawodnościowych baz danych na trzy generacje: wczesne badania do 1960 r., projekty z lat 60. XX w. i okres po roku 1970.



Tabela 2.1. Charakterystyka ważniejszych źródeł literaturowych danych niezawodnościowych

Nazwa systemu	Początek badań	Charakterystyka	Zakres informacji
Martin Titan Handbook; Procedure and Data for Estimating Reliability and Maintainability	1959	Pierwsza szeroko rozpowszechniona publikacja dostarczająca informacji na temat niezawodności na podstawie testów laboratoryjnych	Urządzenia elektroniczne i elektrotechniczne
IDEP/GIDEP/FARADA (Government-Industry Data Exchange)	1959	Rządowo-przemysłowa organizacja wymiany danych	Pociski balistyczne, później szeroki zakres obiektów wojskowych i cywilnych, pływających i naziemnych
MIL HDBK 217	1962	Baza danych niezawodnościowych Departamentu Obrony USA; dane uzyskane na podstawie testów laboratoryjnych	Urządzenia elektroniczne w sprzęcie wojskowym, z uwzględnieniem różnych czynników narażeńowych
RADC, publikowane przez RIAC (Reliability Information Analysis Center)	1970	Baza danych US Air Force Rome Air Development	Dane doświadczalne i polowe elementów elektronicznych, elektrycznych i mechanicznych
SRDF	1978	Baza danych stowarzyszenia elektryków francuskich EDF ( <i>Electricite de France</i> )	Urządzenia elektrowni nuklearnych (urz. elektryczne, mechaniczne, elektroniczne)
NUREG ( <i>Nuclear Regulatory Commission</i> )	1980	Publikacje ponad 500 raportów na temat doświadczeń eksploatacyjnych.	Studia przypadków w technice nuklearnej
OREDA	1981	Badania zainicjowane przez SINTEF (norweska, niezależna organizacja badawcza) i koncern naftowy BP	Urządzenia platform wiertniczych
Bellcore (od 1984 Telcordia)	1982	Modyfikacja MIL HDBK 217 wykonana przez Bell Communications Research Lab. (AT&T)	Poprawione niezawodnościowe modele obliczeniowe
IEEE Std. 500	1984	Przewodnik gromadzenia i przetwarzania danych dla urządzeń w energetyce nuklearnej, opinie eksperckie	Dane niezawodnościowe dla: pomp, napędów, zaworów i siłowników, urządzeń elektrycznych, czujników itp.
EIREDA.PC ( <i>European Industry Reliability Databank</i> )	1990	Komputerowa wersja bazy danych EIREDA	Urządzenia elektrowni nuklearnych (urządzenia elektryczne, mechaniczne, elektroniczne)
CORDS ( <i>Nuclear Component Reliability Data System</i> )	1990	Baza danych z 4 kanadyjskich elektrowni nuklearnych	Dane eksploatacyjne
CCPS/AIChE ( <i>Equipment Reliability Database Project</i> )	1998	Baza danych z przemysłu petrochemicznego	Dane o gotowości, obsługiwalności, bezpieczeństwie i kosztach wyposażenia instalacji chemicznych
ZEDB ( <i>Zentrale Zuverlässigkeits- und Ereignisdatenbank</i> )	1999	Centralna baza danych urządzeń z 19 (17 od 2004) niemieckich, holenderskiej i szwajcarskiej elektrowni nuklearnej	Dane eksploatacyjne i zdarzeniowe (urządzenia elektryczne, mechaniczne, elektroniczne)

Do najwcześniejszych publikacji dotyczących niezawodnościowych baz danych zalicza się wydany w 1959 r. *Martin Titan Handbook* będący pierwszym źródłem danych o uszkodzalności elementów elektronicznych i elektromechanicznych. Przyjęto tu stałą intensywność uszkodzeń z jednostką uszkodzalności: „uszkodzeń na milion godzin pracy”. *Titan Handbook* rozpoczął II etap upowszechniania prac i publikacji na temat danych i wymagań niezawodnościowych. Najbardziej znanym źródłem tego typu danych jest MIL-HDBK 217, którego pierwsze wydanie pojawiło się w 1962 r. Oprócz danych liczbowych zwrócono uwagę także na wpływ wymuszeń otoczenia na uszkodzalność [184]. Stałe intensywności uszkodzeń komponentów elektronicznych pochodziły jednak wyłącznie z badań laboratoryjnych i modyfikowane były wagami uwzględniającymi wpływ narażeń otoczenia, takich jak: temperatura, drgania, środowisko pracy, jakość wytwarzania. Dla złożonych systemów zalecono stosowanie intensywności uszkodzeń jako sumy intensywności uszkodzeń elementów tego systemu, zgodnie z przyjętym założeniem o wykładniczości rozkładu czasu do uszkodzenia. Nieścisłości i błędy wynikające z wczesnego stadium badań przyczyniły się w konsekwencji do błędów w aplikacjach danych w prognozowaniu niezawodności [2, 79].

W latach 70. XX wieku dowództwo wojskowe USA rozpoczęło sponsorowanie rządowego programu gromadzenia i wymiany danych eksploatacyjnych dla sprzętu zamawianego i kupowanego przez armię Stanów Zjednoczonych. Program GIDEP (*Government Industry Data Exchange Program*) został później rozszerzony na energię i funkcjonuje do dziś w pełni internetowo (on-line), jednak dostęp do informacji jest ograniczony dla użytkowników z jednostek wojskowych i producentów z obszaru USA i Kanady [79, 94]. W ramach programu utworzono bazę danych aktualizowaną przez użytkowników poprzez zbiór formularzy. Gromadzone dane obejmują testy producentów, zarówno przyspieszone, jak i naturalne, obserwacje polowe oraz informacje z systemu obsługiwanego, a wynikami badań są wskaźniki uszkodzalności, postaci uszkodzeń, wskaźniki naprawialności dla elementów, zespołów i całych obiektów [2]. Program był rozwijany stosownie do rozwoju technik komputerowych i informatycznych oraz poszerzany o nowe obszary inżynierii. Głównym zarzutem dotyczącym wiarygodności informacji była początkowo zgoda na zaakceptowanie błędów estymacji intensywności uszkodzeń wynikającego z przyjętych założeń o jednorodności obserwowanych obiektów [79].

Podobny projekt dotyczący gromadzenia danych o intensywności uszkodzeń elementów nieelektronicznych był wdrożony przez siły powietrzne USA w początku lat 70. XX wieku [79] w laboratorium badawczym Rome Laboratory (do 1991 r. jako RADC) [276]. W tym projekcie uwzględniono także wpływ środowiska na uszkodzalność obiektów. Wydane publikacje uznaje się za pierwsze sformalizowane podejście statystyczne w odniesieniu do możliwości łączenia niejednorodnych danych (zastosowanie testu F-Fishera). Na podstawie tych danych wydano wiele podręczników z zakresu niezawodności znanych jako RAC (*Reliability Analysis Center*).

Trzecia generacja analizy danych i modelowania niezawodności datowana jest od roku 1970, kiedy zauważono przydatność tworzonych banków danych i zwrócono większą uwagę na jakość danych i wyniki ich przetwarzania. W analizie niezawodno-

ści nabrały znaczenia przyczyny i skutki uszkodzeń, a także sposoby zbierania danych, tworzenia baz danych dla wielostopniowych podziałów dekompozycyjnych obiektów i sposoby kodowania informacji wpływające na zmniejszenie niepewności wyników końcowych.

Podstawy projektowania baz danych do gromadzenia wyników obserwacji niezawodnościowych omówione zostały przez Cooka [48,49], ze szczególnym zwróceniem uwagi na charakterystykę uszkodzenia (przyczyna, postać fizykalna i fizyczna, skutek). Propozycje modelowania uszkodzeń „współzawodniczących” podano w [50], uznając uszkodzenia o skutkach katastroficznych za najistotniejsze. Wszystkie pozostałe uszkodzenia potraktowano jako początkowo-degradujące. Autor podejmuje problem „jakości informacji” w odniesieniu do trzech punktów widzenia: projektanta, obsługownika i inżyniera bezpieczeństwa, wskazując wady istniejących do 1996 r. niezawodnościowych baz danych. Przedstawione zostały podstawy matematyczne modelowania strumieni uszkodzeń o niezależnych przyczynach oraz ograniczenia we wnioskowaniu płynące z przyjętych założeń, cenzorowania danych (ucinania) i ograniczeń podczas tworzenia baz danych.

Bazy danych zostały uznane za kluczowy element w zarządzaniu eksploatacją w podejściu do procedur eksploatacyjnych opracowanych dla Dyrekcji Energoelektryki Francji [166]. W ramach SRDF (*Reliability Data Collection System*) gromadzone są w centralnym serwerze dane z ponad 550 obiektów łącznie z charakterystyką uszkodzeń obejmującą: identyfikację obiektu i jego miejsce w systemie, przyczyny uszkodzeń, związki z otoczeniem, sposób usunięcia uszkodzenia, skutki w skali mikro i makro. Przedstawiono przykładowe formularze danych oraz miary oceny wynikające z przetwarzania danych.

Charakterystyka jednego z największych przedsięwzięć w dziedzinie badań niezawodnościowych projektu OREDA przedstawiona została przez zespół autorów z SINTEF i BP [165]. Projekt OREDA (**O**ffshore **R**eliability **D**ata) był jednym z pierwszych cywilnych systemów badań realizowanych na szeroką skalę w przemyśle naftowym. Projekt rozpoczął się na początku lat osiemdziesiątych i wdrożony został w 8 firmach naftowych działających w Norwegii, Wielkiej Brytanii i we Włoszech. Był kontynuowany do końca lat dziewięćdziesiątych w czterech etapach: do 1984, 1985–1988, 1990–1992, 1994–1996 [165, 273, 288]. Efektem projektu już w trzech pierwszych fazach było zebranie danych dotyczących niemal 33 tysięcy uszkodzeń zaobserwowanych w ponad 23 tysiącach obiektów. Dane pochodziły z trzech obszarów eksploatacji: dane identyfikacyjne uszkodzonego obiektu, opis uszkodzenia, sposób odnowy. Najważniejsze informacje dotyczące uszkodzeń obejmowały: postać uszkodzenia, jego dotkliwość, opis dysfunkcji, sposób diagnozowania oraz skutek dla systemu działania wyższego poziomu. Do obserwacji zakwalifikowano 27 rodzajów obiektów: baterie, prądnice, silniki spalinowe i elektryczne, turbiny parowe, sprężarki, turbozprężarki, układy sterujące i czujniki, głowice wiertnicze stałe i wymienne, głowice płuczkowe, czujniki ognia i gazu, wymienniki ciepła podgrzewacze i zbiorniki, dysze, dźwigi cokołowe, rurociągi i przewody technologiczne, rozgałęzienia rurowe, zawory, zbiorniki, pompy, narzędzia.

Ważnym efektem projektu było sformułowanie zaleceń projektowych do tworzenia przyszłych systemów gromadzenia danych eksploatacyjnych:

- decyzja o uruchomieniu systemu gromadzenia danych powinna być poprzedzona analizą sposobu ich wykorzystania,
- gwarancją wysokiej jakości danych jest ich jasne zdefiniowanie, specyfikacja i postać,
- zapewnienie jakości powinno przebiegać w procesie specyfikowania danych, ich akwizycji i weryfikacji,
- pozyskiwanie danych z wielu źródeł (systemów badawczych) jest bardziej efektywne niż oparcie całej wiedzy na doświadczeniu zdobytym w jednym systemie eksploatacji,
- należy dążyć do automatyzacji przepływu danych, zwłaszcza danych o znacznej liczności,
- niezbędną motywację dla rzetelnego gromadzenia danych w systemie eksploatacji uzyskuje się poprzez odwrotny, w stosunku do przepływu danych, przepływ informacji (sprzężenie zwrotne) z poziomu analizy danych do poziomu pozyskiwania danych,
- większą wiarygodność danych uzyskuje się poprzez stosowanie kombinacji kodów i opisów tekstowych,
- warto rozpocząć gromadzenie danych nawet w niewielkiej skali, poszerzając zakres w miarę przyrostu doświadczeń.

Wiele prac poświęcono modelowaniu uszkodzeń, szczególnie w odniesieniu do przyczyn i skutków [109, 111, 166]. Francuskie Stowarzyszenie Elektryków prowadziło obserwacje i gromadzenie danych w celu reagowania szczególnie w przypadku uszkodzeń określanych jako krytyczne. Przedstawiono wzór formularza do dokumentowania uszkodzeń oraz przykłady uzyskanych wyników dotyczących uszkodzalności urządzenia energetycznego [166]. IEEE wydało przewodnik do analizy uszkodzeń i ich dokumentacji [119]. Podano w nim definicje pojęć, sposoby diagnozowania uszkodzeń oraz dokumentowania i analizy. W załączniku omówiono badanie i typowe uszkodzenia transformatorów.

Problem łączenia danych dla podobnych obiektów, ale użytkowanych na różnych stanowiskach eksploatacyjnych przedstawiono dla szwedzkiej energetyki nuklearnej w pracy Põrna [264]. Autor podejmuje problematykę modelowania niepewności danych dla poissonowskiego strumienia uszkodzeń z wykorzystaniem metody Bayesa.

Metody statystyczne w analizie danych niezawodnościowych były przedmiotem wielu prac związanych z badaniami eksploatacyjnymi [48, 50, 54, 109, 226]. Prace te można podzielić na podejmujące zagadnienie: jednorodności i jakości danych opisane m.in. w: [23, 48, 50, 54, 109], testowania hipotez [23, 55], wyznaczania miar niezawodności [55, 56, 111, 135, 136, 166].

Duże znaczenie dla rozwoju przemysłowych baz danych w sektorze chemicznym miały prace i publikacje Centrum Bezpieczeństwa Procesów Chemicznych (CCPS) [96]. Przedstawiono założenia systemu gromadzenia danych niezawodnościowych dla rozległego systemu przemysłu chemicznego. Zaproponowano szczegółowy przykład

postaci danych, tabel zbiorczych, kodowania i przetwarzania danych łącznie z estymacją parametrów rozkładów prawdopodobieństwa dla wybranych zmiennych losowych.

O konieczności gromadzenia i wykorzystania danych z eksploatacji wspomina niemal każda pozycja z obszaru niezawodności, jednak zakres podanej wiedzy jest najczęściej ograniczony do ogólnych sformułowań, schematów i zaleceń [26, 233, 294]. Do bardziej wartościowych zaliczyć należy sztandarowe pozycje literatury niezawodnościowej podejmujące między innymi temat gromadzenia i przetwarzania danych eksploatacyjnych, takie jak książki: Vilemera, O'Connora, Biroliniego, Rausanda, Smitha, Modarresa, Barringera, Davidsona, Iresona. W kilku pracach przedstawiono także zakres pozyskiwanych informacji i formularze służące do gromadzenia danych o uszkodzeniach i innych zdarzeniach eksploatacyjnych [2, 96, 106, 292, 294, 310].

## 2.2. Ważniejsze polskie systemy badań eksploatacyjnych

W Polsce realizowano wiele badań eksploatacyjnych głównie zorientowanych na problem trwałości i niezawodności obiektów technicznych, przede wszystkim pojazdów [88, 90, 91, 106, 227, 325]. W latach 70. i 80. ubiegłego wieku badanymi obiektami były także maszyny robocze, maszyny produkcyjne, urządzenia hutnicze, układy transportu poziomego i pionowego w kopalniach, siłownie i urządzenia okrętowe, środki transportu wodnego i obrabiarki [22, 24, 37, 42, 57, 67, 159, 237, 238, 266, 333].

Ważnym ośrodkiem badawczym w zakresie badań eksploatacyjnych jest Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, który prowadził wiele programów badawczych z wykorzystaniem innowacyjnych metod naukowych i wdrożeniowych [179]. Natomiast Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie odgrywa czołową rolę w badaniach konstrukcji lotniczych oraz niezawodności i bezpieczeństwie systemu transportu lotniczego. ITWL od wielu lat prowadzi kompleksowe prace nad wprowadzeniem systemu informatycznego obserwacji statków powietrznych należących do polskiego lotnictwa wojskowego. W 2008 roku wdrożono system analizy bezpieczeństwa lotów TURAWA bazujący w założeniach metodycznych na instrukcji bezpieczeństwa lotów [120, 326] lotnictwa sił zbrojnych RP.

W tabeli 2.2 przedstawiono większe badania realizowane w Polsce od 1972 r. Ze-stawienie ograniczono do obiektów nieelektronicznych.

W Politechnice Wrocławskiej prace związane z badaniem niezawodności były już pod koniec lat 70. XX w. Badania te były badaniami eksploatacyjnymi (dotyczyły obserwacji obiektów w rzeczywistej eksploatacji) [65, 68, 71, 83–91, 196, 197, 202, 211]. Zakres zainteresowań zespołu badawczego obejmował opracowanie i prowadzenie badań, przetwarzanie wyników, analizy i wnioskowanie. W tabeli 2.3 przedstawiono charakterystykę najważniejszych badań zrealizowanych w Politechnice Wrocławskiej.

Ważnym elementem badań były nośniki danych służące do pierwotnego zapisu danych eksploatacyjnych. W zrealizowanych badaniach własnych stosowano trzy rodzaje nośników danych [68, 70, 83–89, 227]:

Tabela 2.2. Charakterystyka ważniejszych, polskich badań eksploatacyjnych maszyn i pojazdów

Nazwa systemu, jednostka badawcza, kierownik badań	Początek badań	Charakterystyka badań	Zakres informacji
Badania niezawodności eksploatacyjnej samochodów rodziny Star (A-29, A-66), WAT. M. Hebda, D. Janicki	1974	System zbierania informacji o eksploatacji samochodu ciężarowego	Dane o użytkowaniu, uszkodzalności i obsługiwalności w naturalnych warunkach eksploatacji
Transport oponowy i ciągi w kopalni rudy miedzi, Politechnika Wrocł. J. Sajkiewicz <sup>*)</sup>	1964	Ocena niezawodności i obsługiwalności pojazdów i transportu ciągłego	Dane o użytkowaniu, uszkodzalności i obsługiwalności pojazdów i maszyn
Urządzenia okrętowe, Wyższa Szkoła Marynarki Wojennej. E. Stegienka <sup>*)</sup>	1966	Ocena niezawodności, trwałości, gotowości i warunków eksploatacji	Głównie dane służbowe o użytkowaniu, uszkodzalności i częściach wymiennych
Maszyny włókiennicze, Politechnika Łódzka, M. Chwalibóg <sup>*)</sup>	1967	Uzyskiwanie efektów technicznych poprawiających wskaźniki eksploatacyjne	Dane o użytkowaniu, uszkodzalności, trwałości elementów krosien
Maszyny rolnicze BIZON, JAGA, IMER. L. Dwiliński <sup>*)</sup>	1972	Obserwacja eksploatacji maszyn dla oceny niezawodności zadaniowej. Rozwój metodyki badań przyspieszonych.	Dane o użytkowaniu, uszkodzalności, obsługiwalności, przechowywalności
Motorowery, WSI Bydgoszcz, Romet. A. Jazdon	1970	Analiza zmęczenia i poprawa niezawodności i trwałości motorowerów	Dane o użytkowaniu, uszkodzalności i obsługiwalności, warunkach otoczenia
Sprzęt lotniczy, ITWL, Warszawa J. Jaźwiński	1963	Badanie i ocena niezawodności i trwałości zmęczeniowej elementów statków powietrznych	Dane o użytkowaniu, uszkodzalności, obsługiwalności i diagnostyczne
Pojazdy mechaniczne, Wojsk. Inst. Techniki Pancernej i Samochodowej J. Orlik <sup>*)</sup>	1972	Prognozowanie zapasów części wymiennych	Dane o użytkowaniu, uszkodzalności, obsługiwalności, przechowywalności
Narzędzia zmechanizowane, PONAR-FANA. J. Oprędkiewicz <sup>*)</sup>	1963	Badania ukierunkowane na wspomaganie projektowania i obsługiwanania narzędzi	Dane eksploatacyjne do uzyskania postaci i parametrów rozkładu trwałości
Obrabiarki sterowane numerycznie, Politechnika Warszawska, J. Żółtowski <sup>*)</sup>	1972	Metoda badań obrabiarek sterowanych numerycznie	Dane eksploatacyjne do uzyskania charakterystyk niezawodności
Autobusy miejskie, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy. ZKA Bydgoszcz. M. Woropay	1998	Racjonalizacja eksploatacji autobusów miejskich i ocena gotowości, niezawodności, efektywności i bezpieczeństwa	Dane o użytkowaniu, uszkodzalności, obsługiwalności, bezpieczeństwie w ruchu drogowym
Badania autobusów miejskich Jelcz PR 110U, Politechnika Wrocławska, Jelczańskie Zakłady Samochodowe. A. Gołąbek	1977	System zbierania informacji o niezawodności autobusów Jelcz PR 110U	Dane o eksploatacji i środowisku, człowiek w eksploatacji, uszkodzalność i obsługiwalność

Nazwa systemu, jednostka badawcza, kierownik badań	Początek badań	Charakterystyka badań	Zakres informacji
Spalinowe siłownie okrętowe. Akademia Morska w Gdyni. J.Z.Czajucki		Niezawodność spalinowych siłowni okrętowych.	Dane o uszkodzeniach i naprawach siłowni okrętowych i ich elementów
System Niezawodności Ładowarki (SNŁ), Politechnika Wrocławska, Fadroma. A. Gołąbek	1986	System zbierania informacji o eksploatacji ładowarki Ł-220	Dane o eksploatacji i środowisku, człowiek w eksploatacji, uszkodzalność i obsługiwalność
System Niezawodności Koparki (SNK), Politechnika Wrocławska, KWB Bełchatów A. Gołąbek	1990	System zbierania informacji o eksploatacji koparki SRs-2000	Dane o uszkodzalności i obsługiwalności
Niezawodność maszyn i urządzeń hutniczych. AGH, Kraków. L. Bukowski, M. Warszński		Badanie niezawodności i trwałości urządzeń hutniczych	Dane o uszkodzeniach i naprawach urządzeń hutniczych
SEAS, Politechnika Wrocławska, Urząd Marszałkowski woj. dolnośląskiego. M. Młyńczak	2009	System zbierania informacji o eksploatacji autobusów szynowych	Dane o eksploatacji i środowisku, człowiek w eksploatacji, uszkodzalność i obsługiwalność
Samanta, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. J. Żurek	2008	System ewidencji i oceny procesu eksploatacji statków powietrznych	Dane o eksploatacji ponad 5000 statków powietrznych i agregatów
Turawa, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. J. Żurek	2008	System analizy i oceny bezpieczeństwa lotów lotnictwa Sił Zbrojnych RP	Dane o personelu latającym, statkach powietrznych, lotach, zdarzeniach lotniczych i profilaktyce obsługowej

\* Opracowano na podstawie materiałów Szkoły Zimowej 1973, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice, Jaszowiec, 1973.

- nośniki stanowiące źródłową dokumentację eksploatatora (TDE – Tradycyjna Dokumentacja Eksploatacyjna: karta drogowa, książki pojazdów, książki napraw i remontów, raporty obsługowe itp.),
- nośniki badawcze zaprojektowane do archiwizacji danych badawczych w postaci papierowych arkuszy (KIP – Karta Informacyjna Pojazdu, KUP – Karta Użytkowania Pojazdu, KOP – Karta Obsługiwania Pojazdu, KIŁ – Karta Informacyjna Ładowarki, KEŁ – Karta Eksploatacji Ładowarki, KNŁ – Karta Napraw Ładowarki),
- elektroniczne nośniki wymiany danych między użytkownikiem systemu a bazą danych (SZI – System Zbierania Informacji dla koparki SRs-2000, SZAS – System Zarządzania Autobusami Szynowymi).

Tabela 2.3. Charakterystyka badań eksploatacyjnych zrealizowanych w Politechnice Wrocławskiej

Obiekt badań	Liczność próbek badawczej	Czas obserwacji [rok]	Wielkość zespołu badawczego	Wykorzystanie wyników	Nośniki danych	Rodzaj bazy danych
Autobus miejski Berliet	15	1		Producent	TDE <sup>*)</sup>	Papierowa
Autobus miejski Jelcz PR 110U	110	5	5	Producent	KIP,KEP,KOP <sup>*</sup>	Papierowa
Autobus SANOS A14	26	2	3	Eksploatator	TDE	Papierowa
Samochód ciężarowy Fiat 190	245	5	3	Eksploatator	TDE	Papierowa
Samochód ciężarowy Skoda Liaz	10	4	3	Eksploatator	TDE	Papierowa
Samochód ciężarowy KAMAZ 5320	9	3	3	Eksploatator	TDE	Papierowa
Ładowarka Ł-220	15	2	3	Producent	KIŁ,KEŁ,KNŁ <sup>*)</sup>	SNŁ <sup>*)</sup> elektroniczna
Barka pchana BP-500	480	16	2	Producent	TDE	Papierowa
Pchacz rzeczny BIZON	16	13	4	Eksploatator	TDE	Papierowa
Koparka wielonaczyniowa SRs-2000	5	4	3	Eksploatator	SZI <sup>*)</sup>	SNK <sup>*)</sup> elektroniczna
Pomocnicze maszyny robocze w kopalni odkrywkowej	480	5	3	Eksploatator	TDE	Elektroniczna
Autobus szynowy Kolzam SA 109	2	1	4	Eksploatator	TDE	Elektroniczna
Autobus szynowy PESA	15	2	6	Eksploatator	Okna internetowe	SZAS <sup>*)</sup> sieciowa

\* TDE – Tradycyjna (papierowa) Dokumentacja Eksploatacyjna

KIP – Karta Identyfikacji Pojazdu

KUP – Karta Użytkowania Pojazdu

KOP – Karta Obsługiwania Pojazdu

KIŁ – Karta Identyfikacji Ładowarki

KEŁ – Karta Eksploatacji Ładowarki

KNŁ – Karta Napraw Ładowarki

SZI – System Zbierania Informacji

SNK – System Niezawodności Koparki

SZAS – System Zarządzania Autobusami Szynowymi

### 2.3. Analiza systemów badań

Badania eksploatacyjne stanowią obserwację obiektu technicznego realizującego zaprojektowaną funkcję. W zależności od wymagań czasowych w realizacji badań mogą się one odbywać w warunkach intensyfikacji narażeń lub w warunkach naturalnej eksploatacji. Zwiększona intensywność narażeń powoduje zwykle skrócenie czasu badań, co oznacza też przyspieszenie badań. Badania eksploatacyjne można prowadzić w sposób bierny, bez ingerencji w naturalne procesy działania, lub też sterując nimi i układając specjalne schematy użytkowania i obsługiwanego (badania czynne). Ograniczenia dotyczące wielkości próbki badawczej (obiektowe) oraz skrócenia czasu uży-



skania wyników bez intensyfikacji narażeń mogą wymagać rozważenia realizacji badań metodą próby: ciągłej lub warstwowej. Metoda próby ciągłej daje wyniki odroczone w czasie, po spełnieniu kryterium zakończenia badań (warunek zakończenia badań: określony czas obserwacji lub do pojawienia się określonej liczby zdarzeń), jednak wielkość próbki badawczej jest tu uwarunkowana jedynie statystyką obserwowanych zmiennych losowych. W przypadku badań metodą próby warstwowej wymaga się większej próbki obiektów o zróżnicowanym zużyciu potencjału eksploatacyjnego. Pozwala to na równoległą obserwację obiektów w „różnym wieku” i wyciąganiu wniosków jak dla okresu proporcjonalnego do liczby warstw wiekowych. Metodyka projektowania badań poruszana w niniejszej pracy dotyczy badań eksploatacyjnych prowadzonych w naturalnych warunkach eksploatacji.

Gromadzenie danych i ich przechowywanie jest kosztowne i wymagające znacznych nakładów finansowych na utrzymanie systemu badawczego [165, 181, 288]. Jakość i dostęp do informacji w rzeczywistej eksploatacji zależy od wielu czynników natury ludzkiej i organizacyjnej. Stąd trudne jest opracowanie systemów badań dla złożonych systemów technicznych, które dostarczałyby danych o powtarzalnej wiarygodności. Eksploatacja prowadzona jest najczęściej w rozległych systemach i w długim przedziale czasu. Uczestnicy eksploatacji na najniższym poziomie operacyjnym, zarówno użytkownicy, jak i obsługiwani, nie mają wystarczającej świadomości i motywacji do rzetelnego gromadzenia danych, co stanowi poważny problem jakości i wiarygodności banków danych. To szczególnie stanowi istotny przyczynek do zwrócenia dużej uwagi na niepewność danych [23, 50, 231].

Obserwacja rzeczywistego systemu eksploatacji pozwala na różnorodne spojrzenie na obiekty i przebiegające procesy, co z kolei odzwierciedlane jest w rodzajach pozyskiwanych danych. Zarządzanie eksploatacją poprzez pryzmat narzędzi RAMS (*Reliability Availability Maintainability Safety*) wymaga wykorzystania różnorodnych rodzajów danych, takich jak [39]:

- dane historyczne z innych podobnych systemów eksploatacji,
- dane od sprzedawców pośredniczących w przekazie informacji od klientów,
- dane z literatury fachowej, poradników, publikacji przedsiębiorstw,
- dane eksperckie, subiektywne, ale o wysokim poziomie zaufania,
- dane ankietowe, badania rynkowe i inne udokumentowane źródła danych oparte na mało licznych próbach,
- dane testów wytrzymałościowych, badań poligonowych,
- dane z pasywnych obserwacji, niesformalizowane,
- dane produkcyjne
- dane z badań jakościowych
- dane z planowych badań eksploatacyjnych o dużej wartości statystycznej,
- dane z badań otoczenia eksploatacji obiektu, w tym środowiska naturalnego,
- dane z napraw gwarancyjnych,
- dane o kosztach od projektowania, poprzez wytwarzanie i eksploatację po wycofanie i kasację.

W procesie projektowania obiektów technicznych wykorzystuje się wielkość obciążenia jako pierwotną informację obliczeniową zarówno zmienną zdeterminowaną, jak i losową [296, 299, 300, 301]. Informacja ta pozyskiwana jest z różnych źródeł, zarówno historycznych, jak i bieżących obserwacji i badań. Coraz częściej obiekty wyposaża się w układy pomiarowe i archiwizujące bieżące narażenia [8, 139, 151, 306]. Brakuje jednak sprzężenia zwrotnego z eksploatacji do projektowania i wytwarzania o rzeczywistych zjawiskach zachodzących w rzeczywistych systemach Człowiek–Obiekt–Otoczenie. Rzadko obserwuje się także udokumentowane, formalne struktury zarządzania wspierane ciąglą obserwacją zarządzanego procesu eksploatacji. Pewną nadzieję na poprawę tej sytuacji stwarza dyrektywa europejska zwracająca uwagę na wdrożenie programów zapewnienia bezpieczeństwa zarówno dla ludzi i środowiska naturalnego, jak i dla zasobów materialnych do programu zarządzania przedsięwzięciem. Ograniczanie strat w złożonych systemach technicznych jest istotnym elementem poprawy efektywności [137].

W literaturze tematu nie można znaleźć satysfakcjonującego opracowania wskazującego główne zagadnienia projektowania badań eksploatacyjnych i wykorzystania danych w bieżącej eksploatacji w odniesieniu do zapewnienia efektywności i bezpieczeństwa.

## 2.4. Ocena efektywności badań eksploatacyjnych

Badania eksploatacyjne są najbardziej wartościowym źródłem danych koniecznych w procesie zarządzania każdego przedsięwzięcia eksploatacyjnego [86, 141, 179, 227, 260, 326, 329, 331], przede wszystkim ze względu na aktualność pozyskanych informacji oraz szybkość przepływu danych z jednostek operacyjnych do decyzyjnych. Badania eksploatacyjne są także źródłem kosztów i dodatkowej pracy. Ocena korzyści wynikających z uzyskanych rezultatów w stosunku do nakładów jest tu więc istotnym elementem ograniczającym, warunkującym opłacalność badań w długookresowej strategii zarządzania eksploatacją [290]. Ocena efektywności badań eksploatacyjnych może mieć postać oceny bezwzględnej lub względnej. Ocena bezwzględna wskazuje zysk lub okres zwrotu poniesionych nakładów w porównaniu do wcześniejszego okresu lub w odniesieniu do podobnych systemów eksploatacji. Do typowych miar ekonomicznych szacujących bezwzględną efektywność zalicza się tu: wskaźnik rentowności inwestycji (*ROI*), czy okres zwrotu inwestycji (*Payback Period*) [101]. Ocena względna odnosi się do porównań lub ocen syntetyzujących, wielokryterialnych, jak np. całkowita efektywność obiektu (*OEE*).

### 2.4.1. Ocena skuteczności informacyjnej badań

Celem badań eksploatacyjnych jest wspieranie zarządzania eksploatacją i bezpieczeństwem poprzez dostarczanie informacji dla podejmowania decyzji. Przyjęte w strategii zarządzania modele decyzyjne muszą być zasilane informacyjnie, co przyczynia się do lepszego zrozumienia praw rządzących eksploatacją obiektu. Miarą ta-

kiego zrozumienia jest ilość dostarczonych przez system badawczy informacji. Zakłada się, że badania eksploatacyjne powodują zmniejszenie niepewności podejmowanych decyzji, więc efektywność badań można oceniać jako stopień zmniejszenia entropii informacyjnej w systemie zarządzania.

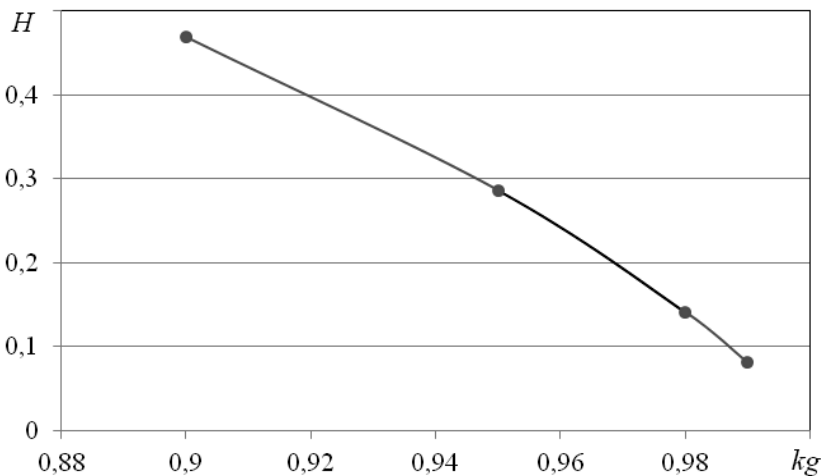
Uznaną w literaturze miarą niepewności jest entropia informacyjna Shannona [14] (2.1) osiągająca wartość zerową w przypadku pełnej znajomości zachowania się systemu, tj. wówczas, gdy stan systemu jest w pełni określony (prawdopodobieństwo zajścia jednego ze stanów systemu jest równe 1):

$$H = -\sum_{i=1}^N (p_i \log_2 p_i) \quad (2.1)$$

gdzie:  $H$  – entropia informacyjna według Shannona,

$p_i$  – prawdopodobieństwo  $i$ -tego stanu obiektu,  $i = 1, \dots, N$ .

Przykładowa poprawa wskaźnika gotowości w zakresie od 0,90 do 0,99 powoduje spadek entropii informacyjnej od wartości  $H_{kg=0,90} = 0,47$  do  $H_{kg=0,99} = 0,08$  (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Spadek entropii informacyjnej przy poprawie wskaźnika gotowości technicznej w zakresie 0,90–0,99

Spadek entropii w tym przykładzie oznacza wzrost przewidywalności funkcjonowania obiektu, co pozwala na podejmowanie zadań (misji) o określonym zagrożeniu niewykonania zadania.

### 2.4.2. Ocena ekonomiczności

Oszacowanie skuteczności badań obarczone jest znaczną niepewnością związaną z wieloma czynnikami natury ekonomicznej, technicznej i organizacyjno-socjologicznej, jednak przyjęcie pewnych założeń upraszczających i wykonanie symulacji różnych scenariuszy rozwoju sytuacji może dać pogląd na opłacalność opracowania i prowa-

zenia badań eksploatacyjnych. Analizy kosztów dokonuje się w systemach technicznych z wykorzystaniem metody LCC [20, 21, 220].

Modele kosztów LCC stosowane w analizie efektywności eksploatacji uwzględniają kilka grup kosztów, które generalnie można podzielić na koszty dotyczące fazy przedeksploatacyjnej (koszt projektowania, rozwoju, badań, wytwarzania, marketingu, sprzedaży i dostawy) oraz fazy eksploatacyjnej związanej z wykorzystywaniem funkcji obiektu (koszty szkolenia operatorów, materiałów, paliw, diagnostyki, obsługa, części wymiennych, wsparcia logistycznego, zasobów lokalowych) [61, 190, 242]. Rozważając eksploatację jako część fazy życia obiektu, należy uznać koszty przedeksploatacyjne za stałe, niezmiennie, na które zarządzanie eksploatacją zasadniczo nie ma już wpływu. Modele kosztów eksploatacyjnych klasyfikowane są według różnych kryteriów, takich jak: rodzaj kosztów, miejsce powstawania kosztów, nośniki kosztów, zmienność kosztów [331], a nowym podejściem do zarządzania jest analiza kosztów według faz działania określana jako ABC (*Activity Based Costing*), wchodząca już w czwartą fazę rozwoju [104, 314, 320]. Ideą ABC jest przypisywanie kosztów do działań (czynności) i zasobów, a następnie do finalnych produktów lub usług (działania wymagają zasobów, a produkty powstają z wykorzystanych zasobów). Zgodnie z tą ideą określanie kosztów wymaga: identyfikacji i klasyfikacji działań, przypisania kosztów koniecznych zasobów do działań, identyfikacji kosztów związanych z zasobami i określenia rozkładu tych kosztów na działania, następnie wyznaczenia udziałów działań w produktach/usługach i przypisania kosztów do kosztów produktów/usług). Efektywności ABC upatruje się w: oszczędności czasu, poprawie jakości, obniżeniu kosztów i obserwacji trendów [104].

Analiza działań eksploatacyjnych pokazuje trzy zasadnicze grupy działań związanych z użytkowaniem, utrzymaniem obiektu i jego zarządzaniem [178, 236, 331], przy czym w każdej z grup można wyróżnić specyficzne działania logistyczne (wspierające).

Działania odpowiadają stanom, w jakich przebywają zasoby eksploatacyjne, stąd dekompozycja stanów prowadzi do identyfikacji działań i przypisywanym im kosztom. Wnikliwość dekompozycji ograniczana jest z kolei rozdzielczością postrzegania sytuacji eksploatacyjnej, z czego wynika ograniczenie liczby danych lub konieczność ich zgromadzenia, zarchiwizowania i przetworzenia. Wyznaczenie zależności kosztów obserwacji (zorganizowania i prowadzenia badań eksploatacyjnych) od poziomu dekompozycji procesu eksploatacji jest obciążone dużą niepewnością, którą ogranicza się, stosując metody statystyczne, Bayesowskie czy oparte na zbiorach rozmytych [14, 80].

Analiza kosztów bazująca na głównych procesach obserwowanych w eksploatacji pokazuje cztery główne grupy kosztów:

$$KE = KADM + KU + KO + KZN \quad (2.2)$$

gdzie:  $KE$  – koszty eksploatacji,

$KADM$  – koszty administracyjne;  $KADM = KS + KZ$ ,

$KS$  – koszty utrzymania systemu eksploatacji (stałe, infrastrukturalne),

- KZ* – koszty zarządzania eksploatacją i bezpieczeństwem,  
*KU* – koszty użytkowania,  $KU = KUP + KUJ + KUA$ ,  
*KUP* – koszty użytkowania pasywnego (postój, oczekiwanie na pracę),  
*KUJ* – koszty użytkowania jałowego,  
*KUA* – koszty użytkowania aktywnego,  
*KO* – koszty obsługiwaniania,  $KO = KOP + KOAP + KOAN$ ,  
*KOP* – koszty obsługiwaniania pasywnego (postój, oczekiwanie na obsługę),  
*KOAP* – koszty obsługiwaniania aktywnego, profilaktycznego,  
*KOAN* – koszty obsługiwaniania aktywnego, korekcyjnego (naprawy),  
*KZN* – koszty zdarzeń niepożądanych (straty, skutki finansowe awarii, od-  
 szkodowania),

Podane koszty są zależne od wielu zmiennych charakteryzujących proces eksploatacji, takich jak: liczba obiektów technicznych, wiek i jakość tych obiektów, wielkość załogi, miara ilości wykonanej pracy, ilość i jakość zasobów materialnych, wielkość bazy eksploatacyjnej, zasoby finansowe i technologiczne, kwalifikacje i zdolności psychofizyczne ludzi, systemy wsparcia logistycznego, warunki otoczenia, zmienność sytuacji gospodarczo-ekonomicznej itp. Oszacowanie efektywności badań eksploatacyjnych w kategoriach kosztów jako funkcji tych zmiennych jest w tym przypadku możliwe jedynie dla przyjętych silnych założeń upraszczających i uzyskania najczęściej poufnych informacji ekonomicznych.

### 2.4.3. Ocena efektywności

Istotnym aspektem działania jest określenie strategii eksploatacyjnej, która opiera się na kilku kryteriach, spośród których najważniejsze to: koszt, jakość, elastyczność, szybkość działania i niezawodność [35, 285, 290]. Do zbioru tych kryteriów należy także włączyć bezpieczeństwo w szerokim zakresie oddziaływania [214]. Kryteria te są podstawą podejmowania decyzji eksploatacyjnych we wszystkich obszarach działania obiektu technicznego oraz zasobów ludzkich i materialnych.

Najważniejszymi strategiami eksploatacyjnymi ujmującymi podane kryteria są [285]:

- strategia według wielkości produkcji/usług (dostosowanie wielkości efektu działania do potrzeb i zasobów materialnych),
- strategia według wykorzystania zasobów ludzkich (wyszkolenie, wynagrodzenie, motywacja, zarządzanie),
- strategia według jakości produkcji/usług (cele, mierniki, ocena, możliwości, korzyści),
- strategia według źródeł produkcji/usług (podział na produkcję własną i zlecaną, dobór i ocena dostawców),
- strategia według wykorzystania zasobów systemu działania (możliwości systemu działania spełnienia celu i reagowania na podejmowane decyzje).

Ostatnia z wymienionych strategii jest najbliższa zakresowi niniejszej pracy, ponieważ dotyczy bezpośrednio systemów i urządzeń mechanicznych w eksploatacji.

Strategia ta może być bardziej szczegółowo rozważana jako strategia zarządzania według [330]:

- niezawodności obiektów mechanicznych polegająca na zapewnieniu możliwie najwyższego wskaźnika gotowości systemu,
- efektywności ekonomicznej minimalizującej koszty eksploatacji systemu mechanicznego,
- zasobu użytkowego determinująca obsługi obiektu zgodnie z ilością wykonanej pracy,
- stanu technicznego pozwalająca na najbardziej efektywne wykorzystanie zasobów użytkowych systemu technicznego.

Wybór strategii jest złożonym zadaniem techniczno-ekonomiczno-organizacyjnym wymagającym znajomości zarówno potrzeb rynku (odbiorcy produktu lub usług), równowagi całkowitych kosztów, jak i zysków oraz technicznych możliwości eksploatowanych urządzeń [257]. Ocena wyboru strategii powinna bazować przede wszystkim na uzyskanym efekcie działania systemu zgodnie z zamysłem projektanta i potrzebą użytkownika. Ocena taka opiera się na ocenie całkowitych efektów działania systemu *OEE* (*Overall Equipment Effectiveness*), [309]. która uwzględnia gotowość, wydajność i jakość działania w postaci iloczynowej:

$$OEE = AVAILABILITY \times PERFORMANCE \times QUALITY \quad (2.3)$$

gdzie: *AVAILABILITY* – wskaźnik gotowości technicznej,

*PERFORMANCE* – wskaźnik wydajności użytkowej (wskaźnik wykorzystania czasu użytkowania),

*QUALITY* – wskaźnik jakości określający udział błędów (wad produkcyjnych, błędnych cykli pracy) w całkowitej liczbie sztuk produktów lub cykli pracy.

Ocenia się, że oczekiwana (przeciętna światowa) wartość *OEE* wynosi, uwzględniając odpowiednio poszczególne czynniki iloczynu:  $OEE = 0,90 \cdot 0,95 \cdot 0,99 = 0,85$  [309].

Biorąc pod uwagę podane podejście, uzupełnione o aspekt bezpieczeństwa, można ocenić skuteczność badań eksploatacyjnych jako wzrost wartości wskaźnika *OEE* po wdrożeniu badań i uzyskaniu informacji zasilających system zarządzania eksploatacją. Oczekiwany wpływ badań upatruje się w poprawie działania oraz obniżeniu kosztów działania systemu poprzez: ograniczenie strat w czasie użytkowania (eliminacja uszkodzeń i zagrożeń, ograniczenie krótkich przerw, eliminowanie zakłóceń we wsparciu logistycznym, zwiększenie intensywności działań) i ograniczenie kosztów (eliminacja braków i wad produkcyjnych i montażowych, poprawa dokładności działania, eliminacja, ograniczenie odszkodowań). Poszerzenie kryteriów oceny skuteczności o kryterium bezpieczeństwa jest nowym spojrzeniem na *OEE*. Do wskaźnika *OEE* włączono tu czynnik ryzyka ujmujący wielkość powypadkowych strat i odszkodowań:

$$CEM = GOT \times WYK \times JAK \times BEZP \quad (2.4)$$

gdzie: *CEM* – całkowita efektywność obiektu mechanicznego w eksploatacji,

*GOT* – wskaźnik gotowości technicznej obiektu,

*WYK* – wskaźnik wykorzystania obiektu,

*JAK* – wskaźnik jakości produkcji/usługi,

*BEZP* – wskaźnik bezpiecznego działania,  $BEZP = 1 - KS/DE$ ,

*KS* – koszt strat i odszkodowań w okresie badań do wysokości dochodu,

*DE* – dochód w okresie badań.

Wskaźnik gotowości technicznej wyraża udział czasu zdatności obiektu w obserwowanym czasie i zależy zarówno od jakości obiektu, tj. jego uszkodzalności i naprawialności, jak i zdolności systemu eksploatacji do utrzymania tego stanu zdatności.

Wskaźnik *BEZP* jest miarą stosowanych środków bezpieczeństwa, które w sposób najbardziej skuteczny ekonomicznie ograniczają straty w eksploatacji. Tak dobrane środki bezpieczeństwa odpowiadają technologii eksploatacji *BATNEC* (*Best Available Technology not Entailing Excessive Cost*), dającej największe zyski przy możliwie najmniejszych nakładach na bezpieczeństwo [144]. Straty w wymiarze katastrofalnym należy uwzględnić w formule (2.6) do wysokości uzyskanego dochodu. Zdarzenia o tak dużych skutkach są niedopuszczalne i w zasadzie powodują likwidację przedsięwzięcia.

Badania eksploatacyjne mają poprawić efektywność działania systemu poprzez zwiększenie wydajności obiektu i/lub obniżenie kosztów działania. Przyjmując za miarę oceny efektywności wskaźnik *CEM*, oczekuje się, że badania eksploatacyjne wpłyną na poprawę gotowości obiektu, lepsze jego wykorzystanie, wyższy poziom jakości funkcjonowania (produktu lub usług) i większe bezpieczeństwo [71]. Źródła tych zmian należy poszukiwać w:

- wydłużeniu czasu pracy lub innej miary pracy między obsługami profilaktycznymi,
- ograniczeniu nieplanowych wyłączeń i uszkodzeń szczególnie nagłych,
- eliminacji braków materiałów niezbędnych w użytkowaniu obiektu,
- skróceniu czasu niezdatności wynikającego z czasu obsług profilaktycznych i napraw,
- skróceniu czasu niezdatności wynikającego z czasu obsługiwanego pasywnego (oczekiwanie na obsługę),
- skróceniu pasywnego i jałowego czasu użytkowania,
- zwiększeniu intensywności użytkowania poprzez wpływanie na: operatora, sposób zasilania, stopień zużycia i jakość obiektu,
- aktywizacji i motywacji eksploatatorów do wykonywania pracy zgodnie z najwyższymi standardami jakościowymi,
- włączeniu polityki bezpiecznego działania do rutynowych działań eksploatacyjnych,
- wprowadzaniu środków bezpieczeństwa w celu ograniczania częstotliwości i wielkości strat w wyniku zdarzeń niepożądanych.





## 3. Metodyka badań eksploatacyjnych

### 3.1. Założenia metodyki badań

Metodyka opracowania badań eksploatacyjnych opiera się na systemowej analizie problemu, która prowadzi do wydzielenia trzech płaszczyzn badawczych:

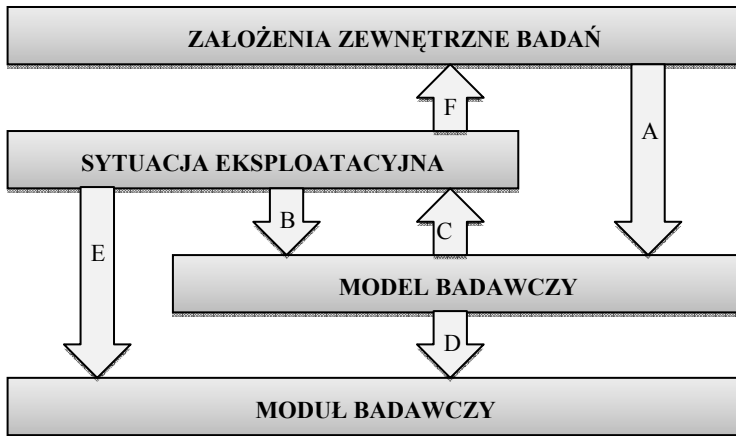
- płaszczyzny założeń i wymagań obejmujących: cel i założenia badań oraz wymagania stawiane przez odbiorcę wyników,
- płaszczyzny systemu i procesu eksploatacji obiektu badań,
- płaszczyzny modułu badawczego obejmującego strukturę badań, jego system, program i plan badawczy oraz wdrożenie badań do rzeczywistego systemu eksploatacji.

W pracy przyjęto następującą terminologię używaną w szczegółowym opisie metodyki:

- cel badań – zbiór charakterystyk opisowych i miar oceny obiektu mechanicznego w eksploatacji podporządkowany odbiorcy wyników badań,
- sytuacja badawcza – system i proces eksploatacji obiektu mechanicznego oraz uwarunkowania środowiskowe obejmujące ludzi, otoczenie materialne i otoczenie naturalne,
- model badawczy – zbiór zmiennych i relacji opisujących sposób obserwacji obiektu w eksploatacji,
- moduł badawczy – zbiór metod, procedur i dokumentów stanowiących szczegółowy pakiet zasad pozwalających na realizację badań eksploatacyjnych.

Każda z płaszczyzn badawczych generuje zbiór wymagań i informacji niezbędnych do poprawnego sformułowania zadań i rezultatów budowania badań. Tworzy to trójwarstwową strukturę problemową (rys. 3.1), w której zidentyfikowane relacje między elementami poszczególnych warstw stanowią twórczą treść pracy, syntezującą metody analityczne, projektowe i obliczeniowe.

Metodyka badań eksploatacyjnych obiektów mechanicznych (*BEOM*) składa się z dwóch zasadniczych etapów obejmujących: opracowanie modelu badawczego oraz opracowanie szczegółowego wykonawczego modułu badawczego. Model badawczy powstaje w wyniku syntezy wymagań i warunków brzegowych badań oraz analizy rzeczywistej sytuacji eksploatacyjnej. Wymagania odbiorcy są zazwyczaj przeciwstawne w stosunku do ograniczeń finansowych, czasowych lub wynikających z technicznych możliwości, jakie stwarza eksploatacja obiektu. Kompromisowe określenie



Rys. 3.1. Warstwowy schemat budowy badań eksploatacyjnych

celu badań, a następnie modelu badawczego osiągane jest w kolejnych modyfikacjach wymagań użytkownika i ograniczeń zewnętrznych przy zazwyczaj ustalonym zbiorze informacji pochodzących z rzeczywistej eksploatacji (rys. 3.2).

Głównym efektem badań jest spełnienie celu użytecznego ustalonego w celu badań w postaci żądanych miar oceny, natomiast cele poznawcze (rys. 1.6) są zazwyczaj dodatkowymi efektami badań poszerzającymi wiedzę o procesach technicznych, degradacyjnych, socjotechnicznych i innych zjawiskach zachodzących podczas eksploatacji obiektu. Wyniki badań uzyskiwane okresowo należy traktować jako miary sprawdzające i porównawcze w stosunku do zamierzonych miar oceny. Miary oceny wyznaczone w toku badań w sposób ciągły są symptomami diagnostycznymi wykorzystywanymi do bieżącego zarządzania eksploatacją.

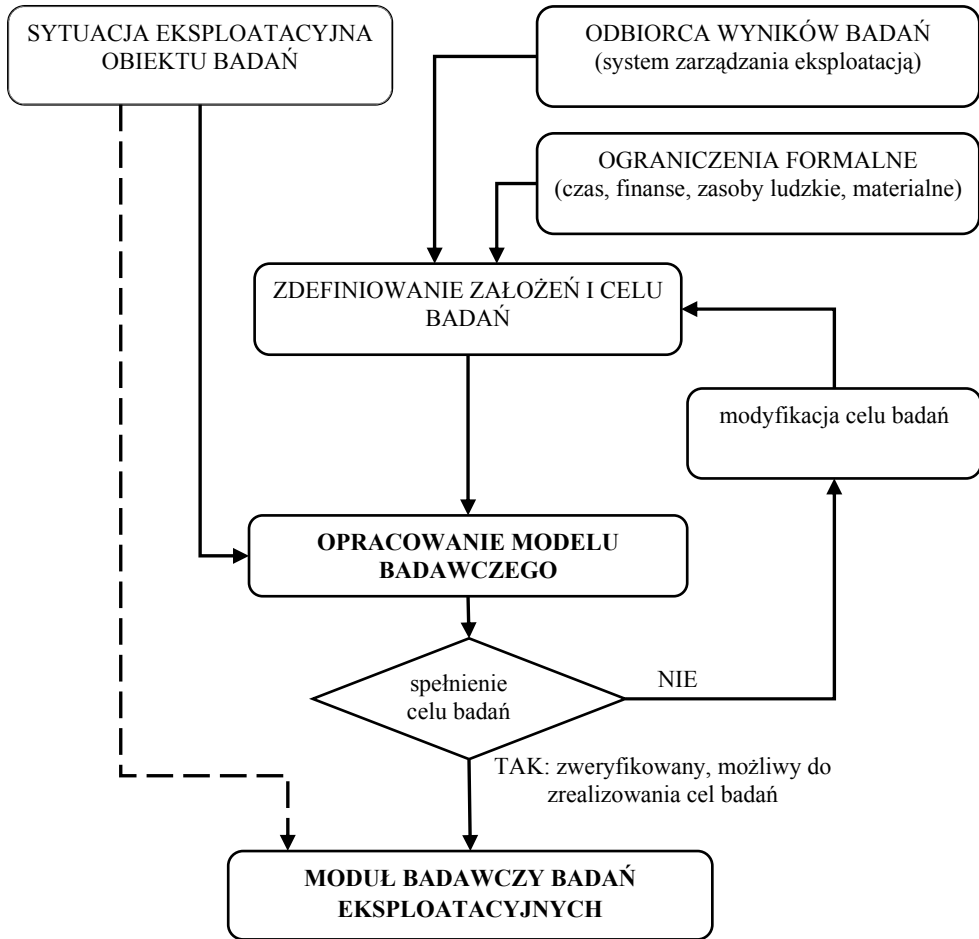
Założenia i ograniczenia badań wynikające z budżetu, czasu i dostępnych zasobów są, łącznie z warunkami określonymi przez sytuację eksploatacyjną, podstawą budowy modelu badawczego (ścieżki A i B). Weryfikacja zgodności realizacji badań w rzeczywistej sytuacji eksploatacyjnej z narzuconymi założeniami i wymaganiami odbiorcy wyników odbywa się na ścieżkach C i D. Model badawczy określa stopień szczegółowości przyszłych obserwacji obiektu, natomiast moduł badawczy charakteryzuje wykonawczą warstwę badawczą. Moduł badawczy powstaje z teoretycznych podstaw modelowania badań uzupełnionych analizą sytuacji eksploatacyjnego (ścieżki E i F).

Metodyka badań eksploatacyjnych obiektu mechanicznego opisana jest formalnie w postaci piątki:

$$BEOM = \langle CBE, SEOM, MOD, MBE, RBEOM \rangle \quad (3.1)$$

gdzie: *BEOM* – badanie eksploatacyjne obiektów mechanicznych,  
*CBE* – cel badań eksploatacyjnych,  
*SEOM* – sytuacja eksploatacyjna obiektu mechanicznego,

*MOD* – model badawczy,  
*MBE* – moduł badawczy,  
*RBEOM* – relacje między elementami *BEOM*.

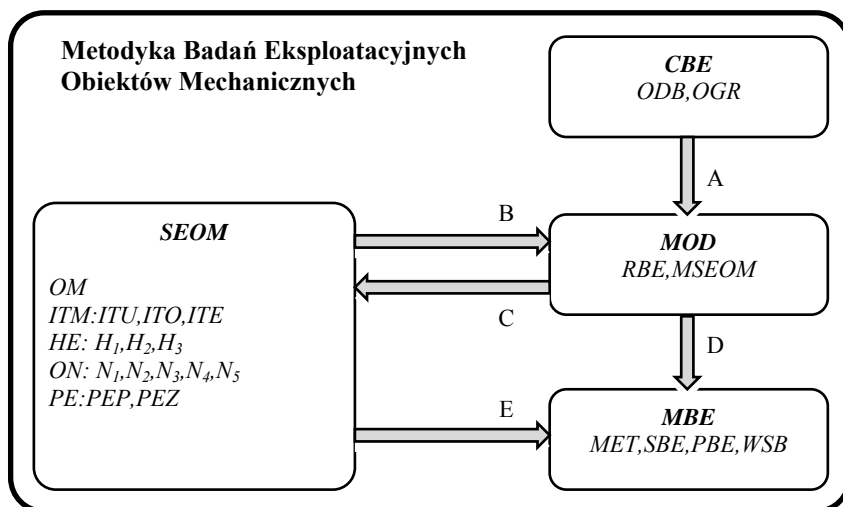


Rys. 3.2. Algorytm budowy modułu badań eksploatacyjnych

Proponowana metodyka projektowania badań eksploatacyjnych wymaga zrealizowania zadania analitycznego w odniesieniu do sytuacji eksploatacyjnej obiektu oraz zadania syntetycznego w odniesieniu do modelu i modułu badawczego, który jest faktycznym celem niniejszego projektowania. Każdy element metodyki opisany jest zbiorem atrybutów, których wzajemne relacje określają zależności w czasie i podporządkowanie wynikające z konieczności zachowania sekwencyjności działań projektowych.

### 3.2. Charakterystyka metod cząstkowych

Badanie eksploatacyjne realizuje opracowany moduł badań (*MBE*), według określonego programu badań (*PBE*), poprzez obserwację wybranych obszarów eksploatacji i przetwarzanie pozyskanych danych w systemie bazy danych pod kątem każdego z wyróżnionych aspektów eksploatacji. Na rysunku 3.3 pokazano ciąg zadań cząstkowych sterowanych metodami wskazanymi w metodyce *BEOM*, a w tabeli 3.1 zestawiono skróty z tego rysunku.



Rys. 3.3. Zestawienie metod cząstkowych metodyki badań eksploatacyjnych (przepływ informacji A, B, C, D, E, jak na rys. 3.1)

Tabela 3.1. Opis skrótów użytych w metodyce *BEOM*

<i>BEOM</i> – badanie eksploatacyjne obiektów mechan.	<i>CBE</i> – cel badań eksploatacyjnych
<i>DOKW</i> – zbiór dokumentów badawczych	<i>EO</i> – otoczenie systemu eksploatacji
<i>H1</i> – zbiór ludzi jako podmiotów działania	<i>H2</i> – zbiór ludzi jako przedmiotów działania
<i>H3</i> – zbiór ludzi w otoczeniu eksploatacji	<i>HE</i> – człowiek w eksploatacji obiektu
<i>ITE</i> – obiekty techniczne należące do infrastruktury otoczenia eksploatacji	<i>ITM</i> – Infrastruktura techniczna eksploatacji obiektu
<i>ITO</i> – obiekty techniczne należące do infrastruktury obsługowej	<i>ITU</i> – obiekty techniczne należące do infrastruktury użytkowej
<i>MBE</i> – moduł badawczy	<i>MET</i> – metoda badawcza
<i>MOD</i> – model badawczy	<i>MSEOM</i> – model sytuacji eksploatacyjnej
<i>N1</i> – gleba, podłoże naturalne	<i>N2</i> – atmosfera, powietrze
<i>N3</i> – woda w ekosystemie	<i>N4</i> – fauna w ekosystemie
<i>N5</i> – flora w ekosystemie	<i>OBE</i> – obszar badań eksploatacji
<i>ODB</i> – zbiór wymagań odbiorcy wyników	<i>OINF</i> – zakres informacji i sposób jej obiegu

<i>OGR</i> – ograniczenia badań	<i>ON</i> – otoczenie naturalne w eksploatacji
<i>OM</i> – obiekt mechaniczny	<i>PE</i> – proces eksploatacji
<i>PBE</i> – program badawczy	<i>PEZ</i> – zakłócony proces eksploatacji
<i>PEP</i> – poprawny proces eksploatacji	<i>RBE</i> – zbiór miar oceny
<i>RBAD</i> – sposób realizacji badań	<i>SEOM</i> – sytuacja eksploatacyjna obiektu mech.
<i>SBE</i> – system badawczy	<i>WER</i> – procedury nadzoru i weryfikacji poprawności przebiegu badań i danych
<i>SZK</i> – szkolenia i konsultacje dla personelu badawczego	<i>ZGI</i> – procedury zbierania i gromadzenia danych, wymiana informacji w badaniach
<i>WSB</i> – wdrożenie systemu badawczego	

### 3.2.1. Cel badań – *CBE*

Pierwsza część metodyki projektowania opiera się na iteracyjnym dochodzeniu do kompromisu między wymaganiami odbiorcy wyników a ograniczeniami wynikającymi z rzeczywistych możliwości i warunków realizacji badań. Przejście do drugiej fazy projektowania badań wymaga sprecyzowania modelu badawczego mieszczącego się w celu badań lub dostosowania celu badań do realiów eksploatacyjnych. Zweryfikowany pod względem realizacyjnym i zgodności z wymaganiami odbiorcy cel badań jest podstawą opracowania struktury i procedury badań eksploatacyjnych obiektu mechanicznego (*BEOM*).

Badania eksploatacyjne mogą być wykorzystane jako źródło informacji dla procesu projektowania, wytwarzania lub zarządzania eksploatacją. Specyfikacja badań powinna precyzować zakres niezbędnych informacji do uzyskania w trakcie naturalnej eksploatacji badanego obiektu. Rejestracja występujących w czasie badań zdarzeń i warunków użytkowych, obsługowych i środowiskowych powinna pozwolić na:

- określenie rzeczywistych wartości charakterystyk eksploatacyjnych lub właściwości obiektu i jego komponentów (eksploatacyjne badanie określające),
- potwierdzenie lub sprawdzenie wybranych charakterystyk eksploatacyjnych obiektu i jego komponentów (eksploatacyjne badanie zgodności).

Ponadto, cel badań musi uwzględniać wymagania odbiorcy oraz uwarunkowania i ograniczenia formalne. Uwzględnienie tych aspektów badań pozwala na sformułowanie celu badań:

$$CBE = \langle ODB, OGR, RCB \rangle \quad (3.2)$$

gdzie: *CBE* – cel badań eksploatacyjnych,

*ODB* – zbiór wymagań stawianych przez odbiorcę wyników,

*OGR* – zbiór ograniczeń badawczych,

*RCB* – relacje między elementami celu badawczego.

Celem badań jest uzyskanie wiarygodnych miar oceny eksploatacji obiektu w zakresie zgodnym z wymaganiami odbiorcy i przy istniejących ograniczeniach formalnych, czasowych, dostępności zasobów materialnych, ludzkich i finansowych.

### 3.2.2. Sytuacja eksploatacyjna obiektu mechanicznego – *SEOM*

Podzbiór *SEOM* opisuje metodę analizy sytuacji eksploatacyjnej badanego obiektu poprzez identyfikację stanu obiektu i jego miejsca w systemie realizującym funkcję:

$$SEOM = \langle SE[(OM, ITM), HE, EO], PE, RSE \rangle \quad (3.3)$$

gdzie: *SEOM* – sytuacja eksploatacyjna badanego obiektu,

*SE* – system eksploatacji obiektu,

*OM* – obiekt (grupa obiektów) w eksploatacji,

*ITM* – infrastruktura eksploatacji,

*HE* – człowiek w eksploatacji obiektu,

*EO* – otoczenie systemu eksploatacji,

*PE* – proces eksploatacji obiektu,

*RSE* – relacje między elementami sytuacji eksploatacyjnej.

Sytuacja eksploatacyjna stanowi wiedzę analityczną, ekspercką i historyczną pozwalającą na identyfikację obiektów i procesów, a następnie sporządzenie modelowego obrazu eksploatacji. Wymaga to oceny ważności elementów opisowych i określenia wystarczającej szczegółowości analizy i stopnia dekompozycji. Istotą podanego podejścia jest obiektowe pogrupowanie obiektów uczestniczących w eksploatacji. W sytuacji eksploatacyjnej wydzielono obiekty techniczne, ludzi i otoczenie naturalne. Każdy z tych obiektów charakteryzowany jest specyficznym zbiorem atrybutów, niezależnie od miejsca, jakie przyjmuje w eksploatacji. Zaletą takiego podejścia jest powtarzalność atrybutów i szybsze opracowanie zakresu obserwowanych zmiennych.

### 3.2.3. Model badawczy – *MOD*

Model badawczy jest modelowym opisem tych obiektów i zjawisk zachodzących w eksploatacji, których obserwacja pozwala na realizację celu badań.

Model badawczy *MOD* badania eksploatacyjnego obiektu mechanicznego realizowanego w naturalnych warunkach eksploatacji opisuje formuła (3.4), w której na szczególne wyróżnienie zasługuje podzbiór dotyczący modelowania przedmiotu badania (*MSEOM*):

$$MOD = \langle RBE, MSEOM, RMB \rangle \quad (3.4)$$

gdzie: *MOD* – model badawczy,

*RBE* – zbiór miar oceny podporządkowany wymaganiom odbiorcy,

*MSEOM* – model sytuacji eksploatacyjnej obiektu badań,

*RMB* – relacje między elementami modelu badawczego.

Model sytuacji eksploatacyjnej obiektu badań opiera się na wiedzy uzyskanej podczas sporządzania opisu sytuacji eksploatacyjnej *SEOM*. Modelowe podejście do sytuacji eksploatacyjnej polega na uściśleniu obszaru badań poprzez nadanie mu formalnego, modelowego kształtu oraz sprzężenia tego modelu ze specjalistycznymi rezultatami badań nazwanymi aspektami eksploatacji *ASE*.

### 3.2.4. Moduł badawczy – *MBE*

Opis sposobu realizacji badań zawarty jest w module badawczym, który wymaga zdefiniowania metody badawczej, opracowania systemu i programu badań oraz wdrożenia badań w systemie eksploatacji obiektu:

$$MBE = \langle MET, SBE, PBE, WSB, RMB \rangle \quad (3.5)$$

gdzie: *MBE* – moduł badawczy,  
*MET* – metoda badawcza,  
*SBE* – system badawczy,  
*PBE* – program badawczy,  
*WSB* – wdrożenie systemu badawczego,  
*RMBE* – relacje między elementami modułu badawczego.

Rezultatem opracowania modułu badawczego jest zbiór zaleceń wykonawczych, harmonogramów oraz wykaz zasobów ludzkich i materialnych niezbędnych do realizacji badań.

## 3.3. Opis metod składowych metodyki badań

### 3.3.1. Metoda opracowania akceptowalnego celu badawczego – *CBE*

Badania eksploatacyjne opracowywane są na zapotrzebowanie odbiorcy, przy ograniczeniach formalnych i wynikających z sytuacji eksploatacyjnej obiektu. Dwa pierwsze elementy, tj. oczekiwania odbiorcy i ograniczenia należy traktować jako zewnętrzne i niezmiennie. Zadaniem opracowywanych badań eksploatacyjnych jest:

- ciągle zasilanie jednostki kierowania eksploatacją w informacje do podejmowanie decyzji operacyjnych i strategicznych,
- uzyskanie sprzężenia zwrotnego w procesie eksploatacji pomiędzy podejmowanymi decyzjami eksploatacyjnymi a obserwowanymi miarami oceny,
- monitorowanie systemu i procesu eksploatacji w procesie zarządzania ryzykiem,
- pozyskiwanie informacji o jakości i niezawodności obiektu,
- pozyskiwanie informacji o rzeczywistych obciążeniach i narażeniach w eksploatacji.

Szerszy zakres wykorzystania wyników w zarządzaniu eksploatacją upatrywany jest w racjonalnym utrzymaniu systemu eksploatacji, poprawie jego efektywności, porównywaniu do okresów innych systemów eksploatacji, możliwości symulacji rozwoju, strategii zakupu nowych obiektów czy wycofywania obiektów.

Ocena eksploatacji, będąca częścią rezultatów badań, dotyczy w tym układzie: funkcjonalności, niezawodności, bezpieczeństwa i efektywności, nazywanych ogólnie aspektami eksploatacji. Aspekty eksploatacji także stanowią pewien system, w którym relacje między miarami oceny tworzą podstawę zarządzania eksploatacją:

$$ASE = \{AE_i\}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.6)$$

gdzie:  $ASE$  – aspekty eksploatacji,  
 $AE_1 \rightarrow FUN$  – miary oceny funkcjonalności,  
 $AE_2 \rightarrow NIEZ$  – miary oceny niezawodności,  
 $AE_3 \rightarrow BEZ$  – miary oceny bezpieczeństwa,  
 $AE_4 \rightarrow EFE$  – miary oceny efektywności.

Badanie obiektu w rzeczywistych warunkach eksploatacji ukierunkowane jest na wyznaczenie zbioru miar oceny  $RBE$  (3.7) wykorzystywanych następnie w zarządzaniu eksploatacją i zarządzaniu ryzykiem. Miary oceny dotyczą wybranych aspektów eksploatacji, takich jak: funkcjonalność, niezawodność, bezpieczeństwo, efektywność itp.

$$RBE = \{\xi_i^{A_j}\} : \xi_i^{A_j} = \{\xi_1^{A_1}, \dots, \xi_{n_1}^{A_1}, \xi_1^{A_2}, \dots, \xi_i^{A_j}, \dots\} \quad (3.7)$$

gdzie:  $RBE$  – zbiór miar oceny,  
 $\xi_i^{A_j}$  –  $i$ -ta miara  $A_j$ -tego aspektu eksploatacji,  $\xi_i^{A_j} \in ASE$ ,  
 $n_j$  – liczba miar oceny  $j$ -tego aspektu eksploatacji.

Miary oceny w zarządzaniu eksploatacją mogą mieć różną postać matematyczną w zależności od stosowanej oceny i dostępności danych źródłowych. W ogólności miary mogą mieć postać liczbową, wskaźnikową, funkcyjną, lingwistyczną lub stanowić ocenę punktową (*scoring*) [142]. Miary te powstają w procesie przetwarzania danych źródłowych jako wynik przekształceń matematycznych zarówno danych źródłowych, jak i wyznaczonych miar (metody syntetyczne – wieloczynnikowe) [143, 248]. Pojedyncza miara oceny jest więc działaniem na elementach iloczynu kartezjańskiego uzyskanych zbiorów danych:

$$\xi_i^{A_j} = g_{ij}(D_1 \times D_2 \times \dots \times D_d) \quad (3.8)$$

gdzie:  $D_k$  – realizacja zmiennej obserwowanej w badaniach eksploatacyjnych,  
 $g_{ij}$  – funkcja wyznaczająca miarę oceny  $i$ -tego obszaru,  $j$ -tego aspektu eksploatacji (3.10).

Wybór miar zależy od postawionych w systemie zarządzania eksploatacją wymagań dotyczących dokładności, wnikliwości, horyzontu czasowego czy podatności na sterowanie eksploatacją. Uzyskanie miar oceny poprzedzone jest weryfikacją danych oraz analizą niepewności z możliwością zastosowania współczynnika niepewności informacji  $cf$  [231].

Celem badań jest uzyskanie dla danego obiektu  $OM$  pożądanego zbioru miar oceny (rezultatów)  $RBE$ , przy określonych ograniczeniach  $OGR$  (czasowych  $TB$  i kosztowych  $KE$ ) oraz lokowaniem rezultatów badań u określonego odbiorcy  $ODB$ , zgodnie z jego wymaganiami, przy czym najlepszą efektywność uzyskuje się dla największej wartości całkowitej efektywności badań  $CEM$ .



### 3.3.2. Metoda identyfikacji sytuacji eksploatacyjnej obiektu mechanicznego – SEOM

Celem identyfikacji sytuacji eksploatacyjnej obiektu mechanicznego jest zbudowanie eksperckiej bazy wiedzy na potrzeby opracowania modelu tej sytuacji eksploatacyjnej *MSEOM*. Model przyjęty do dalszego tworzenia badań jest uproszczony i ograniczony w stosunku do rzeczywistości poprzez nałożenie uproszczeń modelowych. Wiedza o sytuacji eksploatacyjnej obiektu pozwala też na kompromisowe określenie celu badań i racjonalnego zbioru przyszłych rezultatów.

Sytuacja eksploatacyjna *SEOM* charakteryzuje stan elementów systemu eksploatacji w chwili  $t$  i obejmuje: obiekt badań, ludzi powiązanych z eksploatacją obiektu, infrastrukturę i otoczenie biorące udział bezpośredni lub pośredni w spełnianiu funkcji przez obiekt badań. Identyfikacja sytuacji eksploatacyjnej wymaga analizy i obserwacji wybranych atrybutów charakteryzujących obszary badania, tj. system eksploatacji (obiekt, baza, ludzie, mikrootoczenie systemu, zbiór zewnętrznych czynników wymuszających) oraz zmienności atrybutów w czasie, czyli analizy procesu eksploatacji.

Badania obejmują obiekt mechaniczny, będący złożonym systemem technicznym o celowo zaprojektowanych funkcjach. Obiekt ulega w eksploatacji degradacji i destrukcji spowodowanej błędami człowieka oraz wpływem środowiska eksploatacji. Zjawiska te wywołują zdarzenia niepożądane powodujące zmniejszenie zakładanej efektywności i mogą przynosić straty dla systemu technicznego, ludzi i środowiska naturalnego. W podanym ujęciu, mechaniczny obiekt badań na etapie rozpoznawania jego sytuacji eksploatacyjnej postrzegany jest jako element systemu o określonej budowie (strukturze konstrukcyjnej i funkcjonalnej) podlegający procesowi eksploatacji przy zakłóceniach wywoływanych przez otoczenie eksploatacji).

Rozpoznanie sytuacji eksploatacyjnej *SEOM* wymaga zidentyfikowania systemu i procesu eksploatacji obiektu, wyznaczenia kryteriów upraszczających i zamodelowania na etapie tworzenia modelu badawczego *MOD*:

- elementów konstrukcyjnych obiektu badań,
- funkcji spełnianych przez obiekt (elementy),
- czynników i procesów degradacyjnych wpływających na obiekt (elementy),
- elementów otoczenia eksploatacji działających destrukcyjnie na obiekt,
- zbioru niezbędnych zasobów wymaganych do realizacji funkcji,
- związku zakłóceń (degradacja, zdarzenia niepożądane) z efektywnością działania,
- wymaganego poziomu gotowości, efektywności i bezpieczeństwa.

Wszystkie zidentyfikowane encje (obiekty i zjawiska) eksploatacji podzielono na cztery grupy według kryterium charakterystycznych właściwości przypisywanych tym encjom. W eksploatacji obiektów mechanicznych wyróżnia się: materię techniczną, ludzi (materia ożywiona), otoczenie naturalne oraz procesy, jako funkcje zmienności wyróżnionych encji w czasie, nazywane ogólnie obszarami badań eksploatacyjnych. Obszarem badań nazwano system, w którym relacje między elementami charakteryzują eksploatacyjny układ działania:

$$OBE = \{OE_i\}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.9)$$

gdzie:  $OBE$  – obszar badań eksploatacyjnych,  
 $OE_1 \rightarrow OT$  – obiekty techniczne, przy czym  $OT = \{OM, ITM\}$ ,  
 $OE_2 \rightarrow HE$  – człowiek w eksploatacji,  
 $OE_3 \rightarrow ON$  – otoczenie naturalne eksploatacji,  
 $OE_4 \rightarrow PE$  – proces eksploatacji,  
 $OM$  – obiekt mechaniczny będący przedmiotem badania,  
 $ITM$  – obiekty infrastruktury technicznej obiektu badań.

Elementy obszarów eksploatacji  $OE_i$  opisane są atrybutami  $w_i \in W$  najczęściej zmiennymi w czasie. Funkcja  $W(t)$  opisuje proces eksploatacji tego obiektu. Zbiór wszystkich możliwych wartości atrybutów obiektów określa przestrzeń fazowa  $PW(OE_i)$ .

Rozpoznanie sytuacji eksploatacyjnej obiektu mechanicznego oznacza identyfikację tej przestrzeni i związków między elementami fizycznymi systemu eksploatacji:

$$SEOM = f_{\text{ident}}(PW(OE_i)) \quad (3.10)$$

gdzie:  $f_{\text{ident}}$  – funkcja identyfikacji sytuacji eksploatacyjnej,  
 $PW(OE_i)$  – przestrzeń fazowa stanów eksploatacyjnych.

### Obiekt mechaniczny jako system techniczny – $OM$

Obiekt mechaniczny, będący przedmiotem badań, definiowany jest jako system techniczny, tj. zbiór elementów materialnych realizujących założoną funkcję główną [92]:

$$OM \in OE_1 : OM = \langle E, W, R \rangle \quad (3.11)$$

gdzie:  $E = \{e_i\}, i = 1, 2, \dots, n$  – zbiór elementów (podsystemów, komponentów),  
 $W = \{w_{is}\}, s = 1, 2, \dots, m_i$  – zbiór wyróżnionych właściwości (atrybutów) elementów,  
 $R = \{[R_l(w)_{is}]\}, l = 1, 2, \dots, r_i$  – zbiór relacji przypisanych do zbioru właściwości elementów.

### Infrastruktura techniczna eksploatacji obiektu – $ITM$

Realizacja procesu eksploatacji odbywa się w pewnych określonych strefach użytku lub obsługi [149, 150] i wymaga zapewnienia zasobów ludzkich, technicznych i materiałowych. Miejsca realizacji wraz z koniecznym osprzętem i zasilaniem określono jako infrastrukturę techniczną eksploatacji (basza eksploatacyjna). Infrastruktura ta zależna jest od rodzajów wykonywanych użytków i usług, i powinna być identyfikowana w skojarzeniu z tymi zadaniami. Analiza infrastruktury technicznej wymaga ponadto wydzielenia infrastruktury obcej w stosunku do badanej eksploatacji, ale mogącej wpływać na realizację obserwowanych procesów. Infrastruktura techniczna jest elementem zbioru obiektów technicznych  $OE_1$ :

$$ITM \in OE_1 : ITM = \langle ITU, ITO, ITE \rangle \quad (3.12)$$

gdzie: *ITU* – obiekty techniczne należące do infrastruktury użytkowej,  
*ITO* – obiekty techniczne należące do infrastruktury obsługowej,  
*ITE* – obiekty techniczne należące do infrastruktury otoczenia eksploatacji.

### **Człowiek w systemie eksploatacji – HE**

Ludzie zajmują najważniejsze miejsce w systemie eksploatacji, głównie ze względu na sprawczą rolę w łańcuchu działania oraz w otoczeniu eksploatacji. Można wyróżnić trzy grupy ludzi związanych bezpośrednio lub pośrednio z eksploatacją obiektu

$$HE \in OE_2 : HE = \langle H_1, H_2, H_3 \rangle \quad (3.13)$$

gdzie: *H*<sub>1</sub> – zbiór ludzi jako podmiotów działania w eksploatacji (być aktywny),  
*H*<sub>2</sub> – zbiór ludzi jako przedmiotów działania w eksploatacji (być pasywny),  
*H*<sub>3</sub> – zbiór ludzi w otoczeniu eksploatacji (być postronny).

Człowiek może zachowywać się w systemie eksploatacji w sposób poprawny (oczekiwany) lub niepoprawny, wywołujący zdarzenia niepożądane. Analiza zachowań człowieka w miejscu pracy (człowiek jako podmiot eksploatacji) leży w obszarze zainteresowań bezpieczeństwa i higieny pracy, a metody analizy, obserwacji i oceny błędów człowieka (THERP) są dobrze udokumentowane w literaturze przedmiotu [43, 78, 60, 134, 297].

W aktywnym działaniu człowieka wyróżnia się następujące fazy rozpoznawania i działania: wykrycie sytuacji wymagającej działania, diagnozy sytuacji, podjęcia decyzji i wykonania działania [297].

Jakość tych działań zależy od wielu czynników zarówno wewnętrznych (wykształcenie, doświadczenie, zdolności, motywacja, kultura, itp.), jak i zewnętrznych (warunki otoczenia naturalnego, stres, warunki współpracy itp.) [60, 134, 167].

Identyfikacja działania człowieka w eksploatacji powinna być skierowana na trzy obszary działań i zachowań:

- człowiek jako podmiot działania w eksploatacji (użytkownik, obsługownik):
  - poprawność działań jako procedur eksploatacyjnych (czas wykonania, dokładność, zgodność z zaleceniami),
  - błędy działania (brak działań, niezgodność czasowa, niepełność),
  - celowe i nieumyślne działania szkodliwe dla eksploatacji.
- człowiek jako przedmiot działania (pasażer, odbiorca usługi):
  - zgodność zachowań z regulaminem (zasadami) eksploatacji,
  - działania niepoprawne w eksploatacji (obojętne),
  - celowe i nieumyślne działania szkodliwe dla eksploatacji,
- człowiek w otoczeniu eksploatacji (osoba postronna):
  - celowe i nieumyślne działania szkodliwe dla eksploatacji.

Podana analiza i identyfikacja „człowieka” w eksploatacji odnosi się głównie do jego podmiotowej roli, jaką może odgrywać w procesie eksploatacji. Oprócz tego należy określić wpływ eksploatacji obiektu na człowieka w takim zakresie, jak możliwość

spowodowania: śmierci, urazów, zakłóceń w życiu, obniżenia komfortu życia czy doznania strat moralnych.

Działanie człowieka w eksploatacji należy rozpatrywać wieloaspektowo i powinno być określone w zakresie:

- poprawności działania (poprawne, błędne wykonywanie pracy, zachowań),
- skutków działania (katastrofalne, poważne, mało istotne, pomijalne),
- miejsca człowieka w eksploatacji i zasięgu oddziaływania na ten system (przypisanie człowieka do grup:  $H_1, H_2, H_3$  i zasięg oddziaływania na: technikę systemu działania, infrastrukturę systemu działania, infrastrukturę otoczenia, otoczenie naturalne).

### **Otoczenie naturalne eksploatacji obiektu – ON**

Otoczenie naturalne w eksploatacji technicznej rozumiane jest jako zbiór obiektów i procesów obiektywnie oddziałujących na eksploatację obiektu. Zalicza się tu: warunki klimatyczne i pogodowe, warunki geotechniczne, środowisko naturalne (powietrze, woda, gleba), obiekty natury ożywionej (zwierzyna, roślinność). Wpływ otoczenia na eksploatację zależny jest od rodzaju obiektu i intensywności czynników narażeniowych i jest obserwowany najczęściej w dłuższym horyzoncie czasowym [231, 263, 291].

Identyfikacja czynników mogących wpływać na eksploatację obiektu wymaga opisanie elementów otoczenia i rodzajów narażenia dla badanego obiektu:

$$ON \in OE_2 : ON = \langle N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 \rangle \quad (3.14)$$

gdzie:  $ON$  – otoczenie naturalne w eksploatacji,

$N_1$  – gleba, podłoże naturalne,

$N_2$  – atmosfera, powietrze,

$N_3$  – woda w ekosystemie,

$N_4$  – fauna w ekosystemie,

$N_5$  – flora w ekosystemie.

### **Proces eksploatacji – PE**

Proces eksploatacji jest funkcją przyporządkowującą zbiorowi czasów zbiór stanów eksploatacyjnych. W ujęciu systemowym proces jest relacją między stanami, a chwilami rozpoczęcia stanu. Każdy zidentyfikowany element systemu eksploatacji opisany jest zbiorem charakterystyk, które w trakcie eksploatacji są zmienne w czasie. W identyfikacji procesu kluczowym zadaniem jest określenie zbioru stanów i uzyskanie informacji o chwili zmiany stanów [305]. Jeśli przyjąć, że zbiór  $B$  jest przestrzenią stanów, to proces eksploatacji  $PE = B(t)$  jest zbiorem obserwacji stanów w ciągu czasu  $t: t \in \langle t, T \rangle, t > 0$ . Gromadzenie danych o przebiegu procesu wymaga podania informacji o stanie procesu i chwili zmiany tego stanu.

Stany eksploatacyjne są traktowane jako system podlegający dekompozycji. Pozwala to na podział stanów na podstany według różnych kryteriów zależnych od celu analizy. Najogólniejszy podział stanów eksploatacyjnych wiąże się z kryterium funkcjo-

nalności i zdadności technicznej. Wyróżnia się więc stany użytkowania i obsługiwanie, którym przypisuje się odpowiednio stany zdadności i niezdadności. Dalszy podział zależy od przyjętych celów badań, kryteriów dekompozycji i potrzeb.

Ze względu na zarządzanie eksploatacją istnieje konieczność podzielenia zbioru rozpatrywanych stanów na dwa zasadnicze zbiory odpowiadające: pożądanym procesom użytkowania, wymagającym obserwacji, a co najwyżej sterowaniu lub korekcji, oraz procesom niezgodnym z zamierzeniami użytkownika, wymagającym podejmowania decyzji i działań technicznych, organizacyjnych czy ekonomicznych. Stany te odpowiadają eksploatacyjnym stanom użytkowania i obsługiwanie:

$$B = \{BP, BZ\} \quad (3.15)$$

gdzie:  $B$  – zbiór stanów eksploatacji,

$BP$  – zbiór stanów poprawnej eksploatacji obiektu (użytkowanie),

$BZ$  – zbiór stanów zakłóconej eksploatacji obiektu (obsługiwanie).

Zmienność stanów eksploatacyjnych w czasie jest procesem eksploatacji:

$$PE \in OE_4 : PE = B(t) \quad (3.16)$$

gdzie:  $PE$  – proces eksploatacji,

Podział eksploatacyjny na zakłócone użytkowanie i zakłóconą eksploatację umożliwia bardziej precyzyjne przypisanie np. obsług profilaktycznych do stanu obsługiwanie, które są wykonywane intencjonalnie, na podstawie decyzji eksploatatora, a nie w sposób wymuszony na skutek uszkodzenia. Obsługi profilaktyczne są więc działaniami z zakresu zarządzania obiektem. Można stwierdzić, że obsługa profilaktyczna nie wynika z uszkodzenia i niezdadności obiektu, stanowi raczej zakłócenie procesu użytkowania niż jego przypadkowe przerwanie.

Identyfikacja i analiza procesu eksploatacji podporządkowana zarządzaniu eksploatacją powinna stanowić podstawę do tworzenia bazy danych użytecznej w okresie poprawnego funkcjonowania obiektu oraz bazy danych do zarządzania procesem obsługowym. Poniższa propozycja podziału procesu na poprawny i zakłócony podyktowana jest szerszym spojrzeniem na eksploatację. Podejście takie umożliwi poszerzenie spektrum analizy o elementy ekonomiczne i zarządzanie ryzykiem.

W identyfikacji procesów konieczne jest uwzględnienie przyczyn zmian stanów. Wykaz stanów, w jakich znajdują się elementy systemu, należy uzupełnić wówczas wykazem zdarzeń z możliwymi przyczynami ich zaistnienia.

### Poprawny proces użytkowania – PEP

Pożądane stany eksploatacji to wszystkie stany obiektu i systemu eksploatacji, w jakich zachodzi rzeczywiste lub potencjalne wykorzystanie obiektu, to znaczy, że istnieje możliwość realizacji funkcji obiektu

$$BP = \{x_i^F\}; x_i^F \in W^F \quad (3.17)$$

gdzie:  $BP$  – zbiór pożądaných stanów eksploatacyjnych (użytkowania),

$x_i^F$  – atrybut funkcjonalny  $i$ -tego elementu (stan funkcjonalny elementu),  
 $W^F$  – zbiór funkcji obiektu (systemu).

Poprawny proces eksploatacji jest funkcją  $PEP = BP(t)$ .

Zakończenie okresu przebywania obiektu w stanie poprawnego użytkowania wynika z uszkodzenia powodującego: niezdatność lub zmniejszenie efektywności działania ewentualnie na skutek podjęcia decyzji o przeprowadzeniu obsługi profilaktycznej.

### Zakłócony proces eksploatacji – PEZ

Zakłócony, niepożądany w eksploatacji proces wiąże się ze stanami, w których obiekt nie może spełniać założonej funkcji, podczas których muszą być podjęte działania przywracające tę zdolność lub wykonywane są działania diagnostyczne. Z punktu widzenia użytkownika stany zakłóconej eksploatacji oznaczają niezdatność lub zmniejszoną efektywność. Stan niezdatności obiektu przynosi straty z tytułu: przestoju (nie funkcjonowania), kosztów utrzymania lub przywrócenia zdadności, start zewnętrznych (zakłóceń, zniszczeń, odszkodowań itp.). Stany zakłóconego procesu eksploatacji to wszystkie te stany, w których funkcji obiektu nie można wykorzystać w pełnym zakresie

$$BZ = \{x_i^F\}; x_i^F \notin W^F \quad (3.18)$$

gdzie:  $BZ$  – zbiór stanów obsługiwanego,

$x_i^F$  – atrybut funkcjonalny  $i$ -tego elementu (stan funkcjonalny elementu),

$W^F$  – zbiór funkcji obiektu (systemu).

Zakłócony proces eksploatacji jest funkcją  $PEZ = BZ(t)$ . Działania, jakie muszą być podjęte w stanie zakłóconej eksploatacji stanowią proces przywracania zdadności, który obejmuje: rozpoznanie stanu niezdatności, diagnozowanie, podjęcie decyzji i wykonanie obsługi. Wymaga to zaangażowania zasobów materialnych, ludzkich, materiałowych i ekonomicznych oraz opracowania harmonogramu działań w czasie. Identyfikacja możliwych scenariuszy w obsługiwanym jest więc złożonym zadaniem, którego rozpoznanie wymaga każdorazowo sporządzenia dokumentacji pozwalającej na późniejszą analizę ilościową i jakościową [116, 227, 255].

## 3.4. Metoda opracowania modelu badawczego – MOD

Model badawczy oparty jest na wiedzy zgromadzonej podczas identyfikacji systemu i procesu eksploatacji obiektu. Elementami modelu badawczego są: cel badań (rezultaty badań) oraz model sytuacji eksploatacyjnej obiektu.

Opracowanie modelu badawczego wymaga przyjęcia uproszczeń modelowych do:

- utworzenia modelu badawczego systemu eksploatacji,
- utworzenia modelu badawczego procesu eksploatacji,
- przyjęcia metody badawczej,
- utworzenia zbioru miar oceny.

### 3.4.1. Model sytuacji eksploatacyjnej – MSEOM

Model sytuacji eksploatacyjnej opisuje relacja (3.19) zachodząca między obszarami a aspektami eksploatacji:

$$MSEOM : Y(MOBE, ASE) = MOBE \times ASE = \{\psi_j(t)\} \quad (3.19)$$

gdzie:  $Y(MOBE, ASE)$  – modelowa sytuacja eksploatacyjna elementów systemu eksploatacji opisana na zbiorze modeli obszarów i aspektów eksploatacji,  $\{\psi_j(t)\} \in RBE$  –  $j$ -ta miara oceny eksploatacji należąca do zbioru rezultatów badań,  
 $MOBE$  – model obszaru badań (technika systemu, człowiek, otoczenie, proces),  
 $ASE$  – aspekt eksploatacji (funkcjonalność, niezawodność, bezpieczeństwo, efektywność).

Tabela 3.2. Zestawienie przykładowych atrybutów obszarów badań  $MOBE$  w modelu  $MSEOM$

Obszar badań	Element obszaru badań	Grupy najważniejszych atrybutów
$OE_1 \rightarrow OT$ obiekty techniczne	$OM$ – badany obiekt mechaniczny	Dane identyfikacyjne, funkcja, wymiary, masa, rodzaj napędu, wydajność, stan techniczny, wartości graniczne atrybutów
	$ITU$ – infrastruktura techniczna użytkowania	Dane identyfikacyjne, funkcja, wymiary, masa, stan techniczny, wartości graniczne atrybutów
	$ITO$ – infrastruktura techniczna obsługi	Dane identyfikacyjne, funkcja, wymiary, masa, stan techniczny, wartości graniczne atrybutów
	$ITE$ – infrastruktura techniczna otoczenia	Dane identyfikacyjne, funkcja, wymiary, masa, stan techniczny, wartości graniczne atrybutów
$OE_2 \rightarrow HE$ ludzie w eksploatacji	$H_1$ – eksploatorzy	Płeć, wiek, stanowisko, wykształcenie, kwalifikacje, uprawnienia, okresy ważności uprawnień, staż pracy
	$H_2$ – ludzie jako przedmioty działania	Płeć, wiek, masa, relacja z obiektem badań
	$H_3$ – osoby postronne	Płeć, wiek, odległość od obiektu badań
$OE_3 \rightarrow ON$ otoczenie naturalne eksploatacji	$N_1$ – gleba, podłoże	Rodzaj i stan nawierzchni, pochylenie, krętość drogi, stan zagospodarowania, wartości graniczne atrybutów
	$N_2$ – atmosfera, powietrze	Temperatura, ciśnienie, wilgotność, zanieczyszczenia, wartości graniczne atrybutów
	$N_3$ – woda	Temperatura, prędkość przepływu, zanieczyszczenia, odległość od toru ruchu obiektu badań, wartości graniczne atrybutów
	$N_4$ – fauna	Rodzaj, siedliska, ilość w zasięgu oddziaływania obiektu badań, ruchliwość
	$N_5$ – flora	Rodzaj, ilość w zasięgu oddziaływania obiektu badań
$OE_4 \rightarrow PE$ proces eksploatacji	$PEP$ – poprawny proces eksploatacji	Stany użytkowania, zdarzenia jako zmiana stanu, czasy przebywania w wyróżnionych stanach użytkowania
	$PEZ$ – zakłócony proces eksploatacji	Stany obsługi, zdarzenia jako zmiana stanu, czasy przebywania w wyróżnionych stanach obsługi

Zakłada się, że modelowy obszar badań  $MOBE = f_{MOD}(OBE)$  jest modelowym opisem charakterystycznych obiektów i procesów w eksploatacji. Każdy obszar eksploatacji charakteryzowany jest atrybutami zmiennymi w czasie. Znajomość tych atrybutów pozwala na przyporządkowanie każdemu elementowi systemu eksploatacji charakterystyki wyróżnionej ze zbioru  $ASE$  aspektów eksploatacji. Wyróżnione atrybuty charakteryzujące obserwowane elementy obszarów badań w sposób jednoznaczny ze względu na cel badań stanowią modelowy opis tych elementów. Zestawienie przykładowych atrybutów modeli obszarów badań przedstawiono w tabeli 3.2.

### 3.4.2. Wyniki badań – *RBE*

Oczekiwany wynikami badań jest zbiór miar oceny obiektu w eksploatacji. Rodzaje miar są podporządkowane oczekiwaniom odbiorcy i w zależności od celu badań muszą być zgodne ze sposobem ich wykorzystania. Typologia badań naukowych podaje trzy główne rodzaje badań [245]: podstawowe, stosowane, wdrożeniowe, a dalej określa sposób prowadzenia badań jako: planowany eksperyment, obserwacje w naturalnych lub intensyfikowanych warunkach eksploatacji oraz badania przyspieszone. Opisująca metodyka dotyczy w zasadzie badań wdrożeniowych prowadzonych w naturalnych warunkach eksploatacji. Wykorzystanie wyników badań polega na uwzględnieniu ich w bieżącym zarządzaniu eksploatacją bądź też, na etapie wnioskowania o przydatności obiektu, jego modernizacji lub w celu dostosowania systemu eksploatacji do efektywnej eksploatacji obiektu. Miary oceny mogą mieć postać miar prostych, złożonych, funkcji lub wskaźników opartych na ocenie efektywności, niezawodności, bezpieczeństwa, jakości i kosztach [6, 31, 106, 217, 218, 252]. We wspomnianym zarządzaniu eksploatacją i ryzykiem w systemach technicznych duże znaczenie mają też metody oceny jakościowej, takie jak: HAZOP, FMEA/FMECA, FTA, ETA [4, 6, 125, 218].

## 3.5. Metoda opracowania modułu badawczego – *MBE*

Moduł badawczy obejmuje zbiór metod analitycznych i syntetycznych, których celem jest opracowanie części operacyjnej badań oraz ich realizacja. Badanie eksploatacyjne obiektu mechanicznego w naturalnych warunkach opisuje (3.2): cel badań, metoda badawcza, system badawczy, program badawczy oraz rezultaty badań. Określenie tych składników badań pozwala na wdrożenie badań i uzyskiwanie wyników zgodnych z celem i wymaganiami odbiorcy.

### 3.5.1 Metoda badawcza – *MET*

W badaniach naukowych wyróżnia się wiele metod badawczych, które klasyfikuje się według kryteriów zależnych od postawionego celu badań. Do najczęściej stosowanych określonych metod badawczych w obszarze eksploatacji technicznej zalicza się badania [106, 245]:



- podstawowe, stosowane, poznawcze,
- określające, sprawdzające, porównawcze, zgodności,
- naturalne, intensyfikowane, przyspieszone,
- polowe, laboratoryjne, eksperymentalne,
- zależne od: intensywność eksploatacji, liczby obiektów, czasu obserwacji,
- jakościowe, ilościowe,
- diagnostyczne, predyktywne,
- przekrojowe (poprzeczne, warstwowe), ciągłe (podłużne), półciągłe,
- pełne (próba losowa: populacja nieskończona, czas trwania, koszt badań, niszczenie obiektów), częściowe (dane ucięte: do określonej liczby zdarzeń, do określonego czasu),
- ograniczone w czasie (ograniczone czasem kalendarzowym, czasem użytkowania, ilością wykonanej pracy, przebiegiem, liczbą zdarzeń: zdarzeń, uszkodzeń, napraw).

Badania eksploatacyjne obiektów mechanicznych realizuje się najczęściej w naturalnych, nieintensyfikowanych warunkach eksploatacji. Są to badania o charakterze stosowanym i poznawczym, długotrwałe, realizowane na próbach lub populacjach obiektów. W zależności od liczności jednorodnych obiektów tworzących próbę badawczą obserwacje prowadzi się metodą próby ciągłej lub warstwowej. Uzyskane dane są zwykle danymi cenzurowanymi (uciętymi).

Metoda badawcza określa zbiór sposobów działania zmierzających do osiągnięcia celu badawczego. Działania te są uwarunkowane ograniczeniami, które w odniesieniu do obserwacji eksploatacyjnych zależą od:

- sposobu obserwacji obiektu,
- okresu obserwacji (chwila rozpoczęcia, czasu trwania i warunki zakończenia badań),
- dostępnych zasobów ludzkich, materialnych i finansowych,
- zasięgu i ilości informacji WE–WY w planowanym okresie badań,
- poziomu szczegółowości (dekompozycji) systemu i procesu eksploatacji.

Metodę badawczą zdefiniowano w postaci trójki:

$$MET = \langle RBAD, OINF, RBI \rangle \quad (3.20)$$

gdzie: *MET* – metoda badawcza,

*RBAD* – sposób realizacji badań eksploatacyjnych,

*OINF* – zakres informacji i sposób jej obiegu,

*RBI* – relacje między sposobem realizacji badań a obiegiem informacji.

Elementami proponowanej metody badań są powyższe elementy wymagające dyskusji i podjęcia decyzji na wstępie badań. W celu opracowania wykonawczego modułu badawczego należy określić:

- ograniczenia czasowe badań:
  - chwila rozpoczęcia badań,
  - chwila zakończenia badań,
  - chwila modyfikacji badań,

- wielkość próbki badawczej:
  - obiekt jednostkowy,
  - małoliczna próbka obiektów ( $n < 30$ ),
  - liczna, jednorodna próbka obiektów ( $n \geq 30$ ),
  - liczna, niejednorodna próbka obiektów ( $n \geq 30$ ),
- rodzaj obserwacji:
  - obserwacja metodą stałego kroku czasowego lub kolejnych zdarzeń,
  - metoda próby ciągłej,
  - metoda próby warstwowej,
- źródła danych wejściowych:
  - dane identyfikacyjne obiektów technicznych, ludzi, infrastruktury,
  - dane o bieżącym stanie obiektu,
  - dane o zdarzeniach,
  - dane o modyfikacjach, przebudowach obiektu,
- sposób gromadzenia danych źródłowych:
  - dokumenty eksploatacyjne obiektu,
  - dokumenty badawcze,
  - formularze komputerowe,
  - cyfrowy zapis danych (pamięć masowa),
- sposób przesyłania i archiwizacji danych:
  - korespondencja tradycyjna,
  - przesył internetowy,
  - zdalny przesył radiowy (GPRS),
- rodzaj systemu bazy danych:
  - relacyjna baza danych,
  - hierarchiczna bazy danych,
- sposób przetwarzania danych:
  - tradycyjny „ręczny” (ew. wspomagany podstawowymi informatycznymi aplikacjami kalkulacyjnymi),
  - wykorzystanie komercyjnych pakietów wspomagających (statystyczne, zarządzanie),
  - przetwarzanie w systemie bazy danych,
- sposób przetwarzania danych i rozpowszechniania wyników:
  - zadaniowe generowanie wyników na żądanie,
  - zdarzeniowe generowanie wyników (raport w wyniku zajścia zdarzenia),
  - okresowe generowanie wyników,
  - ciągle generowanie wyników.

### 3.5.2. System badawczy – SBE

System badawczy obejmuje: zespół badawczy (zespół ludzki) oraz zasoby materialne i intelektualne badań niezbędne do ich realizacji (3.21). Zespół ludzi prowadzących badania dzieli się w zależności od relacji zespołu do eksploatorów na grupę bezpośrednio zaangażowaną w zbieranie danych oraz grupę nadzorującą badania

w zakresie poprawności archiwizacji i przetwarzania danych. Jeśli badania prowadzą eksploataccy, wówczas nie stosuje się formalnego podziału kompetencji. Baza badawcza, to głównie pomieszczenia przeznaczone na przechowywanie dokumentacji, sprzętu komputerowego, diagnostycznego, itp.

$$SBE = \langle ZL, DOK, BAZ, KOMP, RWB \rangle \quad (3.21)$$

gdzie: *SBE* – system badawczy eksploatacyjnego,  
*ZL* – zespół badawczy,  
*DOK* – zbiór wzorów dokumentów, nośników danych, wzory wyników i instrukcji wykonawczych dla personelu badawczego,  
*BAZ* – baza badawcza (baza lokalowa),  
*KOMP* – sprzęt komputerowy i oprogramowanie,  
*RWB* – struktura organizacyjna i sprzężenia między elementami systemu.

Planując badania ze wsparciem techniki komputerowej, należy zapewnić sprzęt komputerowy oraz oprogramowanie do archiwizacji, przechowywania i przetwarzania danych. Obecnie, najczęściej wykorzystywanymi bazami danych są relacyjne bazy danych, które pozwalają na łatwe i szybkie wyszukiwanie informacji. Jednakże w sytuacji prowadzenia długotrwałych obserwacji i zgromadzenia dużych zbiorów danych może wystąpić problem szybkiego dotarcia do wymaganych informacji. Można wówczas rozważyć zbudowania hurtowni danych i ich przetwarzania, korzystając z techniki OLAP (*On Line Application Processing*) pracującej na wstępnie pogrupowanych danych tworzących wielowymiarowe bazy danych (*Data Cubes*) [70, 224, 311].

Organizacja systemu badawczego wymaga ponadto zapewnienia zasobów finansowych na pokrycie: pracy ludzi, kosztów lokalowych, dojazdów, energii, zakupu sprzętu komputerowego i oprogramowania, materiałów poligraficznych itp.

### 3.5.3. Program badawczy – *PBE*

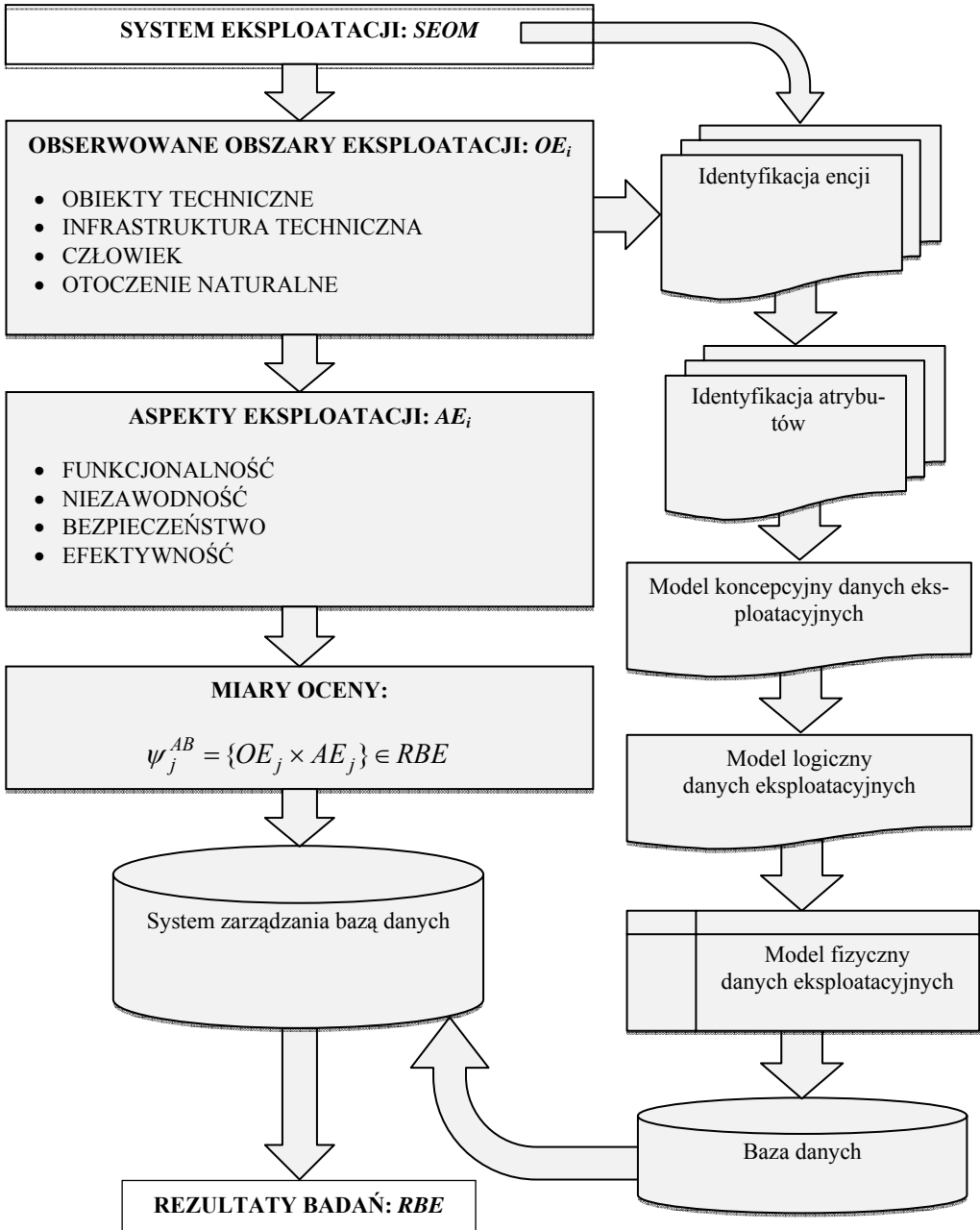
Program badawczy precyzuje rozkład zadań zespołu badawczego w czasie. Do najważniejszych zadań badawczych należy: organizacja badań oraz ich realizacja. Efektem opracowania programu badawczego jest harmonogram badań

$$PBE = \langle ZAD, TPB, RWB \rangle \quad (3.22)$$

gdzie: *PBE* – program badawczy,  
*ZAD* – wykaz zadań badawczych,  
*TPB* – czas realizacji zadań,  
*RWB* – relacje w programie badań (harmonogram).

Szczegółowy program badawczy obejmuje następujące etapy działania:

- utworzenie zespołu badawczego,
- ustanowienie bazy badawczej,
- analiza *SEOM*,
- opracowanie metody badawczej na podstawie *MSEOM*,
- opracowanie modułu badawczego,
- opracowanie dokumentacji badawczej, formularzy, instrukcji,



Rys. 3.4. Realizacyjny schemat metodyki badań eksploatacyjnych

- opracowanie programu i przeprowadzenie szkoleń personelu badawczego,
- inicjacja badań, zbieranie danych,
- nadzór, zarządzanie przetwarzaniem i dystrybucja wyników
- zakończenie badania i podsumowanie.

### 3.5.4. Wdrożenie systemu badań – *WSB*

Wdrożenie systemu badań *WSB* dokonuje się poprzez uruchomienie procedury pozyskiwania danych charakteryzowanej przez piątkę:

$$WSB = \langle DOKW, SZK, ZGI, WER, RWB \rangle \quad (3.23)$$

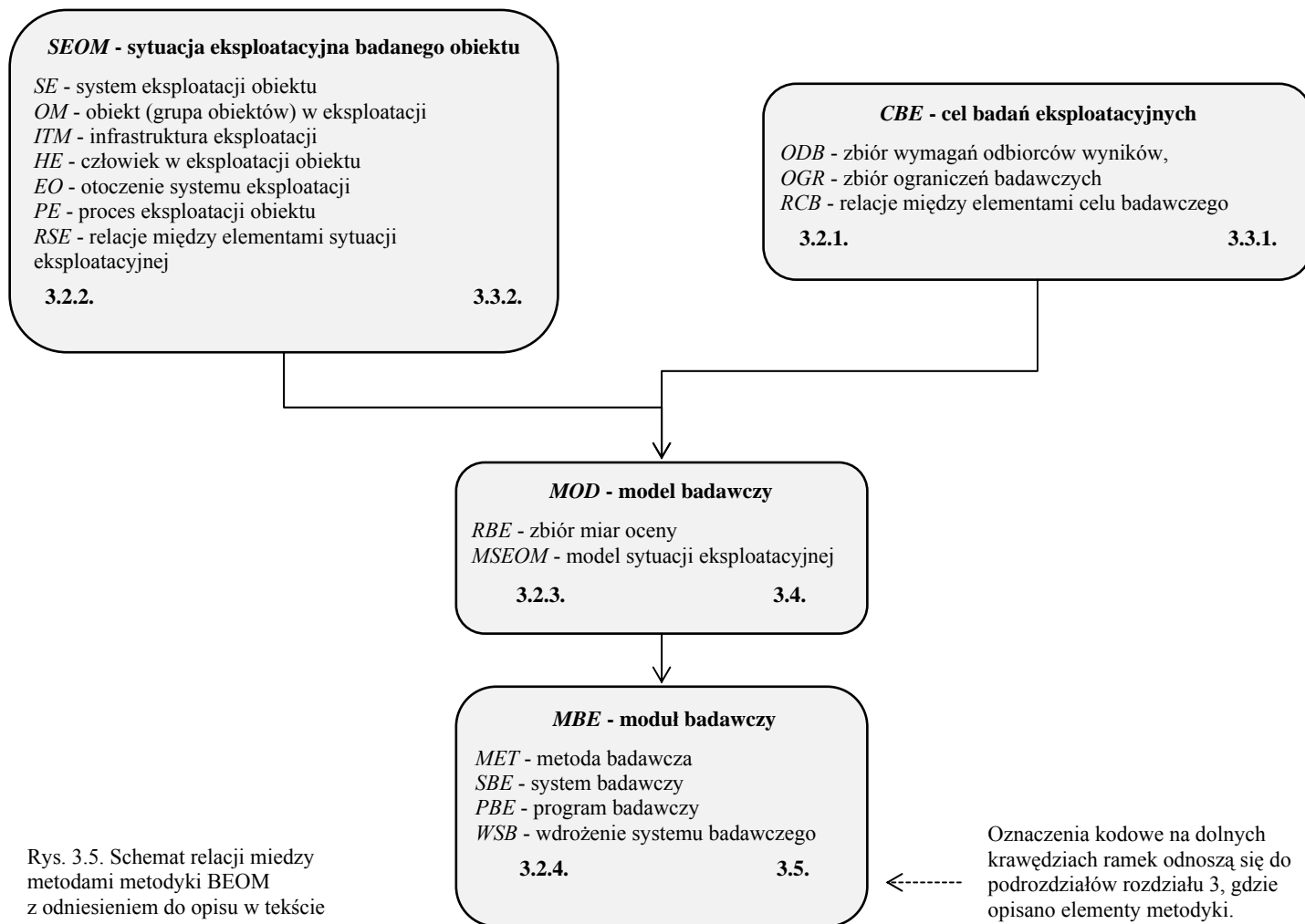
- gdzie: *WSB* – wdrożenie systemu badań,  
*DOKW* – zbiór dokumentów, nośników danych i instrukcji wykonawczych dla personelu badawczego,  
*SZK* – szkolenia i konsultacje dla personelu badawczego,  
*ZGI* – procedury rutynowego zbierania i gromadzenia danych, komunikacja i wymiana informacji w badaniach,  
*WER* – procedury nadzoru i weryfikacji poprawności przebiegu badań i danych  
*RWB* – relacje między elementami wdrożenia badań.

Zasadniczy, operacyjny trzon badań eksploatacyjnych przebiega w sekwencji zdarzeń:

- powstanie zdarzenia eksploatacyjnego,
- obserwacja, pozyskanie danych, rejestracja danych,
- weryfikacja, archiwizacja danych,
- przetwarzanie danych,
- wykorzystanie wyników.

Realizacja badań powinna być zgodna z przyjętym modelem badawczym i schematem przepływu informacji przedstawionym na rys. 3.2. Realizacyjny schemat metodyki sprzężony z informatycznym nurtem przygotowania badań przedstawiono na rys. 3.4.

Na rysunkach 3.5 i 3.6a i b zestawiono wszystkie metody metodyki *BEOM* z odniesieniem do opisów w tekście pracy.



Rys. 3.5. Schemat relacji między metodami metodyki BEOM z odniesieniem do opisu w tekście

**SEOM – sytuacja eksploatacyjna obiektu mechanicznego (3.3.2)**

*OBE* – obszar badań eksploatacyjnych

*OM* – obiekt mechaniczny

*ITM* – Infrastruktura techniczna eksploatacji

*ITU* – obiekty techniczne infrastruktury użytkowej

*ITO* – obiekty techniczne infrastruktury obsługowej

*ITE* – obiekty techniczne infrastruktury otoczenia ekspl.

*HE* – człowiek w eksploatacji obiektu

$H_1$  – zbiór ludzi jako podmiotów działania

$H_2$  – zbiór ludzi jako przedmiotów działania

$H_3$  – zbiór ludzi w otoczeniu eksploatacji

*ON* – otoczenie naturalne eksploatacji

$N_1$  – gleba, podłoże naturalne

$N_2$  – atmosfera, powietrze

$N_3$  – woda w ekosystemie

$N_4$  – fauna w ekosystemie

$N_5$  – flora w ekosystemie

*PE* – proces eksploatacji

*PEP* – poprawny proces użytkowania

*PEZ* – zakłócony proces eksploatacji

**OBE – obszar badań eksploatacyjnych (3.3.2)**

$OE_1 \rightarrow OT$  – obiekty techniczne

$OE_2 \rightarrow HE$  – człowiek w eksploatacji

$OE_3 \rightarrow ON$  – otoczenie naturalne eksploatacji

$OE_4 \rightarrow PE$  – proces eksploatacji

$OT = \{OM, ITM\}$ ,

*OM* – obiekt mechaniczny jako przedmiot badania

*ITM* – obiekty infrastruktury technicznej obiektu badań

**MSEOM – modelowa sytuacja eksploatacyjna badanego obiektu (3.4.1)**

$MSEOM : \Psi(MOBE, ASE) = MOBE \times ASE = \{\psi_j(t)\}$

$MOBE = f_{MOD}(OBE)$  – model obszaru badań (technika systemu, człowiek, otoczenie, proces)

*ASE* – aspekt eksploatacji (funkcjonalność, niezawodność, bezpieczeństwo, efektywność)

**ASE – aspekty eksploatacji (3.3.1)**

$AE_1 \rightarrow FUN$  – miary oceny funkcjonalności

$AE_2 \rightarrow NIEZ$  – miary oceny niezawodności

$AE_3 \rightarrow BEZ$  – miary oceny bezpieczeństwa

$AE_4 \rightarrow EFE$  – miary oceny efektywności

Rys. 3.6a. Metody składowe metodyki BEOM z odniesieniem do opisów w tekście.  
Oznaczenia kodowe obok nazw metod odnoszą się do podrozdziałów rozdziału 3, gdzie opisano je szczegółowo

***MET* – metoda badawcza (3.5.1)**

*RBAD* – sposób realizacji badań eksploatacyjnych

***SBE* – system badawczy (3.5.2)**

*ZL* – zespół badawczy,  
*DOK* – zbiór wzorów dokumentów, nośników danych, wzory wyników i instrukcji wykonawczych dla personelu badawczego  
*BAZ* – baza badawcza (baza lokalowa)  
*KOMP* – sprzęt komputerowy i oprogramowanie  
*RWB* – struktura organizacyjna i sprzężenia między elementami systemu

***PBE* – program badawczy (3.5.3)**

*ZAD* – wykaz zadań badawczych  
*TPB* – czas realizacji zadań

***WSB* – wdrożenie systemu badań (3.5.4)**

*DOKW* – zbiór dokumentów, nośników danych i instrukcji wykonawczych dla personelu badawczego  
*SZK* – szkolenia i konsultacje dla personelu badawczego  
*ZGI* – procedury rutynowego zbierania i gromadzenia danych, komunikacja i wymiana informacji w badaniach  
*WER* – procedury nadzoru i weryfikacji poprawności przebiegu badań i danych

Rys. 3.6b. Metody składowe metodyki *BEOM* z odniesieniem do opisów w tekście. Oznaczenia kodowe obok nazw metod odnoszą się do podrozdziałów rozdziału 3, gdzie opisano je szczegółowo

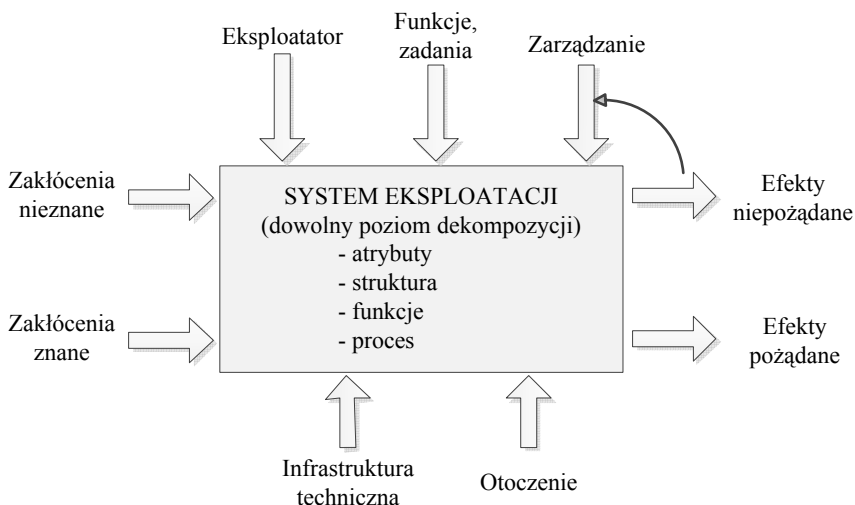


## 4. Modelowanie eksploatacji obiektów mechanicznych

### 4.1. Modelowanie obiektu mechanicznego w systemie i procesie eksploatacji

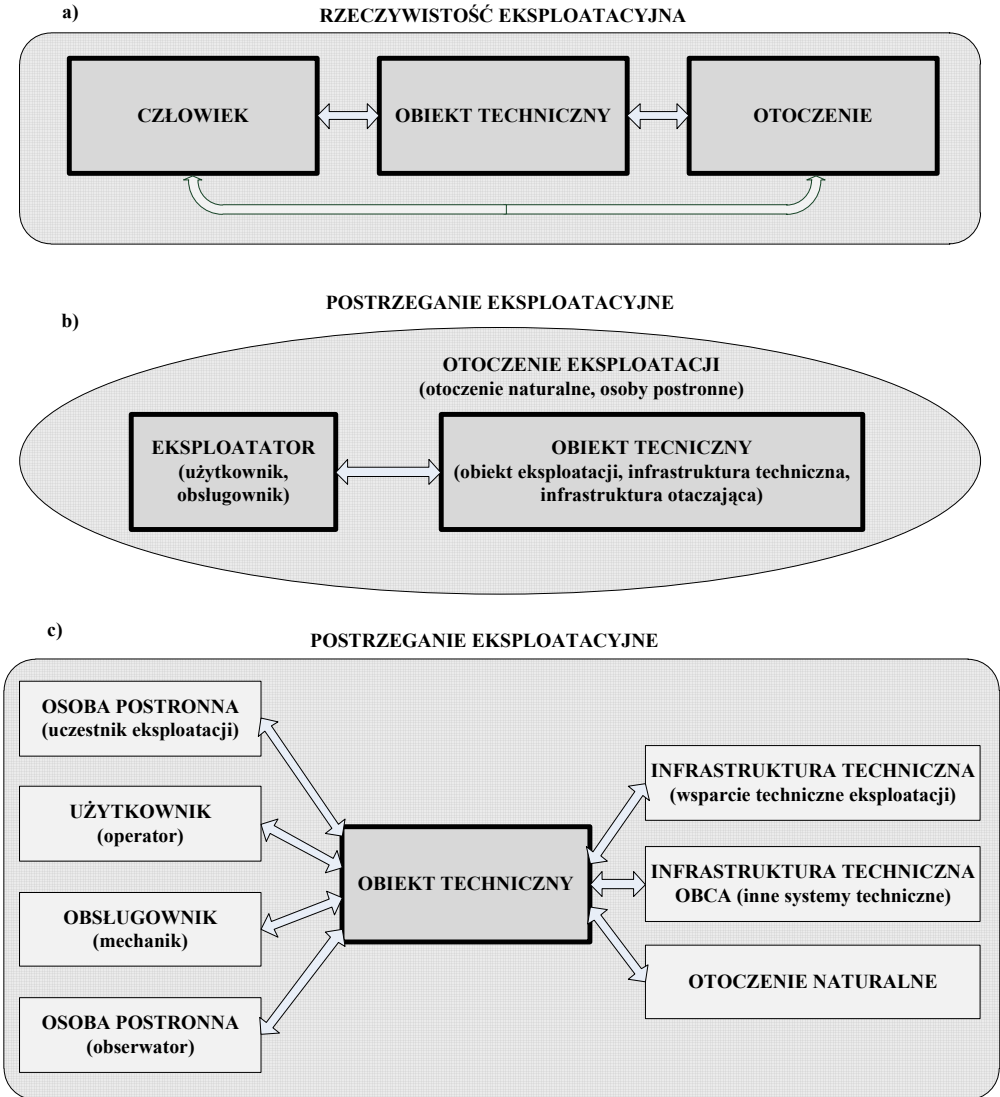
Rzeczywistość eksploatacyjna jest definiowana jako wielopłaszczyznowe współdziałanie człowieka z obiektem technicznym, w pewnym środowisku zewnętrznym, na gruncie techniki, organizacji i ekonomii, w celu spełnienia określonej potrzeby lub osiągnięcia zamierzonych korzyści [112, 114, 257]. Uzyskiwane korzyści są wynikiem realizacji funkcji obiektu zaprojektowanego, a następnie zmaterializowanego w procesie wytwarzania [31, 72, 112, 310].

Na rysunku 4.1 przedstawiono schemat postrzegania obiektu badań w kontekście systemu i procesu eksploatacji oraz sprzężenie z systemem zarządzania zapewniające przepływ informacji o zakłóceniach działania. Każdy z wykazanych czynników oddziałujących na system oraz odpowiedzi systemu należy rozpatrywać w eksploatacji obiektów mechanicznych jako zmienne losowe [26].



Rys. 4.1. Postrzeganie obiektu eksploatacji jako systemu

Ocena i zarządzanie eksploatacją wymaga obserwacji działania obiektu, współdziałających z nim ludzi oraz otoczenia technicznego i naturalnego (rys. 4.2a). Biorąc pod uwagę trzy najważniejsze elementy tego układu: człowieka, obiekt techniczny i otoczenie, można te elementy zgrupować w dwie kategorie postrzegania, w zależności od przyjętego kryterium klasyfikacji: eksploatacyjnego i obiektowego (rys. 4.2b i c).



Rys. 4.2. Postrzeganie eksploatacji obiektu mechanicznego

**Kryterium eksploatacyjne** (rys. 4.2b) wyróżnia dwa główne elementy eksploatacji: człowieka, jako sprawcę działania oraz w relacji z nim obiekt działania w ogólnie

pojętym otoczeniu [114, 227, 236, 257, 292]. Postrzeganie eksploatacyjne odpowiada zadaniowej kategoryzacji elementów.

**Kryterium obiektowe** (rys. 4.2c) wyróżnia w systemie eksploatacji różnego rodzaju obiekty (encje): obiekty techniczne oraz inne obiekty, w tym człowieka i elementy środowiska naturalnego. Zarówno człowiek, jak i obiekt techniczny oraz otoczenie, to nie pojedyncze elementy systemu eksploatacji, a zazwyczaj grupy obiektów. Człowiek nie występuje w eksploatacji tylko jako użytkownik czy obsługownik, ale także jako pasażer środka transportu, klient w punktach usługowych, przechodzień czy spacerowicz nie związany bezpośrednio z obiektami eksploatacji, jednak mogący wpływać na przebieg tej eksploatacji nieświadomie lub świadomie. Osoby postronne mogą być także potencjalnymi poszkodowanymi w przypadku uszkodzenia systemu technicznego lub też sprawcami awarii systemu. Podobnie otoczenie eksploatacji należy zróżnicować jako aktywnie biorące udział w eksploatacji lub bierne otoczenie naturalne, także mogące wpływać na eksploatację [154, 321, 334].

W najszerszym postrzeganiu eksploatacji należy wyróżnić następujące encje:

- człowiek, jako użytkownik,
- człowiek, jako obsługownik,
- człowiek, jako osoba postronna, ale biorąca udział w eksploatacji,
- człowiek, jako osoba postronna niezwiązana bezpośrednio z eksploatacją, jednak potencjalnie wpływająca na eksploatację poprzez jego relację z otoczeniem eksploatacji,
- obiekt techniczny, jako pośrednik lub przedmiot działania,
- otoczenie, jako infrastruktura techniczna niezbędna do realizacji eksploatacji (infrastruktura użytkowania i obsługi), tzw. wsparcie logistyczne eksploatacji,
- otoczenie, jako infrastruktura techniczna nie biorąca udziału w eksploatacji,
- otoczenie, jako środowisko naturalne.

Kryterium obiektowe dzieli elementy systemu eksploatacji na dwie grupy: **obiekty systemowe** (encje) pojmowane ogólnie (człowiek, obiekt techniczny, otoczenie) oraz **obiekty eksploatacyjne** mające istotne znaczenie dla eksploatacji (system eksploatacji, łańcuch eksploatacji, otoczenie eksploatacji). Szczegółowy wykaz elementów eksploatacji tak klasyfikowanych przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Klasyfikacja encji uwzględnianych w eksploatacji

Kryterium klasyfikacji		Obiekty eksploatacji		
		baza eksploatacyjna	łańcuch eksploatacji	otoczenie eksploatacji
Obiekty systemowe	Człowiek	Uczestnik eksploatacji, pasażer jako ładunek	Użytkownik, obsługownik	Osoba postronna związana z eksploatacją poprzez jej relację z otoczeniem
	Obiekt techniczny	Infrastruktura techniczna niezbędna do realizacji eksploatacji, ładunek	BADANY OBIEKT MECHANICZNY	Infrastruktura techniczna nie biorąca udziału w eksploatacji
	Otoczenie	Środowisko (warunki geometeorologiczne)	Otoczenie łańcucha eksploatacji	Środowisko naturalne

## 4.2. Identyfikacja obiektów w systemie eksploatacji

W modelowaniu obiektowym każdy obiekt wyróżniony w analizowanej rzeczywistości traktowany jest jako encja (byt), któremu przypisuje się zbiór atrybutów (właściwości) i relacji (związków). Pojęcie atrybutu jest definiowane wielorako i zależnie od podejścia obiektowego lub funkcjonalnego atrybuty encji opisują chwilowy stan encji (systemu) [45, 101, 135, 321] lub używane są jako odpowiednik właściwości obiektu. W odniesieniu do szerzej pojętych właściwości definiuje się także: atrybuty opisujące trwałe fizyczne lub funkcjonalne cechy obiektu, właściwości opisujące wielkości wymiarowe i materiałowe oraz charakterystyki odnoszące się do zmienności parametrów funkcjonowania obiektu [321]. Związki zachodzące między encjami, w zbiorze obiektów, określane są jako struktury obrazujące powiązania, zależności i wzajemny wpływ. Podejście obiektowe pozwala na uwzględnienie w stosunku do analizowanego systemu takich właściwości, jak: dziedziczenie cech między systemem i podsystemem, ich agregację i segmentację, co w konsekwencji prowadzi do uproszczenia analizy systemu na różnych poziomach dekompozycji. Atrybuty są wyróżnikami danego obiektu spośród innych podobnych obiektów.

Parametryczną definicją obiektu mechanicznego  $OM$  (encji, systemu) uwzględniającą jego budowę hierarchiczną i właściwości jest definicja w postaci uporządkowanej trójki (4.1) [85, 92, 101]:

$$OM = \langle E, W, R \rangle \quad (4.1)$$

gdzie:  $E = \{e_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  – zbiór elementów (podsystemów, komponentów),

$W = \{w_{is}\}$ ,  $s = 1, 2, \dots, m_i$  – zbiór wyróżnionych właściwości (atrybutów) elementów,

$R = \{R_l(e_i)_{is}\}$ ,  $l = 1, 2, \dots, r_i$  – zbiór relacji przypisanych do zbioru właściwości elementów.

Każdemu elementowi  $e_i$  przypisuje się zbiór atrybutów (4.2) charakteryzujących właściwości tego elementu, które w ogólności mogą być zmienne w czasie

$$W(e_i(t)) = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{is}, \dots, w_{im_i})(t) \quad (4.2)$$

gdzie  $w_{is}$  –  $s$ -ty atrybut  $i$ -tego elementu.

Atrybuty podobnie do obiektów są traktowane systemowo, w związku z czym podlegają dekompozycji i agregacji. Atrybuty na wyższych poziomach złożoności są atrybutami złożonymi, uogólniającymi w stosunku do atrybutów charakteryzujących elementy niższego poziomu [47]. Atrybuty na najniższym wyróżnionym poziomie dekompozycji opisują pierwotne i wtórne cechy elementów, pozwalając na ich ocenę funkcjonalną i niezawodnościową [33]. Określenie *najniższy poziom dekompozycji* jest tu pojęciem umownym i często dyskusyjnym, gdyż w myśl systemowego podejścia do rzeczywistego obiektu każdy poziom złożoności może być systemem w stosunku do pewnych elementów składowych. Powoduje też trudności w strukturyzacji i opisie

obiektów, dla których hierarchizacja może nie być równomierna w poszczególnych poziomach dekompozycji.

W identyfikacji obiektów w badaniach eksploatacyjnych obserwuje się trudności w określeniu pełnej taksonomii obiektu. Wynika to z kilku przyczyn związanych z dostępem do informacji, poufnością danych, konkurencją czy względami natury technicznej, takimi jak: niezbędna ilość czas utworzenia elektronicznego zapisu danych czy wielkość bazy danych. W naturalnej obserwacji obiektów w eksploatacji interesujące są zdarzenia związane z przebiegiem tej eksploatacji, które najogólniej, są zjawiskami losowymi o nieznanym naturze. Celem badań jest właśnie określenie dominujących zdarzeń i zjawisk, ich wzajemnych związków i zbadanie ich wpływu czy oddziaływania na proces decyzyjny.

W praktyce eksploatacyjnej często zachodzi potrzeba identyfikowania elementów złożonego obiektu technicznego, a końcowym użytkownikom nie dostarcza się zwykle katalogów obiektu ze względu na interes serwisów technicznych, czy ochronę praw własności intelektualnej dotyczącą rozwiązań technicznych.

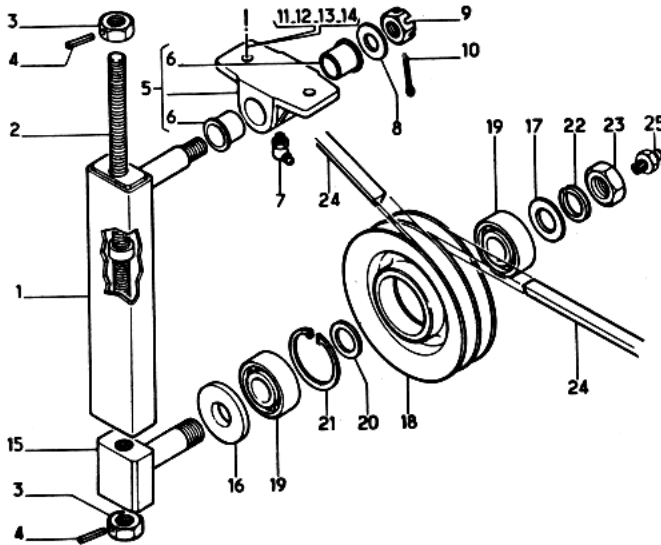
Opis miejsca elementów w strukturze obiektu staje się istotny, jeśli złożoność obiektu jest znaczna, tj. obiekt tworzą setki lub tysiące elementów lub też, jeśli znajomość położenia nie jest wymagana dla wszystkich elementów. Konieczność zidentyfikowania elementu obiektu pojawia się każdorazowo, w chwili, gdy element ten dostarcza informacji eksploatacyjnej wymagającej od użytkownika podjęcia określonych działań, jak np.: zidentyfikowanie uszkodzonego elementu, wskazanie układu niespełniającego wymagań użytkowych, czy zamawianie elementów wymiennych.

W badaniach eksploatacyjnych koparki wielonaczyniowej SRs-2000 uszkodziło się tylko 86 elementów na 260 zidentyfikowanych modułów głównych na 3 poziomach dekompozycji [85]. Podobne obserwacje wystąpiły w badaniach ładowarki budowlanej i kopalnianej, gdzie pojawiło się 259 elementów spośród zapisanych w katalogu 3334 modułów [84, 163, 164]. Przykłady te pokazują nadmiarowość tradycyjnych katalogów obiektów w stosunku do potrzeb eksploatacyjnych.

Jeśli obiektem obserwacji jest obiekt mechaniczny, składający się z kilku tysięcy elementów, to pojawia się problem efektywności opracowania struktury konstrukcyjnej takiego obiektu w systemie badań. Zagadnienie to nie jest stosunkowo trudne, gdy producent czy projektant przekazuje eksploatacatorowi wykaz elementów i ich położenie w strukturze dekompozycyjnej w postaci umożliwiającej wykorzystanie tej informacji w opracowaniu systemu gromadzenia danych. W przypadku braku takiej dokumentacji, obiektu o dużej złożoności lub badaniu obiektów niejednorodnych można przyjąć dwa podejścia:

- opracowanie dla obiektu badań pełnej relacji: element-kod dekompozycyjny:  $\{e - R - K\}$  na podstawie dokumentacji technicznej producenta lub analizy technicznej obiektu,
- tworzenie relacji  $\{e - R(t) - K\}$  w miarę powstawania zdarzeń dotyczących poszczególnych elementów.

a)



b)

CHŁODZENIE, NAPINACZ PASA KLINOWEGO					13.25	
COOLING, BELT TENSIONER					1,2	VI-1378
No	NI	NAZWA CZĘŚCI		Q	V	Z
1	2	3		4	5	6
1	611 013 5012 691 094	PROSADNICA	GUIDE	1		
2	611 013 5017 731 706	ŚRUBA NAPINAJĄCA	TENSING SCREW	1		
3	171 0653 324 509 PN-75,74-82144	NAKRĘTKA M16x5-II CYNK	NUT M16x5-II ZINCED	2		* 214 111 045
4	171 0653 512 554 PN-74-85023	KOLEK SPRĘŻYSTY 6 x 24 CYNK	SPRING PLUG 6 x 24 ZINCED	2		* 221 501 020
5	611 013 5015 691 100	WSPORNIK NAPINACZA	TENSIONER BRACKET	1		
6	421 013 5049 23 411 348	TULEJKA "METAFARM"	SLEEVE "METAFARM"	2		
7	171 0918 370 054 PN-76,74-86003	SPAROWNICZKA St. M6x1/45 <sup>0</sup> LUB St 81/8"/45 <sup>0</sup>	GREASE NIPPLE St. M6x1/45 <sup>0</sup> St 81/8"/45 <sup>0</sup>	1		* 641 013 0062
8	171-0653 713 501 PN-67,74-82006	PODKŁADKA 17 CYNK	WASHER	1		* 21 166
9	171 0653 324 753 PN-74,74-82189	NAKRĘTKA KORDONIA A1 16x1,5-0,6-I CYNK	HEXAGON SLOTTED NUT A1 16x1,5-0,6-I ZINCED	1		* 300 165
10	171 0651 810 554 PN-76,74-82001	ZAWLECZKA S-3,2x26 CYNK	SPLIT PIN S-3,2x26 ZINCED	1		* 221 101 090
11	171 0653 311 942 PN-74,74-82106	ŚRUBA M6x25-6,6-II CYNK	SCREW M6x25-6,6-II ZINCED	2		* 211 151 062
12	171 0653 712 522 PN-67,74-87006	PODKŁADKA 8,4 CYNK	WASHER 8,4 ZINCED	2		* 21 162
13	171 0653 191 517 PN-77,74-82006	PODKŁADKA SPRĘŻYSTA 8,2 CYNK	SPRING WASHER 8,2 ZINCED	2		* 252 101 040
14	171 0653 322 550 PN-75,74-82144	NAKRĘTKA M6-5-II CYNK	NUT M6-5-II ZINCED	2		* 214 111 025
15	411 013 5040 756 324	WÓDZIK	SLIDER	1		
	411 013 5043 756 702	TARCZA OPOROWA	KEEP PLATE	1		

Rys. 4.3. Przykłady identyfikacji elementów w katalogu pojazdu [131]:

a) graficznej, b) tekstowej

Pierwsze podejście umożliwia pełną identyfikację elementów i w zależności od przyjętej technologii gromadzenia danych zapewnia co najmniej opis tekstowy elementu oraz jego identyfikację kodową (element\_nazwa, element\_id). Identyfikacja kodowa musi wówczas obejmować relację położenia elementu w strukturze obiektu. Taka identyfikacja obiektu jest jednak pracochłonna i wymaga zapisania, przechowywania i udostępniania znacznej ilości informacji (ograniczenia pamięci, procedury dostępu, składowanie katalogów). Nadmiarowość informacyjna polega na tym, że niezależnie od tego czy element systemu eksploatacji dostarczy informacji o zdarzeniu eksploatacyjnym, czy nie, to wymaga to zarchiwizowania informacji identyfikacyjnej o tym elemencie. Na rysunkach 4.3a i b pokazano przykład zespołu napinacza z katalogu pojazdu. Poszczególne elementy identyfikowane są graficznie lub opisem słownym oraz numerem kodowym składającym się z numeru układu, zespołu i elementu [227].

Drugie podejście opiera się na tworzeniu struktury obiektu tylko na podstawie elementów „dostarczających” wprost lub pośrednio informacji o zdarzeniach. Informacyjna struktura systemu tworzona jest stopniowo i modyfikowana wtedy, gdy pojawia się informacja o elemencie nieujętych jeszcze w strukturze. W przypadku kiedy wszystkie elementy systemu „dostarczą” informacji, wówczas uzyskuje się pełny opis identyfikacyjny systemu. Oczywiście jest, że wiedza o strukturze systemu jest znana, to znaczy, że znane są relacje każdego elementu z pozostałymi. Jednak nie jest wymagane formalne zapisanie tych relacji w systemie badań. Oszczędza to czas niezbędny do utworzenia struktury zawierającej niekiedy wiele tysięcy elementów.

Przyjęcie systemowego podejścia do budowy obiektu pozwala na jego dekompozycję do dowolnie wymaganego poziomu. W zależności od możliwości pozyskiwania informacji dekompozycja może przebiegać poprzez materię obiektu: układy, zespoły, podzespoły, elementy, węzły konstrukcyjne, pary kinematyczne, itd., a także przez funkcje główne, pomocnicze, zabezpieczające, informacyjne, komunikacyjne, nadmiarowe, awaryjne itd. [122, 128, 129, 221, 240].

Badania eksploatacyjne są zorientowane przede wszystkim na wyznaczenie miar i ocenę obiektu technicznego, eksploatowanego w określonym systemie eksploatacji według założonego procesu eksploatacji. Wynik oceny jest bezpośrednią informacją w procesie podejmowania decyzji eksploatacyjnych, czyli w zarządzaniu eksploatacją.

### 4.3. Struktura obiektu mechanicznego

Obiekt mechaniczny jako efekt działalności inżynierskiej jest wytworem spełniającym założone cele z uwzględnieniem wszelkich ograniczeń zewnętrznych wynikających z bieżącego stanu techniki, kultury i więzów ekonomicznych. Cykl życia obiektu obejmuje: wartościowanie potrzeb i rangowanie sposobów ich zaspokojenia, projektowanie i konstruowanie, wytwarzanie, eksploatację i kasację. Każda z wymienionych faz jest specyficznym zadaniem optymalizacyjnym, w którym zakładane do spełnienia cele są antagonistyczne w stosunku do istniejących warunków i ograniczeń [62, 240]. Do podstawowych wymagań stawianych maszynom zalicza się: funkcjonalność, od-

powiednią trwałość i niezawodność, dostępność tworzywa i technologii wytwarzania oraz montażu, efektywność i bezpieczeństwo w eksploatacji, a także zgodność z obowiązującymi normami [72]. Spełnienie tych wymagań wiąże się ze znaczną złożonością obiektu, przy czym za realizację nałożonych zadań cząstkowych odpowiedzialne są poszczególne elementy funkcjonalne, co łącznie daje zaspokojenie funkcji ogólnej. Różnorodne kryteria oceny obiektu wymagają wówczas różnego podejścia metodycznego normującego oceny według jednorodnych obszarów. W literaturze przedmiotu najczęściej mówi się o strukturach: procesu, funkcjonalnej, konstrukcyjnej, niezawodności [33, 112, 209, 217, 240, 263]. Opis struktur dokonywany jest analitycznie, poprzez diagramy, funkcje strukturalne, logiczne drzewa zdarzeń, macierzowo lub za pośrednictwem grafów i sieci.

Struktura uważana jest za relację stosunkowo stałą, układ między elementami pozwalający wydzielić się z otoczenia ze względu na tę stałość [62]. Jej pojęcie odnosi się do obiektów (encji, bytów) złożonych, o budowie hierarchicznej, przy czym obiektem można nazwać byt zarówno materialny, jak i niematerialny.

Funkcje obiektu określane są jako transformacje zachodzące w obiekcie między wejściową a wyjściową: materią, energią i informacją [112, 240, 281]. Stąd też, struktura odnosi się zarówno do obiektu materialnego, jak i zdarzeń, procesów, sygnałów itp. Struktura funkcjonalna jest określana jako organizacja systemu w czasie [217].

Modele normatywne [256] uznają stałość i niezmienność struktury obiektu, co można uznać za prawdziwe w krótkim przedziale czasu (w stosunku do czasu życia obiektu). Niemniej jednak przykłady obiektów technicznych w rzeczywistej, wieloletniej eksploatacji nie potwierdzają tej tezy [9].

Z przeglądu wielu definicji systemu wynika, że „najsłabszym punktem okazuje się uporządkowanie – ustalenie istnienia w systemie określonego porządku elementów, relacji i sprzężeń w budowie i funkcjonowaniu systemu” [287]. Autor powyższej definicji systemu proponuje też definicję struktury jako: *uogólnioną charakterystykę specyficznych własności systemowych, ustalającą w formie abstrakcyjnej elementy, relacje, sprzężenia systemu, ich uporządkowanie i organizację*. Skłania się więc w kierunku pojęcia struktury jako „charakterystyki ... ustalającej” bez wyraźnego uwzględnienia jej zmienności w czasie. Jednak można tę definicję, łącznie z komentarzem autora, interpretować jako dążenie systemu do stanu zapewniającego jego stabilność. W ujęciu kinetyki układów, struktury klasyfikuje się jako statyczne lub dynamiczne, których ewolucję wyznacza jednoznacznie stan początkowy [262].

Teoria struktury rozumiana jest też jako teoria grafów [145, 234] poprzez podobieństwo definicji, w których łuki reprezentują binarne relacje między wierzchołkami grafu (elementami struktury).

W definicji [177] strukturę ujmuje się jako *relacje między komponentami, które tworzą konkretną maszynę w danej przestrzeni*. Podobną definicję struktury systemu jako rozkładu elementów w przestrzeni podaje Modarres [217]. Wnioskiem z analizy wielu definicji struktury jest stwierdzenie, że opis systemu łącznie z relacjami między jego elementami odnosi się do struktury systemu, a nie do opisu jego organizacji rozumianej statycznie i niezmiennie.



W podanym ujęciu, struktura może być zdefiniowana jako relacja zachodząca między bytami (encjami) niższego i wyższego poziomu dekompozycji, natomiast atrybutami struktury są jej cechy określające elementy i relacje zachodzące między nimi. Strukturę  $\Psi$  stanowi zbiór bytów i relacji  $R$  między nimi:

$$\Psi(E) = \langle E, W, R \rangle \quad (4.3)$$

gdzie:  $\Psi(E)$  – struktura określona na  $n$ -elementowym systemie  $E$ ,

$E = \{e_1, \dots, e_i, \dots, e_n\}$ ,  $e_i$  –  $i$ -ty komponent systemu  $E$ ,

$W$  – zbiór atrybutów struktury,

$R = \{R_1, \dots, R_r\}$ ,  $R_j$  – relacja będąca podzbiorem iloczynu kartezjańskiego określona na zbiorze atrybutów elementów systemu opisująca powiązania międzyelementowe  $R_j \subseteq (W_1 \times W_2 \times \dots \times W_n)$ .

Analiza struktur systemów w badaniach eksploatacyjnych pozwala w efekcie końcowym na wyspecyfikowanie oczekiwań eksploatatora w stosunku do różnych aspektów eksploatacji *ASP*. W podanym ujęciu, w badaniach eksploatacyjnych na etapie modelowania, analizuje się i opisuje struktury: konstrukcyjną, funkcjonalną, niezawodności i bezpieczeństwa.

#### 4.3.1. Struktura konstrukcyjna obiektu mechanicznego

Struktura konstrukcyjna określa powiązanie materialnych komponentów połączonych ze sobą w celu spełnienia zadanej funkcji. Systemowo ujęta struktura to relacja (związek) określająca wzajemną przynależność elementów obiektu. Strukturę konstrukcyjną (4.4) można opisać bezpośrednio, korzystając z koncepcji dekompozycji systemu przedstawionej w rozdz. 4.2 (wzór (4.3)). Relacja  $R^K$  odwzorowuje wzajemne powiązania konstrukcyjne między materialnymi elementami obiektu (położenie w przestrzeni, wzajemne połączenie, przynależność, jednorodność, podobieństwo funkcjonalne itp.).

$$\Psi^K = \langle E, W^K, R^K \rangle \quad (4.4)$$

gdzie:  $\Psi^K$  – struktura konstrukcyjna obiektu mechanicznego,

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  – zbiór elementów konstrukcyjnych obiektu,

$W^K = \{W_1^K, W_2^K, \dots, W_n^K\}$  – zbiór atrybutów konstrukcyjnych elementów obiektu (wymiarowych, masowych, energetycznych, informacyjnych),

$W_i^K = \{W_{i1}^K, W_{i2}^K, \dots, W_{in}^K\} \in W^K$  – zbiór atrybutów konstrukcyjnych elementu (cech pierwotnych),

$R^K = \{R_1^K, R_2^K, \dots, R_{m_K}^K\}$  – zbiór relacji konstrukcyjnych obiektu,

$R_j^K \subseteq (W_1^K \times W_2^K \times \dots \times W_n^K)$  – relacja konstrukcyjna w obiekcie.

Strukturę konstrukcyjną można postrzegać w trzech kategoriach [112]:

- struktury przestrzennej, czyli rozmieszczenia komponentów w przestrzeni, identyfikowanej przez współrzędne geometryczne punktów charakterystycznych opisane w ustalonym układzie odniesienia;  $(A_{XYZ}: A_x, A_y, A_z$  – zbiór wymiarów liniowych i/lub kątowych, określających położenie punktu/obiektu w układzie współrzędnych  $xyz$ ),
- fizycznych powiązań między komponentami tj. połączeń mechanicznych opisanych stopniami swobody komponentów;  $A-R_k-B: R_i = (R_{Suw}, R_{Obr})$ ,  $i = 1, \dots, k$ ,  $R_k$  – liczba stopni swobody liniowych (suwliwych) i/lub obrotowych między elementami  $A$  i  $B$ ,
- wzajemnego oddziaływania dynamicznego komponentów (siłowego, momentowego, energetycznego);  $A-R-B: R = F_{AB}$  – oddziaływanie dynamiczne między elementami  $A$  i  $B$ .

Struktura obiektu, określająca jego właściwość, rozróżniana jest jako struktura zewnętrzna i wewnętrzna. Struktura zewnętrzna dotyczy postaci geometrycznej obiektu, natomiast struktura wewnętrzna jest właściwością tworzywa, z którego wykonane są poszczególne elementy [62]. Struktura konstrukcyjna w takim rozumieniu stanowi niezmienną w czasie właściwość obiektu o budowie hierarchicznej. Wytwór opisany jest cechami konstrukcyjnymi, do których zaliczono postać konstrukcyjną (jakościowa właściwość konstrukcyjna) i układ wymiarów (ilościowa właściwość konstrukcyjna). Hierarchizacja struktury prowadzi w konsekwencji do pojęcia makro- i mikrostruktury wytworu odnoszonej do wymiarów tzw. gabarytowych i właściwości tworzywa oraz wymiarów wymaganych dla powierzchni wytworu [62]. Jest to ważne zagadnienie na etapie ustalania dopuszczalnych przedziałów zmienności atrybutów konstrukcyjnych elementów.

Istotnym zagadnieniem analizy struktury konstrukcyjnej jest przyjęcie najniższego poziomu złożoności obiektu. O strukturze konstrukcyjnej, w sensie relacji, można mówić właściwie w odniesieniu do obiektów złożonych, choć w ujęciu systemowym złożoność istnieje na każdym poziomie dekompozycji. Istotą uznania obiektu za element (prostą, niepodzielną część) jest cel dekompozycji i ilość informacji niezbędnej do uznania niższego poziomu dekompozycji za istotny w danej analizie elementu.

Stopień dekompozycji obiektu zależy zwykle od założeń badań i sposobu gromadzenia danych. W zaleceniach CCPS [96] podaje się siedmiopozomową złożoność systemu:

- gałąź przemysłu,
- miejscowość lokalizacji,
- zakład (przedsiębiorstwo),
- wydział zakładu,
- układ funkcjonalny,
- komponent,
- część (element).

Pierwsze cztery poziomy odnoszą się do lokalizacji terytorialnej, a trzy ostatnie do układu funkcjonalnego. Takie podejście ma uzasadnienie w badaniach obiektów należących do różnych użytkowników rozłożonych terytorialnie, w różnych środowiskach eksploatacji.

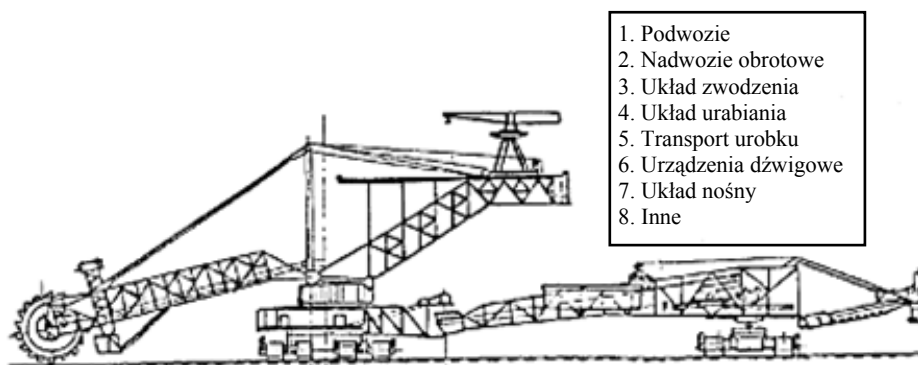
Przykładowa struktura identyfikacji źródła danych, niezawierająca ogólnych danych identyfikacyjnych, może obejmować przykładowo 5 poziomów dekompozycji [292, 310]:

- znamionowy kod, symbol obiektu,
- unikatowa nazwa (numer) obiektu,
- typ obiektu,
- lokalizacja, miejsce eksploatacji,
- funkcja.

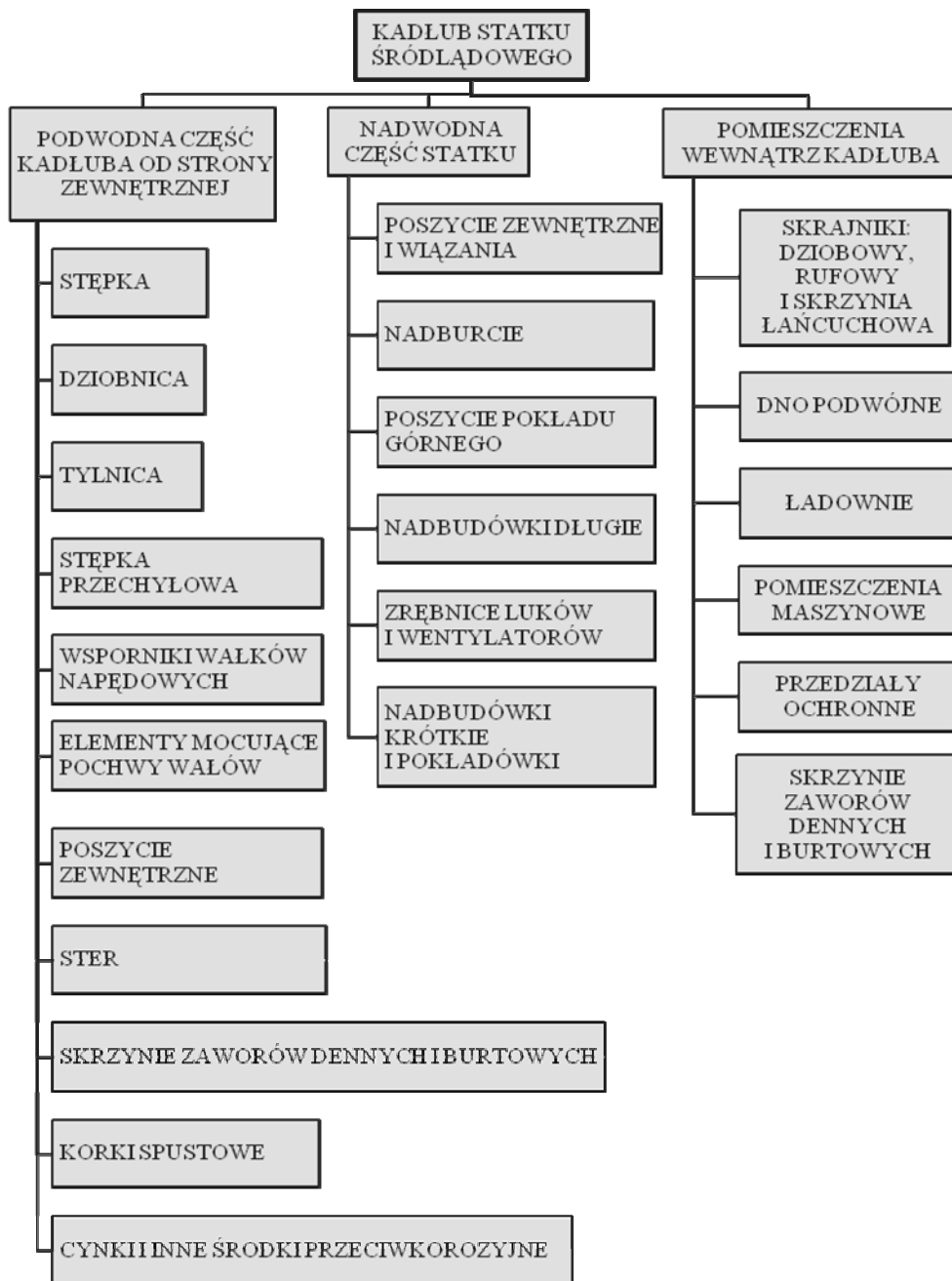
Przykładem różnego podejścia do strukturyzacji obiektów są podane analizy zaczerpnięte z badań własnych. W zrealizowanych w Politechnice Wrocławskiej badaniach eksploatacyjnych niezawodności autobusów miejskich Jelcz PR-110U [227] wyróżniono: 5 środowisk eksploatacji, gdzie eksploatowano zbiory jednorodnych obiektów podzielonych na 3 poziomy dekompozycji w strukturze konstrukcyjnej: pojazd, układy i elementy przynależne do tych układów. We wczesnej fazie badań liczba uszkodzeń będąca podstawą oceny niezawodności była niewielka. Dlatego wyróżniono w strukturze autobusu tylko 50 elementów o największej liczbie uszkodzeń zasadniczo wpływających na jego niezawodność, uznając na tym etapie obserwacji pozostałe, nieszkodzone elementy za niezawodne [213]. Agregacja oceny obiektu przebiegała bezpośrednio od elementów do obiektu.

W badaniach [84] katalog ładowarki budowlanej Ł-220 obejmuje rysunki aksonometryczne zespołów oraz tabelaryczne zestawienie elementów widocznych na schematach. Każda strona zawiera jeden schemat graficzny oraz tabelę elementów. Ładowarka została podzielona na 22 układy, ale oznaczenia kodowe odpowiadają grupom schematów i dlatego numeracja układów przebiega od 1 do 28 [84].

W badaniach autobusu międzymiastowego Sanos A14, samochodów ciężarowych Kamaz 5320, Skoda Liaz i Fiat 190 wyróżniono tylko dwa poziomy dekompozycji: pojazd i element [83]. Według podobnego podziału, na dwa poziomy dekompozycji, podzielono koparki wielonaczyniowe węgla brunatnego SchRs-1200 i SchRs-800, poziomy: koparka i element.



Rys. 4.4. Schemat koparki wielonaczyniowej SRs-2000 i podział na układy konstrukcyjne



Rys. 4.5. Dekompozycja elementów konstrukcyjnych statków towarowych floty śródlądowej [68]

Najbardziej szczegółowej dekompozycji konstrukcyjnej poddano we własnych badaniach eksploatacyjnych koparkę wielonaczyniową węgla brunatnego SRs-2000 [85].

Analizę przeprowadzono dla: koparki, układów, zespołów i podzespołów, a także dla elementów, ale tylko w zakresie analizy postaci uszkodzeń. Na rysunku 4.4 pokazano schemat koparki i jej podział na układy konstrukcyjne [210].

W podanych przykładach podział konstrukcyjny był intuicyjnie generowany funkcjami obiektu, jednak nie zawsze taka zbieżność jest racjonalna i konieczna. W badaniach eksploatacyjnych pchanych barek rzecznych BP-500 [68] wyróżniono tylko dwa poziomy dekompozycji: barka i element, jednak w tym przypadku element odnosił się w dużej mierze do fragmentów poszycia barki ze względu na stosunkowo prostą budowę obiektu i jednorodne elementy spełniające podobne funkcje (poszycie barki: część rufowa, ładownia rufowa, ładownia dziobowa, część dziobowa). Na rysunku 4.5 pokazano przykład dekompozycji elementów konstrukcyjnych statków towarowych floty śródlądowej [68], natomiast dla oceny stanu technicznego kadłub statku podzielono na pięć głównych grup konstrukcyjnych stosownie do udziału masowego w masie całego statku, tj.: poszycie, wiązania wzdłużne i wrgęgi, pokład, grodzie i denniki.

### Struktura badawcza obiektu o znanej budowie

Po przyjęciu systemowego podejścia do modelowania eksploatacji, dowolny obiekt wyróżniony w postrzeganiu obiektowym jest traktowany jako system podlegający dekompozycji bądź jest podsystemem (elementem) wyższego poziomu dekompozycji [14, 101]. Identyfikacja dowolnego elementu w strukturze systemu pozwala na jego jednoznaczny opis i wyróżnienie w zbiorze wszystkich elementów. Jest to typowe podejście do dekompozycji systemu i tworzenia struktury drzewiastej na coraz niższych poziomach dekompozycji (obiekt–układ–zespół–podzespół–element–...).

Zakłada się, że znany jest skład systemu, to znaczy wiadomo z ilu i jakich elementów składa się system i gdzie znajdują się poszczególne elementy (na jakich są poziomach dekompozycji). Obiekt (system) tworzy zbiór elementów

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \quad (4.5)$$

gdzie  $n$  – liczba wyróżnionych elementów.

Obiekt jest dekomponowalny, to znaczy, że każdy z elementów  $e_i$  jest również obiektem (systemem) o cechach takich samych jak obiekt wyższego poziomu. Przyjmijmy, że  $E$  oznacza obiekt na zerowym poziomie dekompozycji, przy czym ten obiekt (system) składa się z  $n$  niepodzielnych z założenia elementów [8]. Pierwszy poziom dekompozycji zawiera więc  $n_1$  elementów (modułów):

$$E_{j_1} : j_1 = 1, 2, \dots, n_1 \quad (4.6)$$

przy czym:  $\bigcup_{j_1}^{n_1} E_{j_1} = E$ .

Na dowolnym poziomie dekompozycji można zaobserwować elementy, które nie podlegają dalszej dekompozycji. Są to moduły, tak jak  $E_{j_1}$ , składające się tylko z jed-

nego elementu  $E_{j_i} = \{e_i\}$ . Liczbę takich niedekomponowalnych jednoelementowych modułów na każdym poziomie dekompozycji oznacza się  $n_i^*$ . Wówczas liczba modułów dekomponowalnych (wieloelementowych) będzie wynosić  $d_i = n_i - n_i^*$ . Jeśli założyć, że wiedza o budowie systemu i jego poziomach dekompozycji jest znana, to znaczy, że znana jest liczba wszystkich elementów i ich miejsce w systemie, przy czym zachodzi zależność:

$$\sum_{i=1}^l n_i^* = n \quad (4.7)$$

gdzie:  $n_i^*$  – liczba niedekomponowalnych modułów.

Notacja elementów na różnych poziomach dekompozycji zawiera oznaczenie kodowe składające się kolejno z numerów modułów coraz niższego poziomu dekompozycji. Wówczas element  $e_i$  na najniższym,  $k$ -tym poziomie dekompozycji ma oznaczenie kodowe:

$$E_{j_1 j_2 \dots j_k} = \{e_i\} \quad (4.8)$$

Procedura przypisywania kodów elementom systemu wymaga w pierwszym kroku rozłożenia wszystkich modułów wieloelementowych, tak aby w strukturze występowały na najniższym poziomie dekompozycji, jedynie nierozkładalne elementy  $e_i$ , tj.  $E_{j_1 j_2 \dots j_k} = \{e_i\}$ . Wówczas elementowi  $e_i$  przyporządkowuje się indeks tego modułu, czyli kod  $j_1 j_2 \dots j_k$ . Oznacza się to w postaci:  $e_i^{j_1 j_2 \dots j_k}$ . Liczba  $k$  informuje, że element ten przechodzi  $k$  poziomów dekompozycji. W ten sposób, po pełnej dekompozycji systemu, każdy element ma nadany jednoznaczny kod informujący o jego miejscu w strukturze funkcjonalnej.

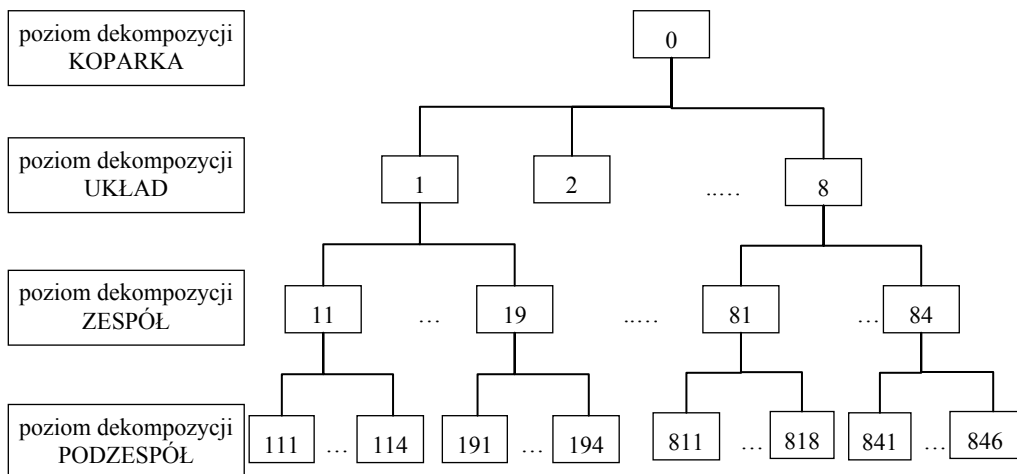
Jeśli zbiór kodów zdekomponowanego systemu oznaczy się jako  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ , to funkcja  $\text{Kod} : E \rightarrow K$  odwzorowuje zbiór elementów w zbiór kodów. Funkcja odwrotna przypisuje każdemu elementowi jego unikatowy kod. Przykładowe oznaczenie kodowe elementu może mieć postać 3-2-1 i wówczas jest on oznaczony jako  $e_9^{3,2,1}$ . Funkcja  $\text{Kod}$  przekształca wówczas numer elementu w jego kod strukturalny:  $\text{Kod} : E(9) : (9 \rightarrow 3-2-1)$ .

Przykład dekompozycji obiektu 18-elementowego i wybranych kodów dla elementów 7 i 8 przedstawia tabela 4.2.

W badaniach koparki wielonaczyniowej SRs-2000 [85, 199, 215] dokonano trójpoziomowej dekompozycji obiektu badań, wydzielając:

- koparkę (poziom zerowy),
- 8 układów (poziom pierwszy),
- 47 zespołów (poziom drugi),
- 204 podzespoły (poziom trzeci).

Na rysunku 4.6 pokazano wycinek drzewa dekompozycji koparki od poziomu 0 do poziomu 3 (podzespoły od 111 do 846).



Rys. 4.6. Przykład drzewa dekompozycji dla koparki SRs-2000

Tabela 4.2. Dekompozycja osiemnastoelementowego obiektu

e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	e <sub>11</sub>	e <sub>12</sub>	e <sub>13</sub>	e <sub>14</sub>	e <sub>15</sub>	e <sub>16</sub>	e <sub>17</sub>	e <sub>18</sub>
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>		E <sub>3</sub>				E <sub>4</sub>										
	E <sub>21</sub>	E <sub>22</sub>	E <sub>31</sub>		E <sub>32</sub>		E <sub>41</sub>	E <sub>42</sub>	E <sub>43</sub>								
		E <sub>221</sub>	E <sub>222</sub>	E <sub>311</sub>	E <sub>312</sub>	E <sub>321</sub>	E <sub>322</sub>		E <sub>421</sub>	E <sub>422</sub>	E <sub>431</sub>			E <sub>432</sub>			
							E <sub>3221</sub>	E <sub>3222</sub>				E <sub>4311</sub>	E <sub>4312</sub>	E <sub>4313</sub>	E <sub>4321</sub>	E <sub>4322</sub>	
																E <sub>43221</sub>	E <sub>43222</sub>

W podanym przykładzie:

- element e<sub>7</sub> ma kod 3-2-1 i oznaczany jest: e<sub>7</sub><sup>3,2,1</sup>,
- element e<sub>8</sub> ma kod 3-2-2-1 i oznaczany jest: e<sub>8</sub><sup>3,2,2,1</sup>.

### Struktura badawcza obiektu o nieokreślonej a priori budowie

Zakłada się, że znany jest skład systemu, to znaczy, że wiadomo z ilu elementów składa się system, ale nie zapisuje się związków między elementami (modułami). Elementy systemu tworzą moduły (podsystemy) mające wspólne właściwości. Analiza techniczna pozwala na wprowadzanie elementów do poszczególnych podsystemów

struktury w miarę pojawiania się informacji przez nie generowanych. Kluczem do właściwego umieszczenia elementów w strukturze są ich właściwości i właściwości już istniejących w strukturze elementów.

Na wstępie budowy systemu identyfikacji obiektu, system rozpoznawalny jest na najwyższym poziomie dekompozycji obiektu  $E$ . W chwili pojawienia się pierwszego zdarzenia związanego z elementem  $e_1$ , obiekt opisuje się jako:  $E = \{e_1\}$ .

Kolejne zdarzenie w eksploatacji obiektu może wymagać zmiany jego struktury i oznaczeń kodowych. Zdarzenie to może być związane z:

- tym samym elementem  $e_1$  (zapis zdarzenia dla atrybutu elementu  $e_1$ ),
- elementem  $e_2$  należącym do innego (nowego) modułu (podsystemu) niż element  $e_1$  na równorzędym poziomie dekompozycji (sąsiad), elementy  $e_1$  i  $e_2$  tworzą dwa odrębne moduły jednoelementowe,
- elementem należącym do tego samego modułu (podsystemu) co element  $e_1$  na równorzędym poziomie dekompozycji (rodzeństwo); elementy  $e_1$  i  $e_2$  tworzą moduł dwuelementowy,
- elementem  $e_2$  należącym do tego samego modułu (podsystemu) co element  $e_1$  na poziomie podrzędnym (dziecko), element  $e_2$  staje się elementem istniejącego już modułu,
- elementem  $e_2$  należącym do tego samego modułu (podsystemu) co element  $e_1$  na poziomie nadrzędnym (rodzic). element  $e_1$  staje się elementem modułu utworzonego przez nowy element  $e_2$ .

Jeśli założyć, że pierwsze zdarzenie w trakcie obserwacji systemu eksploatacji jest związane z elementem  $e_1$ , to obiekt reprezentowany jest przez ten właśnie element. Pojawienie się zdarzenia związanego z kolejnym elementem  $e_2$  modyfikuje strukturę obiektu stosownie do jego relacji z elementem  $e_1$  według algorytmu przedstawionego na rysunku 4.7.

Algorytm (rys. 4.7.) modyfikacji oznaczeń kodowych dla systemu pierwotnie jednoelementowego pozwala na formalizację zapisu z uwzględnieniem relacji położenia między elementami (modułami) już obecnymi w strukturze i nowymi elementami.

Formalny zapis modelu struktury rosnącej oparty jest na czterech implikacjach, w których człon poprzednika zawiera informację o rodzaju relacji, a następnik wyznacza zmiany kodów elementów.

Niech: relacja  $e_i - R^q - E_j$  oznacza relację nowego w strukturze elementu  $e_i$ , z zapisanym już w strukturze modulem  $E_j$ , gdzie  $q \in \{0, =, -, +\}$  oznacza symbol położenia (relacji) między elementami.

Relacja  $R^q$  generuje algorytm zmiany kodów dla elementów struktury systemu:

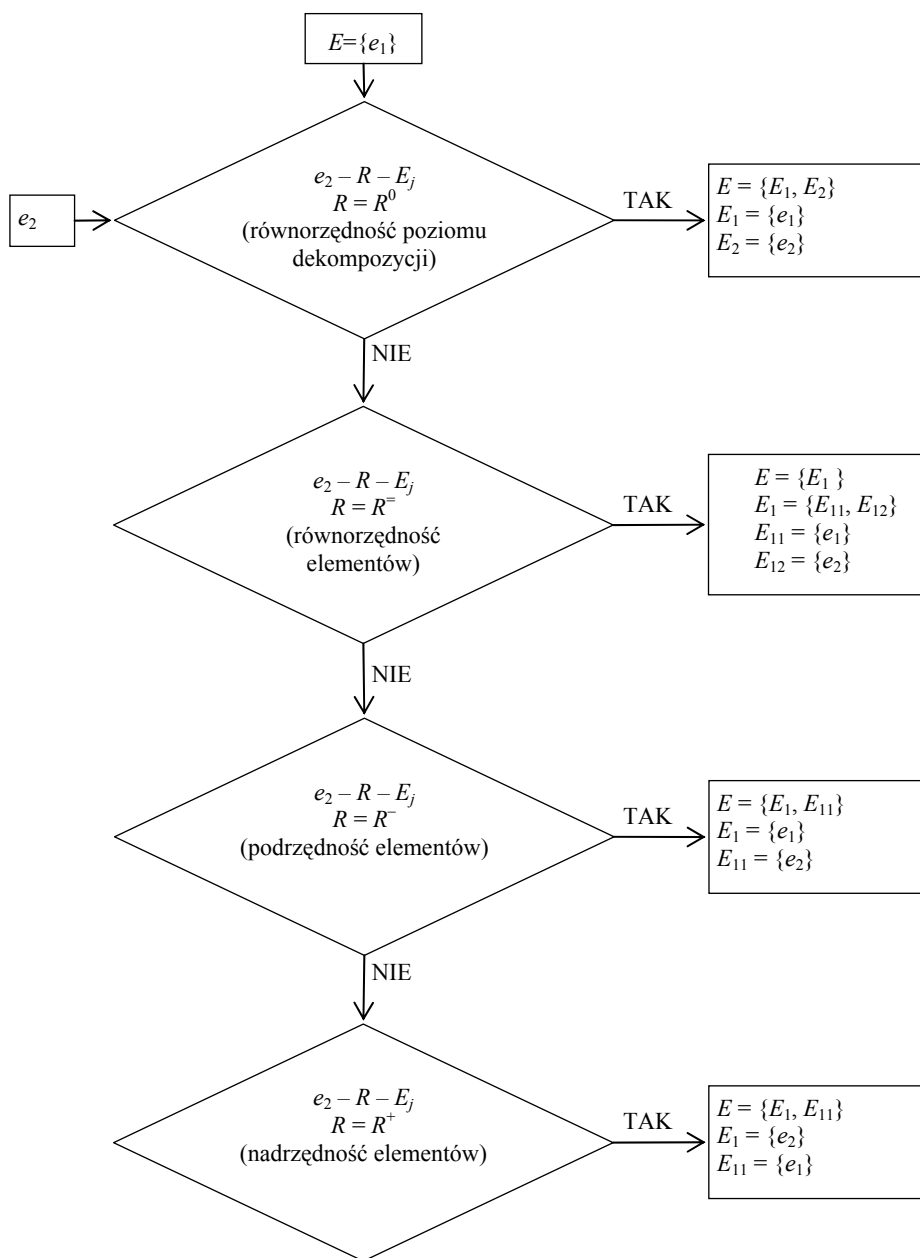
- **relacja  $R^0$**  – równorzędność położenia w strukturze elementów  $e_i$  i  $E_j$  (sąsiedztwo):

$$R^0(e_i, E_j) : (e_i - R^0 - E_j) \wedge (i = j_1 j_2 \dots j_k) \Rightarrow (i = j_1 j_2 \dots j_{k+1}, j = j_1 j_2 \dots (j_{k+1} + 1)) \quad (4.9)$$

- **relacja  $R^=$**  – równorzędność elementów  $e_i$  i  $E_j$  w strukturze (rodzeństwo):

$$R^=(e_i, E_j) : (e_i - R^= - E_j) \wedge (i = j_1 j_2 \dots j_k) \Rightarrow j = j_1 j_2 \dots (j_k + 1) \quad (4.10)$$





Rys. 4.7. Algorytm modyfikacji struktury obiektu po pojawieniu się elementu  $e_2$

- relacja  $R^-$  – podrzędność położenia w strukturze elementów  $e_i$  i  $E_j$  (dziecko):

$$R^-(e_i, E_j) : (e_i - R^- - E_j) \wedge (i = j_1 j_2 \dots j_k) \Rightarrow j = j_1 j_2 \dots j_k j_{k+1} \quad (4.11)$$

- relacja  $R^+$  – nadrzędność położenia w strukturze elementów  $e_i$  i  $E_j$  (rodzic):

$$R^+(e_i, E_j): (e_i - R^+ - E_j) \wedge (i = j_1 j_2 \dots j_k) \Rightarrow j = j_1 j_2 \dots j_{k-1} \quad (4.12)$$

W tym przypadku zbiór kodów jest zmienny i po zarejestrowaniu  $e_i$ -tego elementu będzie miał postać  $i$ -elementowego zbioru kodów  $K_i^* = \{k_1^*, k_2^*, \dots, k_i^*, \dots\}$ , przy czym:  $K_n^* = K$ . Funkcja  $KOD: E \rightarrow K_i^*$  odwzorowuje zbiór elementów w zbiór kodów. Jeśli wszystkie elementy systemu dostarczą informacji eksploatacyjnej, to znaczy znajdzie konieczność uwzględnienia wszystkich elementów w strukturze obiektu, struktura dynamiczna osiągnie taką samą postać jak struktura o „a priori” znanej budowie.

Rozważania prowadzą do uogólnienia struktury konstrukcyjnej i utożsamienia relacji  $R^K$  (wzór 4.3) z funkcją  $KOD$ :

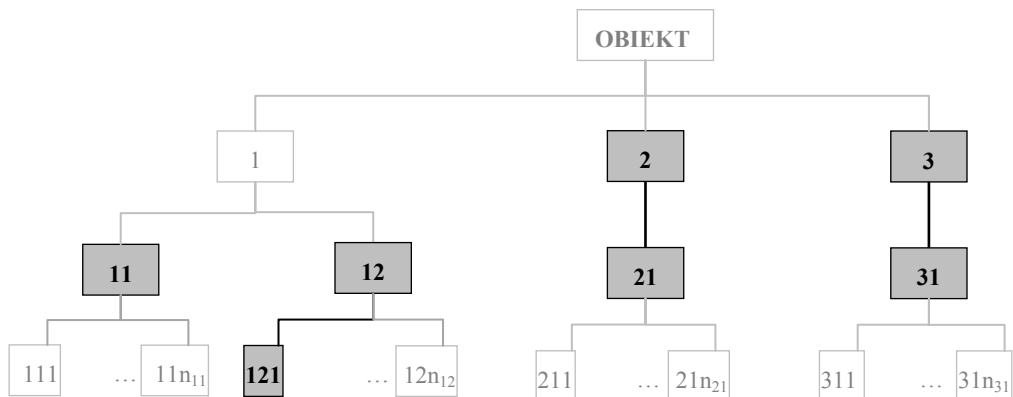
$$R^K = KOD: E \rightarrow K_i^* \quad (4.13)$$

W tabeli 4.3 oraz na rysunku 4.8 pokazano rozwijającą się strukturę. W kolejnych wierszach tabeli pojawiają się elementy oraz przypisane im relacje i aktualnie zmodyfikowane kody położenia w strukturze.

Tabela 4.3. Przykład rozwoju struktury rosnącej obiektu

Element	Relacja	MODUŁ 1			MODUŁ 2		MODUŁ 3	
$e_1$	$e_1 = E_1$	$E_1$						
$e_2$ (sąsiad dla $E_1$ )	relacja $R^0$				$E_2$			
$e_3$ (brat dla $E_1$ )	relacja $R^=$	$E_{11}$	$E_{12}$					
$e_4$ (dziecko dla $E_{12}$ )	relacja $R^-$	$E_{11}$	$E_{12}$	$E_{121}$				
$e_5$ (rodzic dla $E_2$ )	relacja $R^+$				$E_2$	$E_{21}$		
$e_6$ (sąsiad dla $E_1$ i $E_2$ )	relacja $R^0$						$E_3$	
$e_7$ (dziecko dla $E_3$ )	relacja $R^-$						$E_3$	$E_{31}$

Oba podejścia mają zalety i wady wynikające z pracochłonności i praktycznego operowania kodami elementów. W tabeli 4.4 porównano oba podejścia budowania struktury konstrukcyjnej.



Rys. 4.8. Porównanie pełnej struktury konstrukcyjnej obiektu ze strukturą uzyskaną metodą struktury rozwijającej się

Tabela 4.4. Porównanie zalet i wad metod tworzenia struktury obiektu

	Struktura znana	Struktura „rozwijająca się”
Zalety	Wiedza o strukturze całego obiektu znana na wstępie badań	Mały nakład pracy rozłożony w czasie Zalgorytmizowane kodowanie Zwartość struktury bez nadmiarowości
Wady	Duża pracochłonność opracowania struktury na wstępie badań Zbędna nadmiarowość w stosunku do potrzeb eksploatacyjnych	„Przekodowywanie” elementów w trakcie zbierania danych

Zasadniczą przewagą modelowania obiektu z wykorzystaniem struktury rosnącej, w porównaniu do klasycznej, pełnej struktury obiektu, jest brak nadmiarowości w stosunku do potrzeb, co może wpływać na obniżenie kosztów przygotowania badań eksploatacyjnych.

Niemniej jednak racjonalnym podejściem jest zastosowanie obu sposobów polegające na wstępnym zdekomponowaniu obiektu na wysokim poziomie złożoności (układy), a następnie rozwijaniu struktury zgodnie z napływem informacji z wykorzystaniem zaproponowanych algorytmów dla struktury rosnącej.

### 4.3.2. Struktura funkcjonalna obiektu

Funkcjonalność jest cechą obiektu polegającą na zdolności spełnienia wymaganej funkcji użytkowej, natomiast struktura funkcjonalna jest jedną z kilku możliwości postrzegania obiektu w sensie modelowym. Klasyfikacji funkcji obiektu według sześciu kryteriów ważności funkcji [273] jest następująca:

- funkcja podstawowa – funkcja niezbędna do spełnienia zadania,
- funkcja pomocnicza – funkcja wspierająca działanie funkcji podstawowej,

- funkcja zabezpieczająca – funkcja ochraniająca przed niepożądanymi wydarzeniami lub/i ograniczająca skutki dla ludzi, dóbr materialnych, środowiska,
- funkcja informacyjna – funkcja obejmująca przesyłanie: sygnałów sterujących, informacji diagnostycznych, ostrzegawczych i alarmowych,
- funkcja łącząca obiekty: funkcja umożliwiająca wykonywanie funkcji przez inny obiekt; w zależności od sytuacji może być funkcją aktywną lub bierną,
- funkcja nadmiarowa – funkcja właściwa dla obiektów wielofunkcyjnych, wykorzystujących w pewnych warunkach jedynie część swych możliwości.

Na etapie analizy funkcjonalnej obiektu zachodzi konieczność określenia fizycznej realizacji funkcji. Roth [281] podaje 225 określeń technicznych na sposoby realizacji funkcji, takie jak poruszać, hamować, ustalać, zamykać, wstrząsać itp. Strumień masy, energii i informacji jest pod względem działania: gromadzony, przenoszony, przetwarzany, zmieniany oraz sumowany i rozdzielany ze stratami i bez strat.

W klasie obiektów mechanicznych funkcje takie kojarzone są z relacjami między materialnymi komponentami obiektu i określane są liczbą stopni swobody [112].

Obiekt mechaniczny  $M$  jest systemem technicznym składającym się ze zbioru elementów  $E$  połączonych ze sobą relacjami konstrukcyjnymi  $R^K$  i funkcjonalnymi  $R^F$ . Obiekt mechaniczny realizuje funkcje główne  $\Psi^F$  (4.14) stanowiące sumę funkcji składowych  $\varphi_k$  realizowanych przez zbiory różnych elementów obiektu:

$$\Psi^F = \langle E, W^F, R^F \rangle \quad (4.14)$$

gdzie:  $\Psi^F$  – struktura funkcjonalna obiektu mechanicznego,

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  – zbiór elementów obiektu,

$W^F = \{W_1^F, W_2^F, \dots, W_n^F\}$  – zbiór atrybutów funkcjonalnych obiektu,

$W_i^F = \{w_{i1}^F, w_{i2}^F, \dots, w_{in_i}^F\} \in W^F$  – zbiór funkcji  $i$ -tego elementu,

$R^F = \{R_1^F, R_2^F, \dots, R_{m_f}^F\}$  – zbiór relacji funkcjonalnych obiektu,

$R_j^F \subseteq \{W_1^F \times W_2^F \times \dots \times W_n^F\}$  – relacja funkcjonalna w obiekcie.

Obiekt badań, zgodnie z założeniami projektowymi, spełnia główne funkcje użytkowe oraz funkcje poboczne stanowiące zwykle występujący nadmiar funkcjonalny [129]. Stan obiektu, w którym jest on zdolny do spełniania założonych projektowo funkcji użytkowych jest nazywany stanem zdatności. Realizacja funkcji użytkowych obiektu mechanicznego wymaga określonego zestawu funkcji użytkowych jego komponentów (4.15):

$$f(W^F) = 1 \Leftrightarrow \Psi^F(W^F) \in \Phi_E \quad (4.15)$$

gdzie:  $f(\cdot)$  – funkcja zdatności obiektu,

$W^F$  – zbiór funkcji elementów obiektu mechanicznego,

$\Phi_E$  – zbiór zaprojektowanych funkcji użytkowych obiektu  $E$ .

Struktura funkcjonalna obiektu, podobnie jak jego struktura konstrukcyjna, może być traktowana jako struktura hierarchiczna. Oznacza to, że komponenty obiektu mają następujące cechy umożliwiające ich funkcjonalne różnicowanie i tworzenie grup o określonych zadaniach [13, 218]:

- komponenty są funkcjonalnie zależne (funkcjonowanie jednego z nich wymaga działania innych dla spełnienia funkcji nadrzędnej – wyjątkiem mogą być obiekty z nadmiarowością funkcjonalną),
- zakłada się pozytywne oddziaływanie komponentów na spełnianie funkcji nadrzędnej (intencjonalnie, komponenty realizują funkcje poprawnie, a ich udział w realizacji celu jest określany ważnością funkcji),
- większość systemów wpływa na inne systemy i systemy te mogą być traktowane jak podsystemy bardziej złożonych systemów (założenie takie daje podstawę do rozróżnienia struktury konstrukcyjnej i funkcjonalnej).

W projektowaniu obiektów i analizie ich funkcjonalności stosuje się dedykowane metody analityczne, takie jak: funkcjonalne wykresy przepływu (*Functional Flow Diagram*) [154, 184], wykresy przepływu procesów (*Flow Process Charts*), diagramy decyzyjne/działań, wykresy sekwencji działań (*Operational Sequence Diagram*).

Identyfikacja funkcji wpływająca na poprawność kreacji obiektu wymaga stosowania systematycznych technik zapewniających kompletność analizy. W literaturze występuje wiele metod pochodzących głównie z obszaru metodologii projektowania wspomagających identyfikację i dekompozycję funkcjonalną obiektu. Do ważniejszych metod należy zaliczyć metodę FAST, GIST czy FBD.

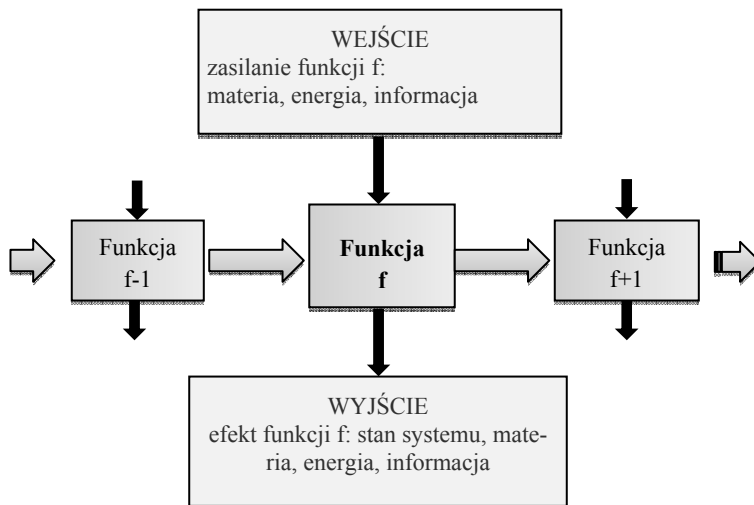
**FAST** (*Functional Analysis System Technique*) blokowa metoda dekomponująca funkcje główne i układająca je w logiczny diagram [324]. Metoda tworzenia struktury oparta jest na „burzy mózgów”, podczas której w stosunku do funkcji głównej tworzony jest ciąg funkcji o coraz to niższym poziomie dekompozycji (szczegółowości). W metodzie wykorzystuje się diagram blokowy rozwijany od lewej do prawej strony poprzez zadawanie pytania JAK? (w jaki sposób jest to realizowane?). Osiągnięcie najniższego poziomu rozdzielczości funkcji kończy analizę. Przeciwny kierunek rozważania struktury odpowiada na pytanie DLACZEGO? (jaki jest powód istnienia funkcji?).

**GTST** (*Goal Tree-Success Tree*) jest hierarchiczną metodą zbudowaną na bazie drzewa wydarzeń, łączącą strukturę funkcjonalną z konstrukcyjną [218]. Dowolny komponent traktowany jest jak obiekt innej struktury złożonego obiektu o wyższym poziomie złożoności. Komponenty mogą realizować różne funkcje, a pewne funkcje mogą być osiągane przez działanie kilku komponentów. Relacja między strukturą funkcjonalną i konstrukcyjną wyrażana jest pojęciem „przeznaczenia” (użytku) komponentu.

**FBD** (*Functional Block Diagram*) wywodzi się z dekompozycji funkcji ogólnej i głównej na funkcje składowe oraz akcje fizyczne jako efekty określonych zjawisk fizycznych [118, 185, 240]. Funkcjonalna struktura blokowa jest budowana od funkcji ogólnej do funkcji składowych o pożądanym poziomie dekompozycji. Funkcjom składowym przypisywane są z kolei efekty fizyczne (zjawiska fizyczne realizujące funk-

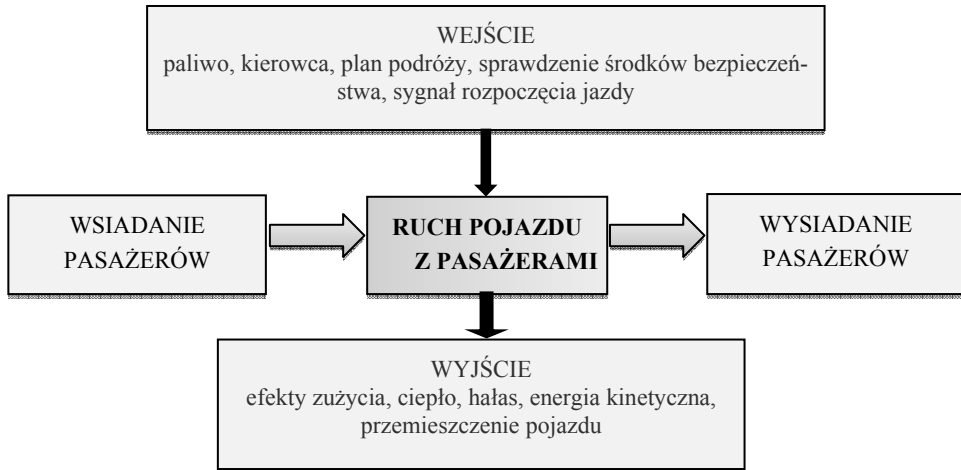
cje), następnie fizyczne zasady działania i techniczne zasady realizacji (wyróżniki postaci konstrukcyjnej).

Modelowanie struktur funkcjonalnych opiera się na wielopoziomowych diagramach przepływu pokazujących funkcje, ich sekwencje i wzajemne zależności. Diagramy funkcjonalne są zgodnie z podejściem systemowym dekomponowalne i na wyższym poziomie dekompozycji przedstawiają jedynie funkcje główne. Głębsza analiza struktury konstrukcyjnej i funkcjonalnej pozwala na rozkład funkcji obiektu na funkcje składowe, ich przynależność do materialnych elementów systemu, wymianę informacji, relacje czasowe zachodzące między funkcjami, zewnętrzny wpływ otoczenia, itp. [313]. W modelowaniu struktur funkcjonalnych wykorzystuje się drzewa zdarzeń, diagramy przepływu z typowymi bramkami lub/oraz czy z bramkami z zależnościami czasowymi [31, 154, 310, 323]. Na rysunku 4.9 przedstawiono schematycznie graficzną interpretację modelu funkcji oraz na rysunku 4.10 interpretację funkcji dla fragmentu procesu transportowego. Funkcja transportowania pasażerów poprzedzona jest, a także następuje po niej, funkcją wymiany (wsiadania/wysiadania) pasażerów. W celu spełnienia funkcji transportowania konieczne jest zapewnienie na wejściu w niezbędne zasoby ludzkie, materiałowe i informacyjne. Przewóz wiąże się także z efektami zaistnienia funkcji, jak np. przemieszczenie materii czy straty energetyczne.

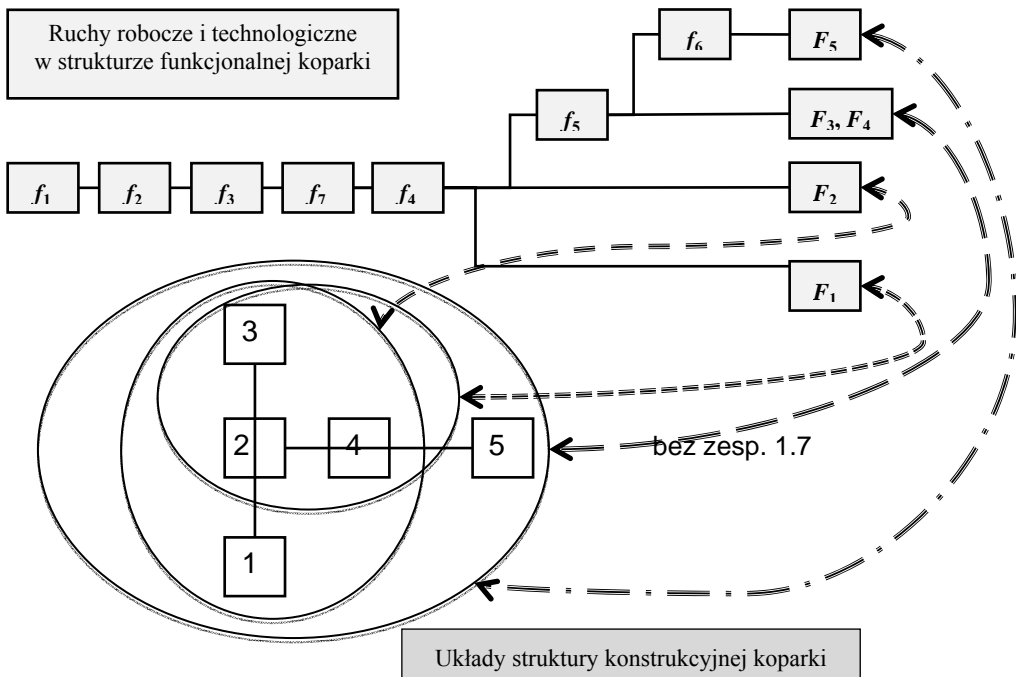


Rys. 4.9. Graficzna interpretacja funkcji w strukturze funkcjonalnej

Przykładem aplikacji analizy funkcjonalnej były badania koparek wielonaczyniowych węgla brunatnego SRs-2000 [85], gdzie przeprowadzono dekompozycję struktury funkcjonalnej w celu alokacji funkcji koparki na główne układy konstrukcyjne. Koparka wykonuje ruchy robocze ( $f_i$ ) obejmujące (w kolejności uruchamiania): napęd



Rys. 4.10. Przykład funkcji transportowej pojazdu z zasileniami i wyjściami z bloku opisującego funkcję



Rys. 4.11. Struktury: konstrukcyjna i funkcjonalna dla koparki wielonaczyniowej SRs-2000

układu przenośników taśmowych, obrót koła wielonaczyniowego, obrót nadwozia, podnoszenie/opuszczanie wysięgnika, podjazd nadwozia. Pozwala to na zbudowanie blokowego schematu funkcjonalnego dla ruchów technologicznych tj. urabiania odpowiednio: piętra, tarasu, ściany, bloku i warstwy ( $F_i$ ). Na rysunku 4.11 przedstawiono aplikację metody GTST, która pokazuje relacje między aktywnymi w fazie użytkownika strukturami konstrukcyjną i funkcjonalną. Układ nr 6 koparki SRs-2000, urządzenia dźwigowe, nie występuje na poniższym schemacie użytkowania, ponieważ uruchamiany jest tylko w fazie obsługiwaniania maszyny [210, 212].

### 4.3.3. Struktura niezawodnościowa obiektu

Pojęcie struktury niezawodnościowej, podawane w teorii niezawodności w odniesieniu do obiektów złożonych, opisuje relację między stanem niezawodnościowym komponentów a stanem obiektu. Struktura niezawodnościowa definiowana jest jako funkcja (relacja) odwzorowująca stan niezawodnościowy elementów w stan obiektu (systemu)  $\varphi(\mathbf{x}) = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_i)$  gdzie:  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$  jest wektorem stanu niezawodnościowego elementów, [32, 33, 85, 140, 227, 263, 282,]. Argumentami tej funkcji są wartości atrybutów niezawodności elementów obiektu, a wartością funkcji jest charakterystyka niezawodności obiektu lub wyższego poziomu dekompozycji. Przyjmuje się strukturę niezawodnościową obiektu mechanicznego jako (4.16):

$$\Psi^N = \langle E, W^N, R^N \rangle \quad (4.16)$$

gdzie:  $\Psi^N$  – struktura niezawodnościowa obiektu mechanicznego,

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  – zbiór elementów obiektu,

$W^N = \{W_1^N, W_2^N, \dots, W_n^N\}$  – zbiór atrybutów niezawodności obiektu,

$W_i^N = \{w_{i1}^N, w_{i2}^N, \dots, w_{in_f}^N\} \in W^N$  – zbiór atrybutów niezawodności elementu,

$R^N = \{R_1^N, R_2^N, \dots, R_{n_N}^N\}$  – zbiór relacji niezawodnościowych obiektu,

$R_j^N \subseteq \{W_1^N \times W_2^N \times \dots \times W_n^N\}$  – relacja niezawodnościowa obiektu.

W klasycznym ujęciu niezawodności, kiedy atrybutom niezawodności elementów  $w_{is}^N$  przypisuje się znaczenie stanu zdatności, tj. spełniania lub niespełniania zamierzonej funkcji, atrybutom przypisuje się wartości 0 lub 1 w zależności od aktualnego stanu zdatności. Wówczas:  $\mathbf{x}_N \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  jest zbiorem stanów niezawodnościowych elementów obiektu mechanicznego, przy czym:  $x_i$  oznacza stan niezawodnościowy  $i$ -tego komponentu i przybiera wartości:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{gdy } i\text{-ty element jest zdalny,} \\ 0, & \text{gdy } i\text{-ty element jest niezdalny.} \end{cases} \quad (4.17)$$



Funkcja struktury niezawodnościowej przybiera wówczas postać  $\Psi^N(\mathbf{x}) = \Psi^N(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Obiektowi zbudowanemu z  $n$  komponentów można przypisać  $2^n$  kombinacji stanów zdatności jego elementów, co odpowiada przestrzeni stanów zdatności obiektu. Przyjęcie dwuwartościowej przestrzeni stanów zdatności elementów wiąże się z ograniczeniem stanów funkcjonalnych obiektu również do zbioru dwuwartościowego: stan funkcjonowania i niemożności funkcjonowania. Przy takim założeniu struktura niezawodnościowa oparta na stanach zdatności i niezdatności może być utożsamiona ze strukturą funkcjonalną.

Struktury niezawodnościowe złożonych obiektów modeluje się kilkoma metodami, głównie opartymi na dwuwartościowej algebrze Boole'a: metody analityczne, metody stanów operacyjnych, bloki niezawodności (RBD), metody drzewa błędów i metody numeryczne wykorzystujące symulację procesów opartą na generatorach liczb losowych (metoda Monte Carlo) [32, 140, 206, 208, 213, 216, 218, 222, 259, 286]. Stany zdatności obiektów tworzą binarną przestrzeń stanów, w której: stan zdatności odpowiada spełnianiu funkcji przez obiekt, a stan niezdatności nie spełnianiu tej funkcji. Analizie podlegają systemy koherentne, tzn. monotoniczne i nieredukowalne. Systemy te, niezależnie od rodzaju struktury, mają następujące właściwości:

- $\varphi(\mathbf{1}) = \mathbf{1}$ , gdzie  $\mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)$ , co oznacza, że jeśli wszystkie komponenty są w stanie zdatności, to system również jest w stanie zdatności,
- $\varphi(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ , gdzie  $\mathbf{0} = (0, 0, \dots, 0)$ , co oznacza, że jeśli wszystkie komponenty są w stanie niezdatności, to system również jest w stanie niezdatności,
- $\prod_{i=1}^n x_i \leq \varphi(x) \leq \prod_{i=1}^n x_i$ , gdzie  $\prod_{i=1}^n x_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i)$ , określając, że koherentny system jest co najmniej tak dobry jak zbudowany z jego komponentów system szeregowy i co najwyżej tak dobry, jak zbudowany z jego komponentów system równoległy,
- jeśli  $\mathbf{x} \geq \mathbf{y}$ , to  $\varphi(\mathbf{x}) \geq \varphi(\mathbf{y})$ , co oznacza, że uszkodzenie kolejnego komponentu  $x_i \geq y_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) nie poprawia stanu niezawodnościowego systemu.

### Modelowanie niezawodności obiektu badań

Relacja  $\Psi^N$  opisująca funkcję niezawodności systemu złożonego, może być przedstawiona w postaci graficznej lub analitycznej. Do wyznaczenia niezawodności systemu wykorzystuje się [13, 31, 32, 33, 53, 140, 101, 221, 319, 322 i inni]:

- funkcję logiczną,
- funkcję analityczną,
- metodę bloków niezawodności (RBD – *Reliability Block Diagram*),
- metodę drzewa błędów (uszkodzeń) (FTA – *Fault Tree Analysis*),
- metodę stanów operacyjnych,
- metodę ścieżek zdatności i przekrojów niezdatności,
- superpozycję relacji (struktur) elementarnych.

Opis struktury niezawodności w postaci funkcji logicznej wykorzystuje algebrę Boole'a:  $B = \langle X, F, B \rangle$ , w której  $X$  jest zbiorem binarnych komponentów  $x_i$ ,  $F$  jest

zbiorem działań  $(\perp, \wedge, \vee)$ , a  $B = \{0, 1\}$  jest zbiorem komponentów neutralnych tych działań [33].

Bloki niezawodności stanowią graficzny obraz związków między komponentami struktury, przy czym układ połączeń oznacza spełnianie funkcji, a nie przepływ konkretnego medium czy energii. Często, lecz nie koniecznie, blokowa struktura niezawodnościowa odpowiada strukturze konstrukcyjnej (rozd. 5).

Komponenty są charakteryzowane atrybutami niezawodnościowymi, które w najprostszej postaci opisują binarny stan zdatności lub przybierają postać funkcji niezawodności  $R_i(t)$  lub dystrybuanty uszkodzeń  $F_i(t)$ . Wyznaczanie niezawodności systemu (obiektu złożonego) metodą bloków niezawodności zostało ujęte w postaci normowej [259]. W badaniach koparki wielonaczyniowej SRs-2000 przyjęto zarówno dla całej maszyny, jak i elementów składowych dwustanową przestrzeń stanów niezawodnościowych. Struktura niezawodnościowa została utworzona dla struktur funkcjonalnych odpowiadających funkcjom głównym maszyny. W tabeli 4.5 przedstawiono struktury niezawodności odpowiadające strukturom funkcjonalnym [85].

Drzewo uszkodzeń stanowi logiczną relację między stanem niezawodnościowym komponentów i systemu budowaną indukcyjnie, tzn. od ogółu do szczegółu (Top→Down). Zdarzeniem szczytowym jest uszkodzenie systemu, a kolejne poziomy łączą tzw. bramkami logicznymi „i” oraz „lub” zdarzenia dotyczące uszkodzeń zbiorów komponentów (bloków) lub pojedynczych komponentów. Metoda ma liczne modyfikacje i rozwinięcia obiektowe, jednak jej podstawowa idea i założenia stanowią podstawę wszystkich metod określanych mianem drzew błędów (uszkodzeń) [258, 259].

Metoda stanów operacyjnych jest metodą opisu struktury złożonego systemu poprzez określanie wszystkich stanów eliminujących stan zdatności systemu. Pozwala na wyznaczenie funkcji niezawodności systemu jako sumy prawdopodobieństw znalezienia się systemu w stanie zdatności. Analiza obejmuje dla komponentów binarnych  $2^n$  stanów operacyjnych stanowiących wszystkie kombinacje stanów niezawodnościowych dla  $n$  komponentów systemu.

Metoda ścieżek zdatności i przekrojów niezdatności wykorzystuje pojęcie ścieżki zdatności jako podzbioru komponentów systemu, takich, że stan zdatności wszystkich tych komponentów gwarantuje zdatność systemu oraz pojęcie przekroju niezdatności oznaczającego podzbiór komponentów systemu, takich, że stan niezdatności wszystkich tych komponentów powoduje niezdatność systemu [140].

#### 4.3.4. Struktura bezpieczeństwa obiektu

Pojęcie bezpieczeństwa wiąże się z utrzymaniem stanu poprawnej eksploatacji systemu, to znaczy stanu, w którym nie tylko oczekuje się korzyści, ale także unika się zdarzeń niepożądanych, takich jak: śmierć, urazy ciała ludzi, straty dóbr materialnych lub straty dla środowiska naturalnego. Są to niezaprzeczalne straty obniżające dochód z prowadzonej eksploatacji. Poszukiwanie przyczyn strat jest obecnie ważnym zadaniem inżynierów ds. bezpieczeństwa [134, 304].

Tabela 4.5. Struktury niezawodności koparki odpowiadające jej funkcjom głównym

Lp.	Nazwa funkcji	Zbiory zespołów realizujących funkcje	Schemat blokowy	Niezawodność dla odpowiedniej funkcji maszyny
1	Urabianie piętra $F_1$	$Z_1 = \{z_i\},$ $i = 1, 2, \dots, 16$		$R_1 = \prod_{i=1}^{16} R_{z1i}$
2	Urabianie tarasu $F_2$	$Z_2 = \{z_i\},$ $i = 1, 2, \dots, 24$		$R_2 = R_1 \prod_{i=1}^{24} R_{z2i}$
3	Urabianie ściany $F_3$	$Z_{3,4} = \{z_i\},$ $i = 1, 2, \dots, 31$		$R_3 = R_4 = R_1 \prod_{i=25}^{31} R_{z3i}$
4	Urabianie bloku $F_4$			
5	Urabianie warstwy $F_5$	$Z_5 = \{z_i\},$ $i = 1, 2, \dots, 32$		$R_5 = R_3 R_{z17}$

\*)  $ab$  – oznaczają odpowiednio numer układu i zespołu

Utrata stanu bezpieczeństwa jest zdarzeniem podobnie jak uszkodzenie w niezawodności, jednak niemającym odpowiedniego określenia słownego. Jednym z ważniejszych określeń w zagadnieniach bezpieczeństwa jest pojęcie **zdarzenia niepożądanego**, tj. zdarzenia wywołującego negatywny skutek, którego źródłem mogą być: uszkodzenia obiektów, czynniki otoczenia lub niewłaściwe działanie człowieka. Zdarzenie niepożądane jest zdarzeniem losowym, trudno przewidywalnym, bo zależnym od sekwencji lub współistnienia wielu zdarzeń pochodzących z różnorodnych sfer życia.

Zdarzenie niepożądane jest określeniem szerszym niż uszkodzenie i ma taką samą pejoratywną wartość w ocenie funkcjonowania systemu, jednak oprócz wartości informacyjnej o zaistnieniu zdarzenia mówi też w sposób pośredni o niechcianych, niekorzystnych dla eksploatacji stratach.

Pojęcie zdarzenia niepożądanego i strat pozwalają na sformułowanie pojęcia ryzyka. Ryzyko ma w literaturze wiele definicji, takich jak: możliwość powstawania strat, wielkość możliwych strat w wyniku zdarzeń niepożądanych, czy wreszcie jako kombinacja strat i prawdopodobieństwa ich powstania [38, 160, 193, 265, 271, 303, 319]. Największą wartość w praktycznych zastosowaniach ma definicja łącząca straty z prawdopodobieństwem ich pojawienia się w określonym horyzoncie czasowym poprzez funkcję iloczynową. Ryzyko jest iloczynową kombinacją strat i częstotliwości ich powstania w wyniku zdarzeń niepożądanych, jednak duży wpływ na wartość ryzyka może wywierać zarówno struktura systemu, jak i chwila wystąpienia zdarzenia niepożądanego [312, 334].

Przyjmuje się wielkość ryzyka w odniesieniu do pojedynczego zdarzenia niepożądanego  $ZN_{is}$ , jako miarę:

$$RS(ZN_{is}) = sZ_{is} P_{Z_{is}} \quad (4.18)$$

gdzie:  $ZN_{is}$ ; ( $ZN_{is} \in Z$ ) – zdarzenie niepożądane związane z  $i$ -tym elementem i jego  $s$ -tym atrybutem, mieszczące się w zbiorze wszystkich potencjalnych zdarzeń w eksploatacji systemu  $Z = \{Z_{is}\}$ ,

$Z_{is}$  – zdarzenie związane z  $i$ -tym elementem obiektu i jego  $s$ -tym atrybutem,

$sZ_{is} = f_{SK}(ZN_{is})$  – wielkość strat zależna od rozwoju ciągu zdarzeń zapoczątkowanych zdarzeniem  $ZN_{is}$ ,

$pZ_{is} = f_{PZ}(ZN_{is})$  – miara częstotliwości wystąpienia zdarzenia w określonym przedziale czasu.

Zdarzenie niepożądane w eksploatacji jest skutkiem pierwotnego zdarzenia wynikającego z uszkodzenia obiektu, błędu człowieka lub nieoczekiwanego, katastroficznego stanu środowiska naturalnego. Traktując obiekty techniczne, ludzi i środowisko naturalne jak elementy systemu eksploatacji, można stwierdzić, że zdarzenie niepożądane zachodzi w chwili niekorzystnego zbiegu okoliczności polegającego na przekroczeniu dopuszczalnych przedziałów zmienności przez jeden lub kilka atrybutów elementów systemu. Jeśli każdemu z elementów przypisany zostanie atrybut określający wartość strat związanych ze stanem niezdatności i działaniami koniecznymi do przywrócenia stanu jego zdatności, to możliwe jest oszacowanie całkowitych strat z tytułu takiej niezdatności.

W rozdziale 4.2 zdefiniowano informację eksploatacyjną jako piątkę opisującą zdarzenie zdefiniowane przez wartość określonego atrybutu i chwilę zajścia tego zdarzenia:  $I_{zis} = \langle i, s, w_{is}, r_s, t_{zis} \rangle$ , przy czym zdarzeniem niepożądanym może być wyjście atrybutu poza obszar dopuszczalnej zmienności lub ogólniej, wejście do obszaru

zmienności, w którym eksploatacja obiektu nie przebiega w sposób pożądaný i wiąże się z ponoszeniem strat.

Poszczególnym elementom obiektu przypisuje się atrybuty, pośród których są atrybuty opisujące straty wynikające z przejścia obiektu do pewnej niepożądaney podprze-strzeni stanów  $PS(e_i) \subset PW(e_i)$ . Niech zdarzeniem niepożądanym będzie zdarzenie polegające na wejściu  $s$ -tego atrybutu,  $i$ -tego elementu do przedziału zmienności mieszczącego się w przestrzeni  $PS(e_i)$ , dla którego określono potencjalne straty. Chwila zaistnienia takiego zdarzenia jest opisana zależnością:

$$t_{zis} = \min \{t : sk_{is} > 0\} \quad (4.19)$$

Zdarzenie niepożądane  $ZN_{is}$  jest określone przez dwójkę:

$$ZN_{is} = \langle sk_{is}, t_{zis} \rangle \quad (4.20)$$

gdzie:  $ZN_{is}$  – zdarzenie polegające na wejściu  $s$ -tego atrybutu,  $i$ -tego elementu do przedziału związanego z wielkością strat  $sk_{is} > 0$ ,  
 $t_{zis}$  – chwila zajścia zdarzenia.

Bierna obserwacja zdarzeń, jaka występuje w badaniach eksploatacyjnych, jest działaniem rejestrującym ex post, nie zmierzającym na tym etapie przetwarzania danych do prowadzenia analiz i predykcji rozwoju wydarzeń.

Powstałą informację o zdarzeniu niepożądanym opisuje  $I_{znis} = \langle i, s, sk_{is}, r_s, t_{zis} \rangle$ : atrybut elementu, wielkość straty oraz chwila zajścia zdarzenia. W toku dalszego przetwarzania danych (rozdz. 5) wyznacza się na podstawie tej informacji oszacowanie wielkości skutku  $SK_{is}$  i częstotliwości występowania zdarzenia  $PS_{is}$ , co pozwala na wyznaczenie ryzyka wynikającego ze zdarzenia niepożądanego związanego z określonym atrybutem elementu systemu.

Można więc przyjąć, że stan bezpieczeństwa zależy od globalnego ryzyka dla systemu wyznaczonego poprzez ryzyko dla wszystkich atrybutów systemu. Stan bezpieczeństwa jest osiągnięty jeśli ryzyko dla systemu kształtuje się na akceptowalnym poziomie.

Przyjmuje się strukturę bezpieczeństwa obiektu mechanicznego jako trójkę:

$$\Psi^B = \langle E, W^B, R^B \rangle \quad (4.21)$$

gdzie:  $\Psi^B$  – struktura bezpieczeństwa obiektu mechanicznego,

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  – zbiór elementów obiektu,

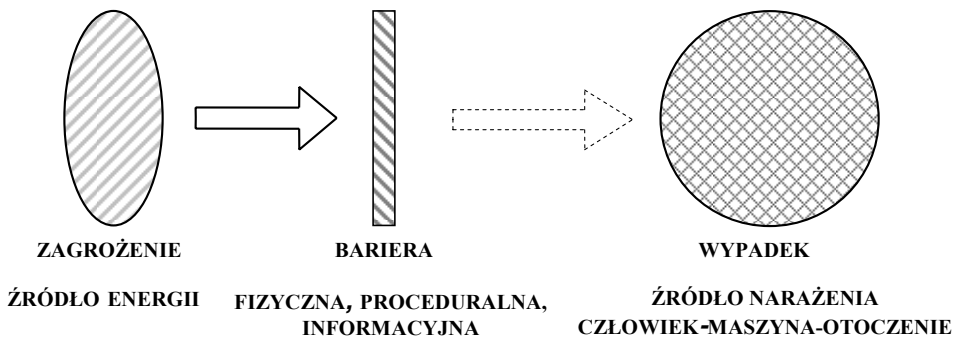
$W^B = \{W_1^B, W_2^B, \dots, W_n^B\}$  – zbiór atrybutów elementów obiektu charakteryzujących potencjalne zdarzenia niepożądane,

$W_i^B = \{w_{i1}^B, w_{i2}^B, \dots, w_{in}^B\} \in W^B$  – zbiór atrybutów bezpieczeństwa elementu,

$R^B = \{R_1^B, R_2^B, \dots, R_{n_B}^B\}$  – zbiór relacji bezpieczeństwa [293] obiektu,

$R_j^B \subseteq \{W_1^B \times W_2^B \times \dots \times W_n^B\}$  – relacja bezpieczeństwa obiektu.

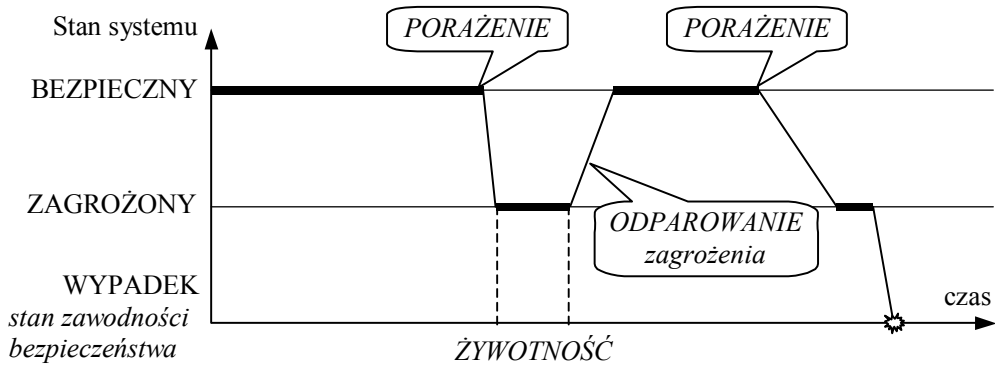
Modele utraty stanu bezpieczeństwa [4, 92] można podzielić na modele „energetyczne” (MORT – *Management Oversight Risk Tree*, spis kontrolny) i zdarzeniowe (następstwo zdarzeń – FTA, rozwój wydarzeń – ETA). W metodzie MORT przyjęto koncepcję niekontrolowanego uwolnienia energii, jako przyczyny zdarzenia niepożądanego [4, 198]. Graficzna interpretacja metody analizy wypadków wskazuje na trzy elementy niezbędne do uwzględnienia w analizie takiego zdarzenia (rys. 4.12): źródło energii (kinetycznej, potencjalnej, sprężystości, ciśnienia, chemicznej, elektrycznej itp.), bariera ochronna w postaci osłon, barier proceduralnych lub informacyjnych (fizyczna izolacja i ochrona; np. przegrody, osłony, ubrania ochronne itp., strefy bezpieczeństwa, sygnalizacja ostrzegawcza i alarmowa, procedura postępowania), skutki zdarzenia. Zniszczenie, przekroczenie lub obejście bariery prowadzi do wypadku, a odpowiedzialność przypisywana jest zawsze człowiekowi jako osobie naruszającej istniejące bariery lub osobie, która nie opracowała dostatecznie dobrej bariery.



Rys. 4.12. Elementy metody analizy wypadków według MORT

W analizie bezpieczeństwa na stanowisku pracy najczęstszymi przyczynami uszkodzeń ciała człowieka są urazy spowodowane czynnikami mechanicznymi, chemicznymi, biologicznymi i psychologicznymi, zwykle wywołanymi stresem pracownika [134].

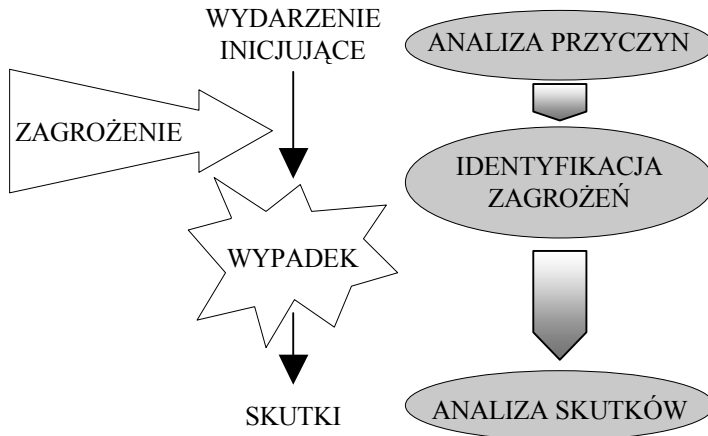
Modele bezpieczeństwa stosowane w wojskowej technice lotniczej wprowadzają pojęcie porażalności i odparowania oraz zawodności bezpieczeństwa [129]. Schemat utraty bezpieczeństwa postrzeganego jako przebieg niesprzyjających zdarzeń przedstawiono na rys. 4.13. Przejście systemu ze stanu bezpieczeństwa do stanu zawodności bezpieczeństwa przebiega dwustopniowo, przez pośredni stan zagrożenia bezpieczeństwa. Może wówczas nastąpić odparowanie, czyli reakcja człowieka sterującego procesem lub działanie autoregulacyjne systemu w celu uniknięcia stanu zawodności bezpieczeństwa (wypadku). Czas niezbędny do odparowania zagrożenia, albo odpowiedni do przetrwania systemu w stanie zagrożenia do zakończenia działania, nazywany jest żywotnością [129].



Rys. 4.13. Przebieg utraty stanu bezpieczeństwa w czasie

Bezpieczeństwo rozumiane szeroko jako stan niewywołujący negatywnych skutków uwzględnia przede wszystkim człowieka – obiekt narażenia, traktując zdrowie i życie jako najwyższe, praktycznie niemierzalne wartości. Działania człowieka są też jednym z potencjalnych źródeł inicjujących łańcuch zdarzeń prowadzących do utraty bezpieczeństwa. Drugim, poza technicznym czynnikiem, jest otoczenie systemu ograniczane najczęściej do środowiska naturalnego. Stąd też można dowolny element układu C–M–O lub ich kombinacje, traktować zarówno jako przyczynę zdarzeń niepożądanych, jak i element rzeczywistości narażony na te zdarzenia. Rozpatrując związek między atrybutami obiektu a niezawodnością i bezpieczeństwem należy stwierdzić, że właściwości obiektu decydujące o niezawodności wpływają w takim samym stopniu na bezpieczeństwo systemu poprzez inicjację i potencjalny rozwój zdarzeń niepożądanych [278].

Jeśli przyjąć uszkodzenie jako źródło zdarzeń niepożądanych, to wystarczające warunki do inicjacji zagrożenia *MSC* (*Minimal Sufficient Conditions*) są następujące: w poprawnie eksploatowanym obiekcie następuje uszkodzenie o potencjalnych skutkach wywołujących stan zagrożenia, a układy (systemy) zabezpieczające nie działają poprawnie [38]. Prowadzi to do prostego modelu bezpieczeństwa  $H \leftarrow \langle C | F \rangle$ , w którym *H* (*hazard*) jest stanem porażenia systemu, *C* (*conditions*) są warunkami otoczenia sprzyjającymi powstaniu strat i *F* (*failure*) uszkodzeniem obiektu. Tego typu szczególne podejście do bezpieczeństwa rozwijane jest w zastosowaniach do różnych systemów technicznych wykorzystując fakt niepełnego i niejednoznacznego zdefiniowania terminów w nauce o bezpieczeństwie. Analizy rzeczywistych katastrof i wypadków stały się załącznikiem metod poszukiwania przyczyn tych zdarzeń i sposobów ich zapobiegania [161, 203, 269, 302]. Na rysunku 4.14 przedstawiono schematyczny rozwój wydarzeń i odpowiadające kolejnym fazom grupy narzędzi analitycznych [4, 198].



Rys. 4.14. Relacje między zdarzeniami i narzędziami analizy w bezpieczeństwie systemów

Wielkość ryzyka stanowi podstawę oceny systemu pod względem jego bezpieczeństwa, czyli odczucia, że stan systemu nie wiąże się z negatywnymi skutkami. Ocena i zarządzanie ryzykiem zostały w ostatnich latach znacznie uporządkowane i sformalizowane [103, 118, 126, 127, 160, 261, 265, 271, 302]. Opracowano cykl zarządzania ryzykiem obejmujący: ocenę ryzyka (analiza i wyznaczenie ryzyka) oraz jego sterowanie (zmniejszanie). Zarządzanie ryzykiem jest działaniem, które może być zrealizowane na każdym etapie rozwoju obiektu, poczynając od projektowania, aż do kasacji. Dotyczy ono wykrywania zagrożeń, ich przyczyn, poszukiwania zdarzeń inicjujących, towarzyszących i rozwoju skutków, wartościowania ryzyka i określania jego poziomu dopuszczalności, a także generowania sposobów ograniczania ryzyka. Analiza ryzyka jest ponadto źródłem informacji niezbędnych w tworzeniu procedur awaryjnego obsługiwanie obiektów, a także dostarcza danych do modelowania zagrożeń w eksploatacji. Wiele metod przypisanych do analizy ryzyka jest zbieżnych z metodami analizy niezawodności systemów technicznych. W tabeli 4.6 zestawiono i porównano zastosowanie najczęściej stosowanych narzędzi analizy właściwych dla obu dziedzin.

Proces analizowania ryzyka jest jedną z ważniejszych procedur w bezpieczeństwie systemów [126, 127]. Obejmuje trzy zasadnicze etapy: identyfikację ryzyka, jego kwantyfikację i akceptację. Algorytm postępowania z przypisanymi narzędziami analizy przedstawiono na rys. 4.15 [4, 261]. Analiza ryzyka wymaga zgromadzenia zespołu badawczego zdolnego do kreatywnej analizy dokumentacji i kojarzeniu informacji o systemie z własną wiedzą doświadczalną. Sugerowane narzędzia analityczne wspomagają pracę zespołu poprzez koncentrację działań na najistotniejszych fragmentach systemu (*PHA*, *FMECA*) lub procesu (*HAZOP*, *What?... If?*). Bazy danych o uszkodzeniach czy zdarzeniach w podobnych systemach mogą stanowić podstawę wartościowania częstości zdarzeń niepożądanych. Efektem działań w zakresie analizy ryzyka jest uzyskanie związku między zdarzeniami tzw. szczytowymi i bazowymi.



Tabela 4.6. Zestawienie wybranych metod analizy ryzyka i niezawodności

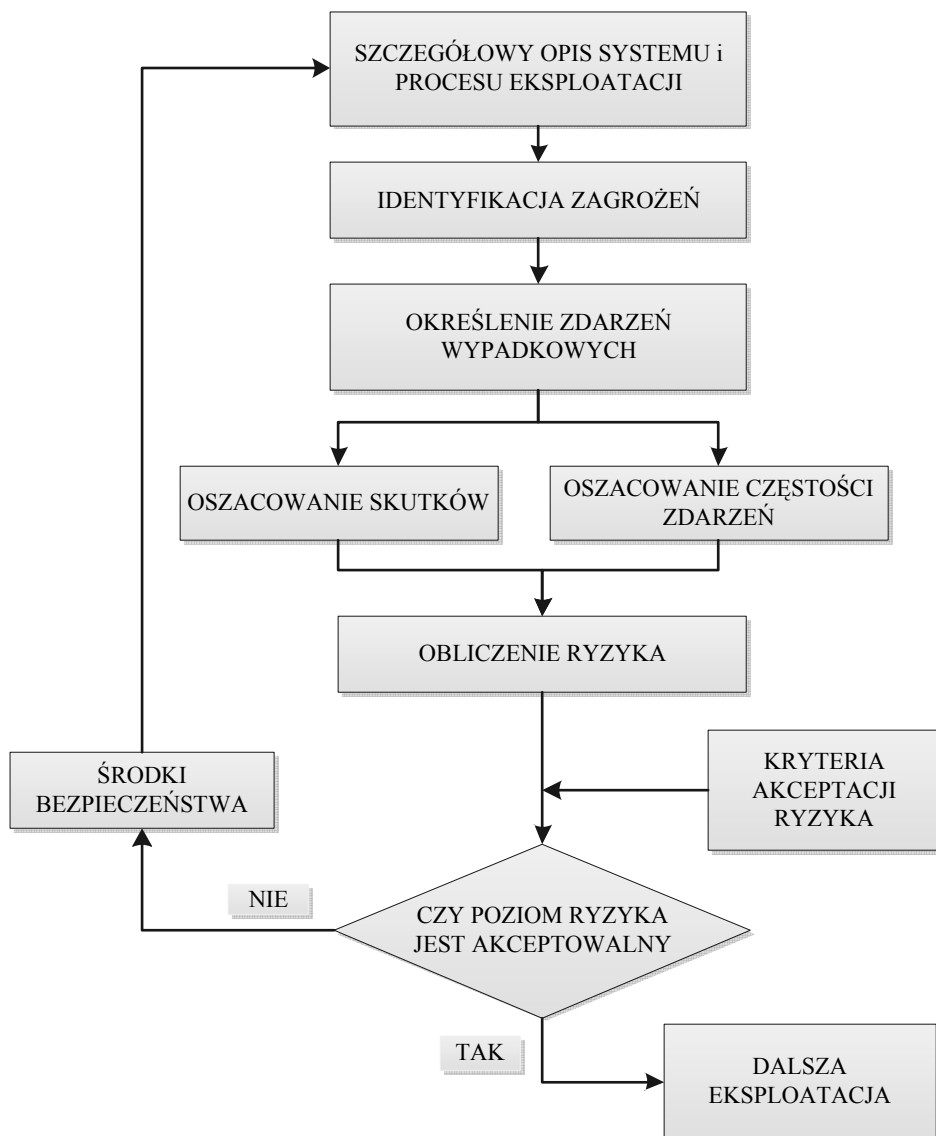
Lp.	Nazwa metody	Analiza ryzyka	Analiza niezawodności
1	Analiza rodzajów i skutków uszkodzeń – <i>FMEA/FMECA</i>	tak	tak
2	Analiza drzew niezdatności – <i>FTA</i>	tak	tak
3	Analiza drzew wydarzeń <i>ETA</i>	tak	tak
4	Schemat blokowy niezawodności – <i>RBD</i>	tak	tak
5	Badanie zagrożeń i zdolności operacyjnych – <i>HAZOP</i>	tak	nie
6	Wstępna analiza zagrożeń – <i>PHA</i>	tak	nie
7	Metoda łańcuchów Markowa	tak	tak
8	Zliczanie części	nie	tak
9	Przyczyna/skutek – <i>What?... If?...</i>	tak	tak
10	Symulacja zdarzeń metodą Monte Carlo – <i>MCM</i>	tak	tak
11	Redukcja systemu	tak	tak
12	Tablica wartości logicznych	tak	tak
13	Listy kontrolne – <i>Check list</i>	tak	nie
14	Metoda delficka	tak	tak

Metody dedukcyjne, przykładowo FTA, są metodami zdarzeniowymi stosowanymi we wczesnym etapie projektowania, pozwalając na określenie na najniższym poziomie dekompozycji zdarzenia i komponenty odpowiedzialne za zagrożenia wygenerowane na poziomie obiektu. Metody indukcyjne (ETA) są analizą skutkową i rozwijają konsekwencje niezdatności na poziomie komponentu na wyższe poziomy dekompozycji. Analiza indukcyjna określa ryzyko na poziomie obiektu (systemu) na podstawie błędów powstających w jego komponentach. Powstaje w ten sposób relacja wiążąca zdarzenia bazowe ze skutkami w systemie lub zdarzenia szczytowe z ich przyczynami u podstaw. Relacje te można uznać za strukturę bezpieczeństwa obiektu [203].

Istotnym elementem analizy jest akceptacja wyznaczonego poziomu ryzyka polegająca na porównaniu obliczonej wartości z wartością dopuszczalną. Rozważane są trzy grupy narażonych obiektów:

- człowiek (indywidualnie jako jednostka i grupowo jako grupa zawodowa, społeczna),
- otoczenie (środowisko naturalne jako woda, powietrze, gleba),
- materia (obiekt fizyczny, strata materialna).

Akceptacja ryzyka dla ludzi odbywa się najczęściej na podstawie wykresów ryzyka dopuszczalnego (*Fatal Accident Risk – FAR*) opracowywanych dla grup czy społeczności na podstawie danych naturalnych dla wykonywanej działalności, wieku, czy miejsca na Ziemi [160]. Wskaźnik *FAR* wyraża prawdopodobieństwo śmierci pojedynczego człowieka na godzinę narażenia w czasie  $10^8$  godzin (4.22). Z danych statystycznych wskaźnik *FAR* wyznacza się jako [73, 273]:

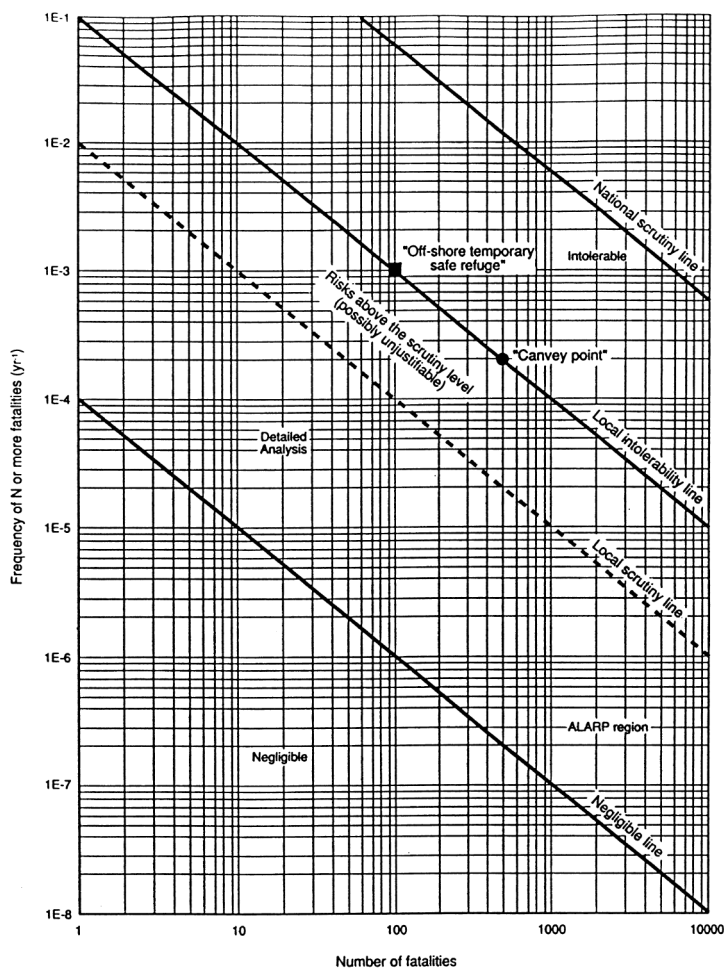


Rys. 4.15. Algorytm oceny ryzyka

$$FAR = \frac{NZG}{GN \cdot NP} 10^8 \quad (4.22)$$

gdzie:  $NZG$  – liczba zgonów w obserwowanym przedziale czasu [osoba/h],  
 $GN$  – czas narażenia w godzinach w obserwowanym przedziale czasu [h/osoba],  
 $NP$  – liczba osób w okresie obserwacji [osoba/h].

Poziomy akceptacji ryzyka dla środowiska i materii ustalane są najczęściej na bazie analizy zysków i strat związanych z analizowanym ryzykiem, poziomem życia, czy dochodem narodowym kraju [160, 270]. Przykładowy wykres służący do akceptowania wyznaczonego ryzyka przedstawiono na rys. 4.16 [160]. Wykres ten może być podstawą tworzenia kryteriów akceptacji ryzyka w odniesieniu do specyficznego obszaru przemysłu.



Rys. 4.16. Wykresy akceptowalnego poziomu ryzyka FAR

Zmniejszanie ryzyka poprzez wprowadzanie środków bezpieczeństwa wiąże się z nakładami finansowymi pogarszającymi efektywność inwestycji. Brak takich środków stanowiących bariery dla zagrożenia może wiązać się ze stratami, co także zmniejsza skuteczność eksploatacji. Równowaga w tym zakresie uzyskiwana jest poprzez analizę i stosowanie technologii najlepszych z dostępnych, ale niepodnoszących

nadmernie kosztów (BATNEC – *Best Available Techniques Not Entailing Excessive Cost* – 1991).

Podana analiza problematyki związanej z bezpieczeństwem systemów technicznych pokazuje dużą złożoność zagadnień analitycznych i niepewność ocen opieranych w dużej mierze na rzadkich zdarzeniach dokumentowanych historycznie w różny, często niejednorodny sposób. Najczęstszymi przyczynami zdarzeń niepożądanych są [134, 334]:

- błędy proceduralne wynikające z nieprzestrzegania zaleceń eksploatacyjnych,
- błędy w zarządzaniu procesami eksploatacyjnymi,
- uszkodzenia obiektów technicznych,
- błędy w oprogramowaniu systemów sterowania, komputerowych, alarmowych itp.,
- błędy człowieka wywołane zmęczeniem, przeciążeniem, zaniedbaniem, pomyłkami, niedoszkoleniem, stresem czy narkotykami i alkoholem,
- błędy „grupowe”, synergiczny efekt odpowiedzialności w grupie.

Wybrane aspekty wpływu człowieka na niezawodność zostały poruszone w badaniach niezawodności autobusów miejskich Jelcz PR-110 U [227]. Wykazano statystyczny związek stażu pracy i przewidywanego dłuższego związku z zakładem pracy (deklarowana chęć dłuższego okresu pracy) z mniejszą uszkadzalnością pojazdów. Podobną zależność większej niezawodności autobusów zaobserwowano dla kierowców starszych wiekiem [227].

## 4.4. System eksploatacji obiektu

### 4.4.1. Klasyczne ujęcie systemu eksploatacji

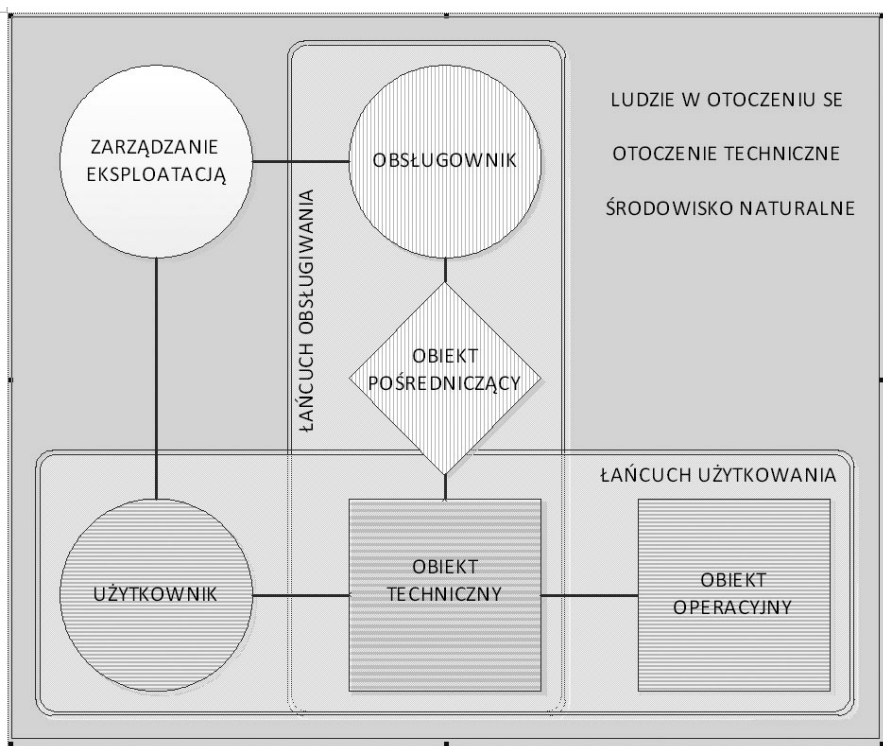
System eksploatacji w ujęciu eksploatacyjnym obejmuje łańcuch działania wraz z otoczeniem, tworząc razem układ eksploatacji [149, 150, 235, 236]. Obiekt eksploatacji jest tu elementem łańcucha działania krążącym pomiędzy użytkowaniem i obsługiwaniem. Obiekt badań jest też elementem systemu eksploatacji *SE* obejmującym system użytkowania *SU* i obsługiwania *SO*, które współlistnieją w określonym otoczeniu systemu eksploatacji *OS*:

$$SE = \langle (SU(OM), SO(OM), OS), W, RUOS \rangle \quad (4.23)$$

gdzie: *SE* – system eksploatacji,  
*OM* – obiekt mechaniczny,  
*SU* – system użytkowania,  
*SO* – system obsługiwania,  
*OS* – otoczenie systemu eksploatacji,  
*W* – właściwości elementów systemu,  
*RUOS* – relacje między elementami systemu użytkowania, obsługiwania i otoczenia.

Obiekt może być elementem systemu użytkowania lub obsługiwania w zależności od jego stanu zdatności, a przebieg zmienności stanu zdatności opisuje proces eksplo-

atacji [107, 227]. Poglądowy schemat takiego punktu widzenia łączącego obiekty z działaniem przedstawiono na rys. 4.17.



Rys. 4.17. System eksploatacji jako układ działania

Przedstawiony schemat systematyzuje i ułatwia identyfikację obiektów biorących udział bezpośrednio i pośrednio w eksploatacji technicznego obiektu badań. Poziom analizy „system eksploatacji” wyznacza trzy obszary dalszej analizy:

- system użytkowania,
- system obsługi,
- otoczenie systemu eksploatacji.

### System użytkowania

System użytkowania stanowi podstawę efektywnego działania obiektu i powinien zapewniać trwale i efektywne wykorzystanie jego funkcji [235, 236]. System ten opisany jest jako:

$$SU(OM) = \langle OM, (E_{SU}, Bu, RepU, Ou), Wu, RU \rangle \quad (4.24)$$

gdzie:  $E_{SU}$  – elementy systemu użytkowania,  
 $Bu$  – infrastruktura (baza) użytkowania,  
 $RepU$  – repertuar użytkowania,

- Ou* – otoczenie – warunki użytkowania,  
*Wu* – właściwości elementów systemu użytkowania,  
*RU* – relacje między elementami systemu użytkowania.

Podany zapis definiuje obiekty, które w procedurze tworzenia modelu badawczego wymagają szczególnej analizy. Zbiór elementów systemu użytkowania tworzą:

- użytkownicy,
- obiekty techniczne użytkowania:
- pośrednik użytkowania (obiekt realizujący funkcję użytkową w systemie),
- przedmiot użytkowania (obiekty wspomagające użytkowanie),
- infrastruktura użytkowania:
- baza użytkowania (infrastruktura użytkowania),
- repertuar użytkowania (zbiór funkcji użytkowych obiektu),
- otoczenie – warunki użytkowania (warunki socjotechniczne oraz naturalne).

W badaniach eksploatacyjnych autobusów miejskich Jelcz PR110U przedstawiono model teoriomnościowy systemu i procesu eksploatacji [213]. Poniżej przedstawiono opis dotyczący użytkowania autobusu miejskiego, w którym model systemu eksploatacji jest oparty na relacji między układami działania użytkowania i obsługiwaniami:

$$SE(p) = \langle U(P), RF \rangle \quad (4.25)$$

gdzie:  $U(P)$  – układ działania pojazdu obejmujący układ użytkowania i obsługiwaniami,  
 $RF$  – relacja opisana na podsystemach użytkowania i obsługiwaniami;

$RF = \langle SU \times SO \rangle$ ,

$SU(P) = \langle HU, EU, STU, RU \rangle$  – system użytkowania,

$HU = \left\{ \bigcup_i hu_i \right\}$  – zbiór użytkowników autobusu ( $i = 1, 2$ ; kierowcy, pasażerowie zaliczeni tu do użytkowników pośrednich),

wie zaliczeni tu do użytkowników pośrednich),

$EU = \left\{ \bigcup_i eu_i \right\}$  – zbiór użytków ( $i = 1, \dots, 5$ ; przechowywanie, jazdy manewrowe, jazdy kursowe całodzienne, jazdy kursowe szczytowe poranne i popołudniowe),

we, jazdy kursowe całodzienne, jazdy kursowe szczytowe poranne i popołudniowe),

$STU = \left\{ \bigcup_i stu_i \right\}$  – zbiór stanowisk użytkowania ( $i = 1, \dots, 5$ ; miejsca postoju

pojazdu zdatnego, trasy dojazdowe, trasy jazd kursowych całodziennych, trasy jazd kursowych w szczytach porannym i popołudniowym),

$RU = HU \times EU \times STU$  – relacja na powyższych elementach.

Przykładową relację  $RU = HU \times STU$  między zbiorem użytkowników i stanowiskami użytkowania przedstawia tabela 4.7.

Tabela 4.7. Relacje  $R^{UA}$  w systemie użytkowania autobusów (rozkład użytkowników i użytkowników w bazie użytkowej)

	$stu_1$	$stu_2$	$stu_3$	$stu_4$	$stu_5$
$hu_1$	$eu_1$	$eu_2$	$eu_3$	$eu_4$	$eu_5$
$hu_2$	–	–	$eu_3$	$eu_4$	$eu_5$

### System obsługiwan

System obsługiwan jest opisany jako (4.26): zbiór elementów systemu obsługiwan (obsługownicy (mechanicy), obiekt – przedmiot obsługiwan, urządzenia diagnostyczne, narzędzia, materiały eksploatacyjne, elementy wymienne), infrastruktura- baza obsługiwan, repertuar obsługiwan, ich właściwości oraz relacje opisane na tych elementach:

$$SO(OM) = \langle OM, (E_{SO}, Bo, RepO, Oo), Wo, RO \rangle \quad (4.26)$$

gdzie:  $E_{SO}$  – elementy systemu obsługiwan,  
 $Bo$  – infrastruktura (baza) obsługiwan,  
 $RepO$  – repertuar obsługiwan,  
 $Oo$  – otoczenie – warunki obsługiwan,  
 $Wo$  – właściwości elementów systemu obsługiwan,  
 $RO$  – relacje między elementami systemu.

Przykład podanego podejścia zaczerpnięto z badań autobusów miejskich [227]. System obsługi opisano, biorąc po uwagę zakres czynności obsługowych przypisanych do zasadniczych układów autobusu. System obsługi autobusów  $AUT$  jest tu więc zdefiniowany zależnością (4.27):

$$SO(AUT) = \langle AUT, (E_{SOP}, Bo_p, RepO_p, Oo), Wo, R_{SO} \rangle \quad (4.27)$$

gdzie:  $E_{SOP} = \{e_i\}$ ,  $i = 1, \dots, 5$  – baza obsługiwan autobusów obejmująca mechaników i kierownictwo obsługiwan, hale obsługową, stanowisko postoju pojazdów oczekujących na obsługę, stanowisko tankowania autobusów, stanowiska mycia autobusów,  
 $Bo_p = \{bo_i\}$ ,  $i = 1, \dots, 6$  – stanowiska obsługiwan przypisane odpowiednio do układów: silnik, przeniesienie napędu, układ jezdny i sterowania, zawieszenie i stabilizacja, osprzęt, układ elektryczny,  
 $RepO_p = \{rep_i\}$ ,  $i = 1, \dots, 5$  – działania obsługowe obejmujące: obsługę codzienną, tankowanie, mycie, obsługi profilaktyczne, obsługi korekcyjne,  
 $Oo_p = \{oo_i\}$ ,  $i = 1, \dots, 4$  – otoczenie obsługiwan: system komunikacji miejskiej, dostępność materiałów eksploatacyjnych i części wymiennych, kultura techniczna mechaników, finansowanie obsług,  
 $Wo$  – właściwości elementów systemu obsługiwan (wielkości geometryczne i wymiarowe, układ terytorialny, stan techniczny, wartość itp.),  
 $R_{SO}$  – relacje na elementach systemu.

Przykładowa relacja  $R_{SO}$  opisana na elementach bazy obsługowej i personelu obsługowym pokazana jest w tabeli 4.8.

Tabela 4.8. Rozkład działań pomiędzy personel obsługowy i elementy bazy obsługowej

Stanowisko obsługi		Mechanik	Elektryk samochodowy	Kierowca
Stanowisko mycia		Mycie pojazdu	–	–
Stacja paliw		Uzupełnianie paliwa	–	–
Stanowisko postoju pojazdów oczekujących na obsługę		Drobne usługi korekcyjne	Drobne usługi korekcyjne	OC
Hala obsługowa (specjalistyczne stanowiska obsługi)	silnik	Obsługa P/K	–	–
	przeniesienie napędu	Obsługa P/K	–	–
	układ jezdny i sterowania	Obsługa P/K	–	–
	zawieszenie i stabilizacja	Obsługa P/K	–	–
	osprzęt	Obsługa P/K	–	–
	układ elektryczny	–	Obsługa P/K	–

P/K – obsługa profilaktyczna/korekcyjna (naprawa),  
OC – obsługa codzienna.

### Otoczenie systemu eksploatacji

Otoczenie systemu eksploatacji jest także elementem eksploatacji i opisane jest jako (4.28): zbiór elementów otoczenia (obiekty i urządzenia infrastruktury technicznej nie biorące udziału w eksploatacji obiektu badań, ludzie znajdujący się w obszarze wpływu eksploatacji, elementy środowiska naturalnego), ich właściwości oraz wzajemne relacje między tymi elementami:

$$OS = \langle E_{OS}, W_{OS}, RS \rangle \quad (4.28)$$

gdzie:  $E_{OS}$  – elementy otoczenia systemu eksploatacji,

$W_{OS}$  – właściwości elementów otoczenia,

$RS$  – relacje na elementach systemu otoczenia (środowiska).

Otoczeniem w klasycznym ujęciu określa się obiekty (systemy) wpływające na badany system, ale nie będące pod wpływem tego systemu [76, 97, 175]. W przypadku eksploatacji obiektów mechanicznych należy zmodyfikować ten pogląd, biorąc pod uwagę uwarunkowania bezpieczeństwa. Otoczenie eksploatacji istotnie oddziałuje na eksploatację w zakresie wydajności i efektywności, jakości, degradacji, niezawodności i bezpieczeństwa [227], ale jest także obiektem, w szerokim znaczeniu tego słowa,



potencjalnie narażonym na zdarzenia niepożądane wywołane przez eksploatację obiektu. Znaczny wzrost liczby katastrof przemysłowych w drugiej połowie XX w. oraz ich tragiczne skutki [203] wymusiły włączenie problematyki bezpieczeństwa do bieżącego zarządzania eksploatacją [103, 283]. Należy więc uwzględnić w analizie czynników otoczenia eksploatacji obiektu mechanicznego zarówno wpływ otoczenia na eksploatację, jak i wpływ tej eksploatacji na otoczenie. Do głównych obszarów określających pojęcia otoczenia eksploatacji zalicza się: obcą infrastrukturę techniczną, ludzi nie związanych z eksploatacją (czynniki demograficzne, kulturowe, socjologiczne), ekonomię i system gospodarczy (struktura, system polityczny, zarządzanie, prawodawstwo, itp.).

Do najważniejszych czynników definiujących warunki eksploatacji autobusów Jelcz PR110U zaliczono:

- czynniki subiektywne, podlegające zarządzaniu:
- cechy psychofizyczne kierowców i mechaników,
- organizacja użytkowania,
- organizacja obsługi,
- czynniki obiektywne zależne od lokalizacji systemu:
- uwarunkowane działaniem autobusu (warunki ruchu, makro- i mikrogeometria drogi),
- czynniki geoklimatyczne, takie jak: czynniki atmosferyczne, podłoże robocze itp. (łącznie wyznaczono 41 atrybutów opisujących warunki otoczenia) [227].

#### 4.4.2. System eksploatacji w ujęciu obiektowym

Proponowane w pracy podejście obiektowe klasyfikuje obiekty w eksploatacji ze względu na kryterium podobieństwa atrybutów charakteryzujących obiekty w poszczególnych obszarach eksploatacji *OBE*. W każdym z obszarów eksploatacji wyróżnia się obiekty podlegające podobnej dekompozycji, mające wspólne cechy na tych samych poziomach dekompozycji. Zwiększanie poziomu dekompozycji, uszczegółowienie obiektu, powoduje różnicowanie zarówno atrybutów pod względem ich rodzaju, jak i ich wartości.

W tabeli 4.9 przedstawiono dekompozycję obiektu eksploatacji oraz atrybuty charakterystyczne dla danego poziomu dekompozycji. Przykład zaczerpnięto z badań eksploatacyjnych autobusów miejskich realizowanych w pięciu środowiskach eksploatacji. Pokazano tu podejście obiektowe, różniące się od wcześniejszej koncepcji badań. Ze względu na znaczną wielkość zbioru potencjalnych atrybutów mogących posłużyć do wyznaczenia miar oceny założonych w celu badań *CBE*, ograniczono w tabeli zapis do kilku poziomów, ale wskazano tu szerszy zakres atrybutów niż to ujęto w badaniach [227].

Tabela ta pokazuje sposób wyboru istotnych dla celu badań obiektów i ich atrybutów. Analogiczna analiza obiektów dająca w efekcie zbiór opisujących je atrybutów wymagana jest dla wszystkich obszarów eksploatacji. Końcowym wynikiem analizy jest model obiektów systemu eksploatacji, tj. ich wykaz wraz z zestawem atrybutów opisowych.

Tabela 4.9. Atrybuty obiektu badań na różnych poziomach dekompozycji

Poziom dekompozycji	Atrybuty identyfikacyjne	Atrybuty operacyjne	Atrybuty zdarzeniowe
<b>Autobus</b> Jelcz PR110U	Marka, typ, nr pojazdu, cena, nr rejestracyjny, data początku eksploatacji, prognozowana trwałość, plan obsługi profilaktycznych	Zdatność, data najbliższej obsługi, kierowca, czas pracy, zadanie, dolewka paliwa	Rodzaj zdarzenia, data zdarzenia, przebieg podczas zdarzenia, skutki, data zakończenia stanu po zdarzeniu, koszt naprawy
Autobus <b>układ</b>	Nazwa, funkcja, przynależność do wyższego poziomu dekompozycji, dział obsługi sprawujący nadzór, plan obsługi profilaktycznych	–	Rodzaj obsługi/uszkodzenia, data/przebieg podczas obsługi/uszkodzenia, skutki uszkodzenia, data zakończenia obsługi/naprawy, koszt obsługi/naprawy
Autobus układ <b>zespół</b>	Nazwa, typ, producent, przynależność do wyższego poziomu dekompozycji, dział obsługi sprawujący nadzór, materiały eksploatacyjne	–	Rodzaj uszkodzenia, data uszkodzenia, przebieg podczas uszkodzenia, skutki, data zakończenia naprawy, koszt naprawy
Autobus układ zespół <b>element</b>	Nazwa, typ, producent, cena, przynależność do wyższego poziomu dekompozycji	–	Rodzaj uszkodzenia, data uszkodzenia, przebieg podczas uszkodzenia, skutki, data zakończenia naprawy, koszt naprawy

## 4.5. Proces eksploatacji

Obiekt znajduje się w trakcie eksploatacji w jednym z  $k$  wyróżnionych stanów eksploatacyjnych  $B = \{1, 2, \dots, k\}$  określonych przez zbiór atrybutów  $W$ . Często, w wielostanowym modelowaniu niezawodności, stany eksploatacyjne sortowane są od „najgorszego” (stan niezdatności) do najlepszego (stan zdatności). Proces eksploatacji jest funkcją przypisującą chwili  $t : t \in <0, T>$  stan eksploatacyjny  $B(t)$ . W najogólniejszym ujęciu, stany eksploatacyjne, to użytkowanie i obsługiwane wiążące się odpowiednio ze stanami zdatności i niezdatności. W pracy wprowadzono pojęcie stanów poprawnej i zakłóconej eksploatacji, odnoszących się odpowiednio do użytkowania i obsługiwania lub zdatności i niezdatności z zastrzeżeniem, że nie wszystkie stany obsługiwania odnoszą się do niezdatności (obsługi profilaktyczne nie są następstwem uszkodzenia), choć powodują niegotowość obiektu.

Dekompozycja stanów eksploatacji na stany poprawnej i zakłóconej eksploatacji prowadzi do podziału zbioru  $B$  na podzbiory obejmujące odpowiednie stany:

$$B = \{BZ, BP\} \quad (4.29)$$

$$BZ = \{1, 2, \dots, z\} \quad (4.30)$$

$$BP = \{p, p + 1, \dots, k\} \quad (4.31)$$

gdzie:  $BZ$  – zbiór stanów zakłóconej eksploatacji,  
 $BP$  – zbiór pożądanych stanów eksploatacji (użytkowania),  
 $z$  – liczba stanów zakłóconej eksploatacji,  
 $k$  – liczba wszystkich wyróżnionych stanów,  
 $p = z + 1$ .

Pozwala to na uwzględnienie oprócz stanów eksploatacyjnych (użytkowania i obsługi) i stanów niezawodnościowych (zdatności i niezdatności), także stanów o nieodpowiedniej wydajności systemu (poprawna i zakłócona praca). Obiekt naprawialny przebywa w trakcie eksploatacji naprzemiennie w stanach zdatności i niezdatności, przy czym stan zdatności obejmuje stan oczekiwania na użytkowanie oraz stan aktywnego użytkowania (spełniania funkcji), a stan niezdatności obejmuje stan postoju administracyjnego, logistycznego oraz stany aktywnej obsługi profilaktycznej lub korekcyjnej (naprawa). Powiązany z tymi stanami czas przebywania obiektu umożliwia wyznaczenie funkcji (wskaźnika) gotowości, będącej jedną z najważniejszych miar oceny w eksploatacji obiektu mechanicznego. Funkcję tę wyznacza się jako [114, 260]:

$$k_g(t) = \frac{\sum_i t_i^{BP}}{\sum_j t_j^{BZ} + \sum_i t_i^{BP}} = \frac{\sum_i t_i^{BP}}{t} = 1 - \frac{\sum_j t_j^{BZ}}{t} \quad (4.32)$$

gdzie:  $t_j^{BZ}, t_i^{BP}$  – skumulowany czas przebywania w  $j$ -tym/ $i$ -tym stanie zakłóconej/poprawnej eksploatacji,

$\sum_i t_i^{BP}$  – skumulowany czas przebywania w stanach poprawnej eksploatacji,

$\sum_j t_j^{BZ}$  – skumulowany czas przebywania w stanach zakłóconej eksploatacji,

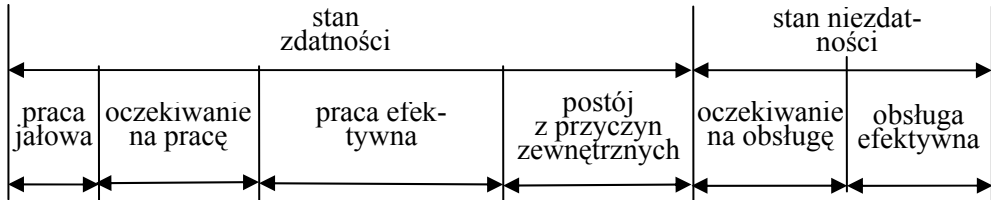
$\sum_j t_j^{BZ} + \sum_i t_i^{BP} = t, j = 1, \dots, z, i = p, \dots, k$ .

Należy zwrócić uwagę na to, że czas w powyżej formule może być wyrażony w: godzinach, dniach inwentarzowych, cyklach pracy lub innych miarach upływu czasu eksploatacyjnego charakterystycznych dla badanego obiektu. Przyjęcie różnych miar powodować będzie różnicowanie wyników obliczeń, właśnie ze względu na pominięcia lub uogólnienia stanów niższego poziomu dekompozycji.

W analizie stanów i czasu eksploatacji należy mieć na uwadze praktycznie osiągalną rozdzielczość zależną od możliwości obserwacyjnych personelu i sposobu gromadzenia danych.

Na rysunku 4.18 pokazano dekompozycję stanów: zdatności i niezdatności, którym przypisano 2 stany obsługi i 4 stany użytkowania. Każdy z podstanów (stanów)

może być dalej dekomponowany w zależności od celu analizy i dostępnych danych o czasie ich realizacji.



Rys. 4.18. Dekompozycja stanów niezawodności na stany eksploatacyjne

### Proces poprawnego użytkowania obiektu

Proces użytkowania przebiega przez wszystkie stany, w których mogą być realizowane funkcje użytkowe obiektu. Proces ten zdekomponowany do niższego poziomu (ze względu na funkcje składowe obiektu) może obejmować [101]:

- stan i odpowiadający mu czas oczekiwania na pracę (spełnianie funkcji),
  - stan i odpowiadający mu czas pracy (spełnianie funkcji),
- Przykładowymi stanami pracy dla pojazdu są:
- stan jazdy z ładunkiem (praca efektywna),
  - stan jazdy bez ładunku,
  - stan postoju w oczekiwaniu na pracę (bez kierowcy),
  - stan wymuszonego postoju w ruchu (np. zatrzymanie przed sygnalizacją świetlną na skrzyżowaniach),
  - stan administracyjnego postoju w pracy (np. przerwa w pracy kierowcy, przerwa na posiłek itp.),
  - stan postoju podczas załadunku (ładowanie towaru, wsiadanie pasażerów),
  - stan postoju podczas rozładunku (wyładowanie towaru, wysiadanie pasażerów).

Proces poprawnej eksploatacji jest funkcją przebiegającą przez stany poprawnej eksploatacji:  $BP(t)$ .

### Proces zakłóconej eksploatacji

Proces zakłóconej eksploatacji został wprowadzony do opisu procesu eksploatacji ze względu na utożsamianie obsługi z naprawą, podczas gdy obsługiwane profilaktyczne oznacza niemożność korzystania z funkcji obiektu, ale jest stan intencjonalny, zaplanowany w dogodnej chwili i przeprowadzany na zdadnym technicznie obiekcie. Przyjmuje się więc, że proces zakłóconej eksploatacji przebiega przez wszystkie stany, w których nie mogą być realizowane funkcje użytkowe obiektu i przebiega przez stany zakłóconej eksploatacji:  $BZ(t)$ . Obsługiwanie jest klasyfikowane generalnie na dwa rodzaje: obsługiwane profilaktyczne (obsługa wykonywana w zaplanowanym czasie) oraz obsługiwane korekcyjne (naprawa po wystąpieniu i zdiagnozowaniu uszkodzenia).

W procesie zakłóconej eksploatacji wyróżnić należy takie procesy składowe, jak:

- stan i odpowiadający mu czas oczekiwania na obsługiwane tzw. opóźnienie logistyczne obejmujące czas osiągnięcia i dostarczenia części wymiennych i materiałów,
- stan i odpowiadający mu czas oczekiwania na obsługiwane tzw. opóźnienie administracyjne obejmujące organizację zasobów ludzkich, opracowanie technologii obsługi, przygotowanie narzędzi i przyrządów specjalnych,
- stan i odpowiadający mu czas obsługi profilaktycznej (diagnozowanie, regulacja, obsługa planowa),
- stan i odpowiadający mu czas obsługi korekcyjnej (przygotowanie, diagnostyka, demontaż, naprawa właściwa, dostarczenie części wymiennych, montaż, sprawdzenie).

Celem analizy procesu eksploatacji jest określenie stanów wymagających obserwacji i gromadzenia danych o zmianach tych stanów. Chwile zmian stanów pozwalają na wyznaczenie okresów przebywania w poszczególnych stanach, a stąd wskaźników i miar oceny eksploatacji obiektu.

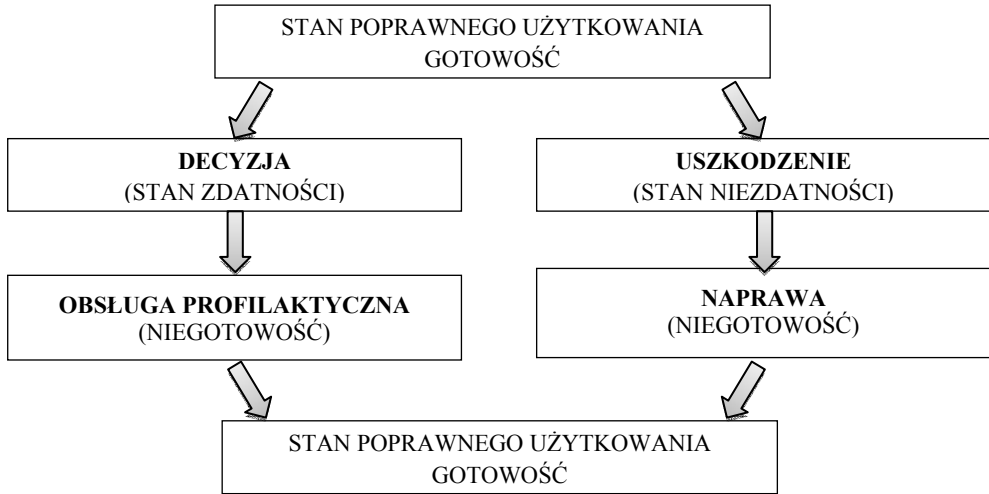
## 4.6. Naprawa i obsługa obiektu mechanicznego

Zmiana stanu ze stanu poprawnej eksploatacji do stanu zakłóconej eksploatacji odbywa się na skutek uszkodzenia lub decyzji administracyjnej odnoszącej się zwykle do obsługi profilaktycznej (rys. 4.19).

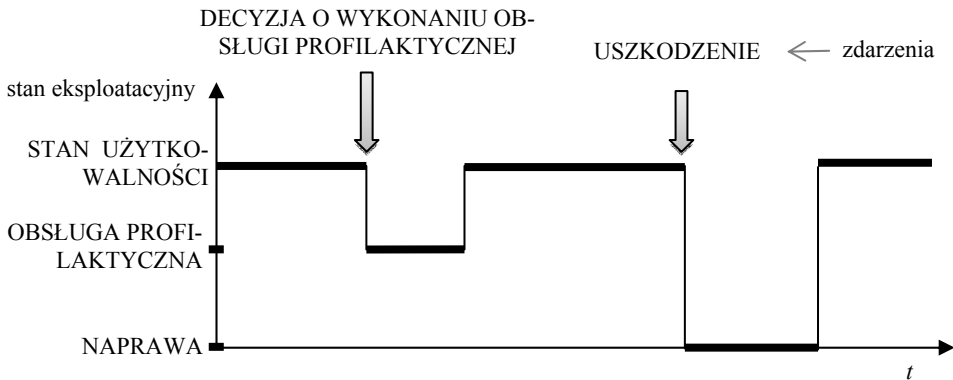
Na rysunku 4.20 pokazano możliwości realizacji procesu eksploatacji i znalezienia się obiektu w stanie niezdatności. Jedno przejście ze stanu zdatności do niezdatności prowadzi poprzez wydanie decyzji eksploatacyjnej o przeprowadzeniu obsługi profilaktycznej, drugie przejście wynika z uszkodzenia obiektu i konieczności przeprowadzenia naprawy.

### 4.6.1. Uszkodzenie obiektu mechanicznego

Szczególne znaczenie w eksploatacji odgrywają uszkodzenia obiektu zakłócające poprawne spełnianie jego funkcji. Uszkodzenie ma w literaturze wiele definicji i ze względów językowych ma również różne znaczenia i rangę. Ma generalnie określenie nieuniknionego zjawiska obserwowanego we wszystkich systemach technicznych [327, 328]. W aspekcie mechanicznym uszkodzenie jest zdarzeniem polegającym na przekroczeniu wytrzymałości (odporności) przez obciążenie [217], a rezultatem tego zdarzenia jest przerwanie funkcji spełnianej przez obiekt [31]. Definicja uszkodzenia, mówiąca o zdarzeniu powodującym niezdatność do spełniania wymaganych funkcji [257], zwraca uwagę na pierwotnie zaprojektowaną i oczekiwaną przez użytkownika funkcję opisaną wybranymi atrybutami. Normatywnie, rozróżniane jest pojęcie uszkodzenia (*failure*) jako zdarzenia przerywającego funkcjonowanie obiektu oraz pojęcie uszkodzenia (*fault*) jako stanu niezdatności wynikającego ze zdarzenia uszkodzenia [114].



Rys. 4.19. Relacja między stanami zdatności i niezdatności oraz gotowości i niegotowości



Rys. 4.20. Graficzna ilustracja niegotowości obiektu spowodowanej obsługą profilaktyczną lub uszkodzeniem

W metodyce badań eksploacyjnych proponuje się informacyjne podejście do uszkodzenia, tj. traktując uszkodzenie jako źródło informacji. Zdarzenie powodujące przerwanie poprawnego spełniania funkcji obserwowane jest w każdym z proponowanych obszarów badań *OBE*. Obiekt, skoro został zidentyfikowany jako obiekt biorący udział w eksploatacji, spełnia pewne zadania (funkcje) i przerwanie tych funkcji jest równoznaczne z uszkodzeniem. Obserwacja badawcza ukierunkowana jest oczywiście na obiekt mechaniczny, ale ocena wyrażana miarami oceny może wymagać poszukiwania związków i relacji między różnymi zdarzeniami, także między uszkodzeniami różnych obiektów w eksploatacji.

Uszkodzenia w eksploatacji charakteryzuje się [85, 227]:

- postacią, tj. sposobem, w jaki zauważa się uszkodzenie,
- przyczyną, czyli pierwotnym zjawiskiem prowadzącym do uszkodzenia,
- skutkiem oznaczającym rodzaj i wielkość strat wynikających z uszkodzenia,
- sposobem naprawy, sposobem przywrócenia obiektu do stanu zdadności.

Uszkodzenie postrzegane jest na różnych poziomach dekompozycji (definicyjnie) oraz z różną szczegółowością (opisowo). Prowadzi to do wyznaczenia zbioru niezbędnych informacji identyfikacyjnych i opisowych tworzących bazę danych o uszkodzeniach. Uszkodzenie *USZK* traktuje się w badaniach eksploatacyjnych jako trójkę:

$$USZK = \langle OE_j, t_{uis}, OPU, KUSZK \rangle \quad (4.33)$$

gdzie:  $OE_j$  – obszar eksploatacji, którego dotyczy uszkodzenie,  
 $t_{uis}$  – chwila uszkodzenia,  
 $OPU$  – opis uszkodzenia:  $OPU = \langle opu_1, opu_2, opu_3, opu_4 \rangle$ ,  
 $opu_1$  – postać uszkodzenia,  
 $opu_2$  – przyczyna uszkodzenia,  
 $opu_3$  – skutek uszkodzenia,  
 $opu_4$  – sposób usunięcia uszkodzenia,  
 $KUSZK$  – koszt uszkodzenia (koszt zewnętrzny związany ze stratami spowodowanymi nagłym przerwaniem funkcjonowania obiektu).

Informacje zawarte w zmiennych  $opu_i$  można zapisać w postaci: bezpośredniego opisu tekstowego, cyfrowego zapisu kodowego według katalogu kodów właściwych opisów lub w postaci wybierania opcji pól rozwijalnych „combo” w przypadku zastosowania komputerowych okien wymiany danych. Bezpośredni opis tekstowy jest rozwiązaniem łatwym, niewymagających specjalnych instrukcji, jednak może stanowić źródło niepewności i archiwizowania takich samych zdarzeń jako różnych.

Przykładem różnorodności zapisu tego samego zdarzenia jest opis uszkodzenia w eksploatacyjnej bazie danych o uszkodzeniach układu KTZ w kopalni węgla brunatnego (tab. 4.10) [196, 197, 207]. To samo zdarzenie, oznaczające „Brak napięcia 500 V”, ma przy  $w = 28$  przypadkach wystąpienia, aż  $p = 10$  różnych postaci zapisów. „Ręczne przetwarzanie” takich danych pozwoliłoby na eliminację większości powtórzeń, jednak analiza kilkunastu tysięcy rekordów byłaby zbyt uciążliwa i mało wydajna. Komputerowe przetwarzanie, co prawda szybkie i „automatyczne”, uwzględniłoby każdy z podanych zapisów jako inne zdarzenie i wprowadzałoby błędy oszacowania wskaźników niezawodności.

Ocenę poprawności zapisu zdarzenia w bazie danych można ocenić wskaźnikiem  $WI$  (4.38), który przyjmuje wartość równą 1 w przypadku pełnej jednoznaczności zapisu (jeden opis jednego zdarzenia). Dla cytowanego przypadku  $WI = 0,68$  [207].

$$WI = \frac{w - p + 1}{w} \quad (4.34)$$

Tabela 4.10. Przykłady różnorodności zapisu zdarzenia

Lp.	Opis uszkodzenia	Liczba wystąpień
1	Brak 500v	3
2	Brak 500 V. Uszkodzony przewód	2
3	Brak 500 V	2
4	Brak 500V.	1
5	Brak napięcia	14
6	Brak napięcia 500v	3
7	Brak napięcia 500V	1
8	Brak napięcia 500 V.	3
9	Brak napięcia 500V.	2
10	Brak napięcia 500v – zwalniak l;d – zwarcie	3

W analizowanej bazie wystąpiło tylko w jednym roku obserwacji aż 825 różnych opisów zdarzeń eksploatacyjnych (uszkodzeń, zatrzymań, postojów) na 26 770 rekordów.

Lepszym rozwiązaniem, pozwalającym na bardziej jednoznaczne archiwizowanie informacji, jest kodowanie informacji. Wymaga to jednak wcześniejszego rozpoznania i przygotowania listy potencjalnych zdarzeń, a zdarzenia nieprzewidziane na etapie projektowania bazy danych można wówczas klasyfikować jako „inne”. W systemie zbierania informacji o eksploatacji koparek wielonaczyniowych węgla brunatnego (SNK) [85] zaproponowano podawanie informacji o rodzaju, przyczynie, skutku uszkodzenia i sposobie naprawy poprzez wybieranie z rozwijalnych pól „combo” (tab. 4.11).

Tabela 4.11. Opcje wybierane z rozwijalnego menu opisujące uszkodzenia w systemie SNK

Rodzaj uszkodzenia	Przyczyna uszkodzenia	Skutek uszkodzenia	Czynności po uszkodzeniu
Złamanie	Błąd obsługi	Maszyna zdatna	Naprawa
Pęknięcie	Przyczyna meteorologiczna	Maszyna zdatna z ograniczeniami	Wymiana
Zużycie ciernie	Czynniki zewn. (inne)	Maszyna niezdatna	Demontaż
Zatarcie	Brak smarowania		Montaż
Wyboczenie	Urobek		Regulacja
	Wtrącenia w gruncie		Konserwacja

Uszkodzenie w systemach technicznych określane jest jako zdarzenie przerywające funkcję obiektu i powodujące przejście obiektu do stanu niezdatności. Uszkodzenie jest więc bezpośrednio powiązane z funkcją wykonywaną przez dany system lub podsystem funkcjonalny. Poziom analizy złożoności systemu wpływa znacząco na różnorodność opisu zdarzeń związanych z uszkodzeniami. Wyższe poziomy złożoności, takie jak: obiekt, układ, zespół funkcjonalny, obejmują najczęściej rodzaje uszkodzeń



związane z zaburzeniem funkcji głównej, przyczyny uszkodzenia dotyczą otoczenia systemu eksploatacji lub jego organizacji, a skutki odnoszą się do bezpieczeństwa lub niezrealizowanych efektów działania obiektu. Na niższych poziomach złożoności odnotowywane rodzaje uszkodzeń wiążą się z fizycznym procesem destrukcyjnym odwzorowującym sposób uzewnętrznienia się uszkodzenia (złamanie, zgięcie, pęknięcie, zużycie itp.) [200]. W tabelach 4.12 i 4.13 przedstawiono przykładowe opisy przyczyn uszkodzeń w odniesieniu do całych obiektów i ich niższych poziomów dekompozycji.

Tabela 4.12. Postaci uszkodzeń mechanicznych na poziomie OBIEKT

Lp.	Postać uszkodzenia	Lp.	Postać uszkodzenia
1	Brak działania (brak usługi, produkcji)	5	Obniżone bezpieczeństwo
2	Obniżona wydajność	6	Nadmierna energochłonność
3	Obniżona jakość	7	Wysokie koszty działania
4	Obniżony komfort pojazdu	8	Niedotrzymanie reżimów czasowych

Tabela 4.13. Postaci uszkodzeń mechanicznych na poziomie ELEMENT

Lp.	Postać uszkodzenia	Lp.	Postać uszkodzenia
1	Rozerwanie, rozdarcie	18	Zły, błędny rozruch
2	Zgięcie, zmięcie	19	Niemożliwość zatrzymania
3	Wibracja, drganie	20	Niemożliwość uruchomienia
4	Ograniczony, niepełny przepływ	21	Niemożliwość przełączenia
5	Niemożliwość otwarcia	22	Przedwczesne zadziałanie
6	Niemożliwość zamknięcia	23	Opóźnione zadziałanie
7	Niepełne otwarcie	24	Błąd zasilania (zbyt małe)
8	Niepełne zamknięcie	25	Błąd zasilania (zbyt duże)
9	Wyciek, wypływ wewnętrzny	26	Błąd na wyjściu (zbyt małe)
10	Wyciek, wypływ zewnętrzny	27	Błąd na wyjściu (zbyt duże)
11	Przekroczenie granic tolerancji w górę	28	Brak zasilania
12	Przekroczenie granic tolerancji w dół	29	Brak na wyjściu
13	Niepełne działanie	30	Zwarcie elektryczne
14	Przerywane, niepewne działanie	31	Przerwa w obwodzie elektrycznym
15	„Dziwne”, nieoczekiwane działanie	32	Upływ prądu
16	Błędne wskazanie	33	Inne wyjątkowe postaci uszkodzeń mogące pojawić się w odniesieniu do charakterystyk komponentu, jego wymagań i więzów
17	Brak pozycjonowania, nieutrzymywanie ustalonej pozycji		

Skutki uszkodzeń mogą być kojarzone z komponentami obiektu zgodnie z przyjętym stopniem dekompozycji, a klasyfikowane na poziomie całego obiektu odnoszą się do zdatności obiektu, wydajności lub sprawności w odniesieniu do głównej funkcji obiektu (stopień realizacji funkcji).

Często rozróżniane są efekty uszkodzeń od ich skutków. Efekt jest pojedynczym zdarzeniem bezpośrednio związanym z obiektem, traktowanym jako dowolna zmiana stanu technicznego wywołana uszkodzeniem. Skutki (szkody) są wynikiem logicznego

ciągu zdarzeń po uszkodzeniu i oddziałują na obiekt i system eksploatacji. W odniesieniu do systemów technicznych o dużym znaczeniu, skutki uszkodzeń klasyfikuje się w cztery kategorie stosownie do zasięgu wpływu wywołujących je uszkodzeń [291–293]:

Tabela 4.14. Klasyfikacja opisów uszkodzenia według różnych kryteriów

Lp.	Kryterium	Opis uszkodzenia
1	Miejsce obiektu w systemie eksploatacji	<ul style="list-style-type: none"> <li>poziom złożoności uszkodzonego obiektu</li> <li>relacje funkcjonalne</li> <li>struktura niezawodnościowa</li> <li>struktura bezpieczeństwa</li> </ul>
2	Faza zakłóconego procesu eksploatacji	<ul style="list-style-type: none"> <li>parametry stanu (wielkości geometryczne, wielkości fizyczne, własności materiałowe itp.)</li> <li>wartości krytyczne parametrów stanu</li> <li>czasy przebywania w stanach: wymagane, rzeczywiste</li> </ul>
3	Charakterystyka częstości pojawiania się uszkodzenia	<ul style="list-style-type: none"> <li>czas do/między uszkodzeniami (wartości liczbowe, rozkłady prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia)</li> <li>intensywność uszkodzeń</li> </ul>
4	Charakterystyka czasu odnowy	<ul style="list-style-type: none"> <li>czas odnowy (wartości liczbowe, rozkłady prawdopodobieństwa czasu naprawy)</li> <li>czasy faz odnowy (diagnostyki, demontażu, naprawy, regeneracji, wymiany, montażu, sprawdzania)</li> </ul>
5	Przyczyna uszkodzenia	<ul style="list-style-type: none"> <li>pierwotna, wtórna</li> <li>starzenie, degradacja, człowiek, otoczenie</li> <li>przekroczenie dopuszczalnego obciążenia, obniżenie wytrzymałości,</li> </ul>
6	Rodzaj uszkodzenia	<ul style="list-style-type: none"> <li>złamanie, zgięcie, przebicie, zatarcie, nadmierny luz</li> <li>brak ruchliwości, nadmierna ruchliwość</li> </ul>
7	Skutek uszkodzenia	<ul style="list-style-type: none"> <li>zagrożenie dla ludzi, środowiska</li> <li>utrata obiektu</li> <li>strata produkcji</li> <li>uszkodzenia wtórne innych obiektów</li> </ul>
8	Sposób odnowy	<ul style="list-style-type: none"> <li>wymiana</li> <li>regeneracja</li> <li>regulacja</li> <li>naprawa złożona</li> </ul>
9	Koszt bezpośredni i pośredni związany z uszkodzeniem	<ul style="list-style-type: none"> <li>koszt utraty obiektu</li> <li>koszt utraty funkcji (koszt utraconej produkcji, usługi, zaburzenie działania innych systemów)</li> <li>koszt odszkodowań zdrowotnych, środowiskowych</li> </ul>

- uszkodzenia i skutki **pomijalne** (uszkodzenia mogące nieznacznie wpływać na efektywność systemu, bez wpływu na bezpieczeństwo życia i środowiska),
- uszkodzenia i skutki **znaczące** (uszkodzenia znacznie obniżające efektywność systemu bez wpływu na bezpieczeństwo życia i środowisko naturalne),
- uszkodzenia i skutki **krytyczne** (uszkodzenia powodujące ograniczenie funkcji głównej obiektu oraz niewielkie zagrożenie bezpieczeństwa),

- uszkodzenia i skutki **katastrofalne** (uszkodzenia powodujące wyłączenie funkcji głównej, znaczne zagrożenie dla systemu eksploatacji, środowiska naturalnego oraz zdrowia lub życia ludzi).

W tabeli 4.14 zestawiono szerszą gamę opisów uszkodzeń stosownie do różnych kryteriów klasyfikacji. Pokazuje to zakres poszukiwań kryteriów stosownych do celu badań i wskazuje jednocześnie zakres informacji niezbędnych do pozyskania w trakcie obserwacji.

#### 4.6.2. Naprawa obiektu mechanicznego

Naprawa jest stanem eksploatacyjnym, podczas którego obiekt przywracany jest do stanu zdolności do spełniania funkcji (zmiana z przedmiotu działania na pośrednik w łańcuchu działania):

$$NAPR = \langle OE_j, t_{\text{unis}}, OPO, KO \rangle \quad (4.35)$$

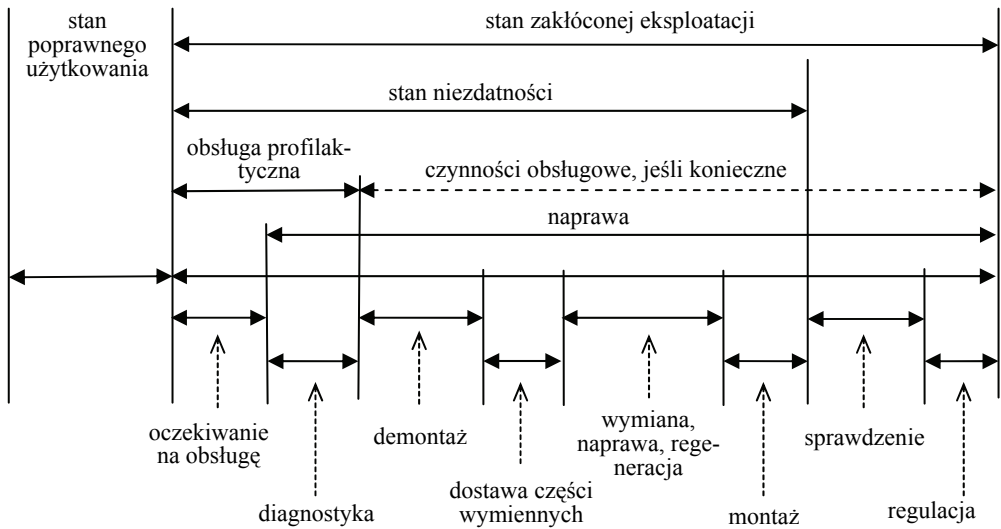
gdzie:  $OE_j$  – obszar eksploatacji, którego dotyczy uszkodzenie,  
 $t_{\text{unis}}$  – chwila zakończenia naprawy,  
 $OPO$  – opis obsługi:  $OPO = \langle opo_1, opo_2, opo_3 \rangle$ ,  
 $opo_1$  – rodzaj obsługi (profilaktyka, naprawa),  
 $opo_2$  – sposób obsługi, zakres działania,  
 $opo_3$  – stan obiektu po zakończeniu obsługi,  
 $KO$  – koszty obsługiwaniania.

Czas trwania stanu zakłóconej eksploatacji jest różnicą czasu odpowiadającego chwili zakończenia obsługi (naprawy) i chwili uszkodzenia bądź odstawienia obiektu do systemu obsługiwaniania.

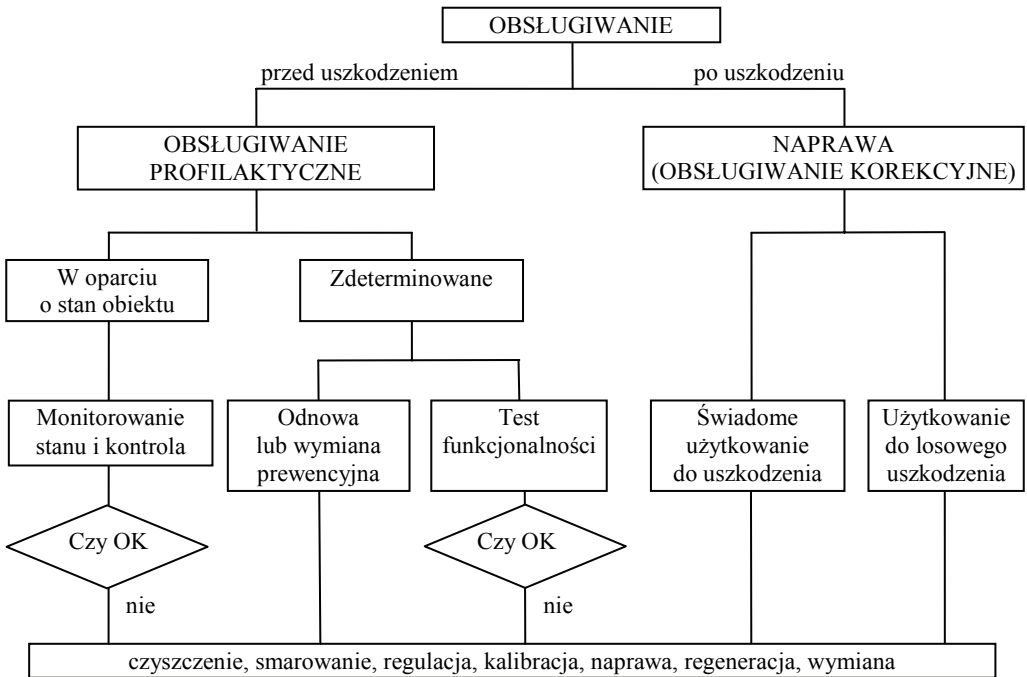
Obsługiwanianie nie zawsze wiąże się ze stanem niezdatności obiektu wynikłym z nieprzewidywalnego uszkodzenia. Obsługiwanianie może być zamierzonym stanem obiektu zaistniałym na skutek podjęcia decyzji przez eksploatatora. Ta obserwacja stała się motywacją wprowadzenia pojęcia stanu zakłóconej eksploatacji.

W czasie zakłóconej eksploatacji wyróżnia się kilka ważnych etapów działań obsługowych, które pozwalają na rozróżnienie pojęć czasu niezdatności, naprawy [59, 61, 294] i obsługiwaniania (rys. 4.22). Jest to bardzo precyzyjny podział i nie zawsze możliwe jest uzyskanie informacji o chwili rozpoczęcia czy zakończenia etapu, dlatego przyjmuje się zwykle i utożsamia czas zakłóconej eksploatacji z czasem naprawy lub obsługi.

Główne strategie obsługiwaniania obejmujące działania profilaktyczne i korekcyjne (naprawy) zostały pokazane na rysunku 4.23 [116]. W szczególnych przypadkach, dla systemów o dużym znaczeniu gospodarczym, wymagających wysokiej nieuszkodzalności lub stwarzających zagrożenia o dużych stratach opracowuje się techniki obsługiwaniania uwzględniające niezawodność i znaczenie elementów systemu (RCM – *Reliability Centred Maintenance*) [115, 203].



Rys. 4.21. Dekompozycja stanu zakłóconej eksploatacji



Rys. 4.22. Klasyfikacja obsługiwnia

Zagadnienie planowania obsługi profilaktycznych jest w ostatnim czasie przedmiotem dużego zainteresowania ze względu na rosnące wymagania niezawodnościowe, bezpieczeństwa i ekonomiczne. W odniesieniu do badań eksploatacyjnych obiektów mechanicznych należy tu rozważyć wsparcie procesu decyzyjnego w zakresie określania kryteriów wykonywania oraz częstotliwości i zakresu obsługi. W zależności od możliwości pozyskania danych, ich wiarygodności i okresu obserwacji możliwe jest dobranie stosownej polityki obsługowej bazującej na licznych modelach teoretycznych [46, 60, 100, 140, 175, 186, 194, 195, 220, 221, 225, 273, 294]. Do najważniejszych kryteriów klasyfikujących modele obsługowe należy zaliczyć:

- strategia obsługiwanian.
  - bez obsługiwanian, obsługiwane po uszkodzeniu (naprawianie),
  - obsługiwane prewencyjne stałoczasowe (*preventive*),
  - obsługiwane profilaktyczne według stanu (*predictive*),
  - obsługiwane proaktywne bazujące na obserwacji źródłowych procesów degradacyjnych,
  - samoobsługiwalność bazująca na wewnętrznych, wbudowanych systemach monitorujących, diagnozujących i odnawiających,
- licznosc obiektów:
  - obsługiwane pojedynczego obiektu (*one-unit system*),
  - grupy obiektów (*multi-unit system*),
  - jakośc naprawy (stan obiektu po naprawie):
    - stan obiektu jak przed uszkodzeniem (*as good as old*),
    - stan obiektu jak nowy (*as good as new*),
    - naprawy z wykorzystaniem elementów używanych,
- metody w obsługiwaniu:
  - obsługiwane według stanu obiektu,
  - obsługiwane przy ograniczonym zbiorze informacji,
  - obsługiwane bazujące na niezawodności i bezpieczeństwie (RCM).

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wybór strategii obsługowej, jeśli nie jest narzucony przez wytwórcę, odbywa się głównie na drodze obserwacji uszkodzeń *post factum*. Oznacza to, że w początkowej fazie zarządzania stosowana jest polityka reaktywna, a tworząca się baza danych umożliwi w późniejszym okresie na analizowanie trendów i relacji skutkujące w propozycjach aktywnych modeli obsługowych.

Naprawa obiektu jest procesem najczęściej niepowtarzalnym ze względu na losowość uszkodzenia zarówno w czasie, jak i umiejscowienie w obiekcie oraz zasięg szkód. Stąd też stan obiektu po naprawie jest istotnym parametrem w obserwacji, ale przede wszystkim rzutuje na czas do kolejnego uszkodzenia i sposób wykorzystania obiektu w dalszej eksploatacji [172]. W procesie naprawy dokonuje się regeneracji, regulacji (dostrojenia) lub wymiany obiektu lub jego komponentów. Komponenty podlegające naprawie mogą być [101]:

- bezpośrednio wykorzystane jako część wymienna (wymagane jest czyszczenie i diagnostyka),

- naprawione i wykorzystane jako część wymienna (wymagane mycie, diagnostyka, regeneracja, testowanie),
- przetworzone w celu wytworzenia innego elementu, z wykorzystaniem starego materiału,
- „kanibalizowane” (demontaż obiektu i wykorzystanie jego zdalnych komponentów),
- złomowane (sortowanie, recykling, likwidacja).

Informacja o sposobie wykorzystania lub złomowaniu obiektów i ich komponentów jest ważnym elementem zarządzania rzutującym na politykę zapasów części wymiennych i analizę ekonomiczną eksploatacji.

## 5. Modelowanie danych eksploatacyjnych

### 5.1. Klasyfikacja danych eksploatacyjnych

Atrybuty przynależne elementom obiektu mechanicznego na jego różnych poziomach złożoności mają różną istotność (rangę) i zmienność. Rodzaj wykorzystywanych w niezawodności i bezpieczeństwie danych zależy jest od: możliwości i kosztu ich pozyskania, potencjalnego zastosowania w procesie decyzyjnym, wiarygodności, czasu dostępu itp. Do najważniejszych rodzajów danych stosowanych w analizie RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability, Safety*) zalicza się [32, 39]:

- dane historyczne, istniejące dla podobnych obiektów, z wcześniejszych badań,
- dane z komercyjnych banków danych gromadzone w profesjonalnych bazach danych,
- dane literaturowe, poradnikowe pochodzące z opublikowanych wyników badań,
- dane eksperckie uzyskiwane poprzez odpytywanie kadry inżynierskiej, obarczone pewnym subiektywizmem zależnym od doświadczenia eksperta,
- dane próbkowe, wrywkowe będące wynikiem obserwacji rynkowych, ankiet itp.,
- dane badawcze ze specjalnie zaprojektowanych badań eksploatacyjnych,
- dane obserwacyjne pochodzące z nieformalnych obserwacji eksploatacyjnych,
- dane produkcyjne z końcowych etapów kontroli jakości i testów przedsprzedażnych.

Dane gromadzone w eksploatacyjnej bazie danych klasyfikuje się ze względu na rodzaj danych jako:

- dane liczbowe (chwile zdarzeń, początek nowego stanu, przedziały czasu realizacji, stan w procesie, odległości),
- dane opisowe (tekst, obraz, dźwięk, eksperckie, rozmyte).

Ze względu na postać matematyczną dane klasyfikuje się jako:

- dane o postaci ciągłej,
- dane dyskretne, porządkowe, klasyfikacyjne,
- dane binarne, dwuwartościowe.
- statystyczne, mało liczne, pojedyncze, unikatowe.

W odniesieniu do kompletności danych rozpatruje się dane pełne dokumentujące wszystkie zdarzenia oraz dane ucięte (cenzurowane) w kilku wariantach ucięcia (prawo i lewostronnie, przedziałowo). W tabeli 5.1 przedstawiono mapę klasyfikacji przykładowych danych eksploatacyjnych z wybranymi przykładami danych.

Tabela 5.1. Przykłady klasyfikacji danych

Postać danych	Rodzaj danych	
	Dane liczbowe	Dane opisowe (tekst, dźwięk, obraz)
Dane ciągłe	Przebieg pojazdu, prędkość ruchu, czas realizacji działania, zużycie paliwa, emisja CO <sub>2</sub>	Tablice świetlne z informacją dla pasażerów, świetlny/dźwiękowy sygnał z czujnika potwierdzający otwarcie/zamknięcie, obraz z monitoringu peronu
Dane dyskretne	Liczba pojazdów, liczba pasażerów, liczba cykli pracy, rodzaj zasilania	Alfabet Morse'a, sygnalizacja chorągiewkowa, sygnalizacja pulsująca
Dane binarne	Poprawny rozruch, potwierdzenie wykonania czynności/zadania, posiadanie pewnej cechy (tak/nie)	Sygnaly alarmowe: zapalenie się informacji „WYJŚCIE”, włączenie czerwonego światła na przejeździe kolejowym, opuszczenie/ podniesienie semaforu

Na podstawie wielu doświadczeń i opisów badań [26, 85, 96, 119, 165, 178, 227, 288, 310] dane pochodzące bezpośrednio z eksploatacji można podzielić na trzy główne grupy:

- dane identyfikacyjne na wysokim poziomie ogólności (poziom przedsiębiorstwa),
- szczegółowe (tzw. magazynowe, dane na poziomie obiektu; ang.: *inventory data*) zapisywane zwykle jednorazowo podczas instalacji lub zakupu obiektu,
- dane operacyjne tworzące historię eksploatacji oraz dane o zdarzeniach eksploatacyjnych dokumentujące głównie losowe zdarzenia podczas użytkowania i obsługi obiektu.

Bardziej szczegółowy wykaz informacji osiągalny dzięki tym danym obejmuje:

- dane identyfikacyjne systemu (obektu) eksploatacji (stałe w długich przedziałach czasu):
  - dane dotyczące właściciela (lokalizacja systemu eksploatacji, zasięg działania, zasoby ludzkie i materialne itp.),
  - dane techniczne opisujące system i obiekt eksploatacji,
  - dane identyfikacyjne producenta obiektu,
  - parametry eksploatacyjne obiektu zwykle zawarte w dokumentacji techniczno-ruchowej (dane charakteryzujące zasady użytkowania i obsługi, instalacja, części wymienne, materiały eksploatacyjne itp.),
- dane o przebiegu eksploatacji:
  - dane o przebiegu użytkowania,
  - dane o innych zdarzeniach pozytywnych w eksploatacji,
  - dane o zdarzeniach negatywnych w użytkowaniu,
  - dane o zamierzonych działaniach,
- dane o zdarzeniach niepożądanych:
  - dane o uszkodzeniach,
  - dane o obsługach profilaktycznych
  - dane o naprawach i wymianach obiektu.



Inna klasyfikacja danych ujmująca ich złożoność obejmuje:

- dane nominalne, stałe, identyfikujące obiekty i zdarzenia (wymiary, pojemności, osiągi, ceny, planowe chwile obsługi, pracochłonność obsługi itp.),
- dane porządkowe (kolejność zapłonu cylindrów, kolejność czynności, kolejność wyjazdów/zjazdów pojazdów, przypisanie ludzi lub stanowisk do obiektów itp.),
- dane przedziałowe (zakres prędkości obrotowej silnika, przedział dopuszczalnego zużycia materiałów eksploatacyjnych na jednostkę pracy, przedział zmienności zużycia paliwa itp.).

Szczegółowe zestawienie najbardziej charakterystycznych atrybutów odpowiadających elementom modeli obszarów badań przedstawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Zestawienie przykładowych atrybutów obszarów badań w modelu MSEOM

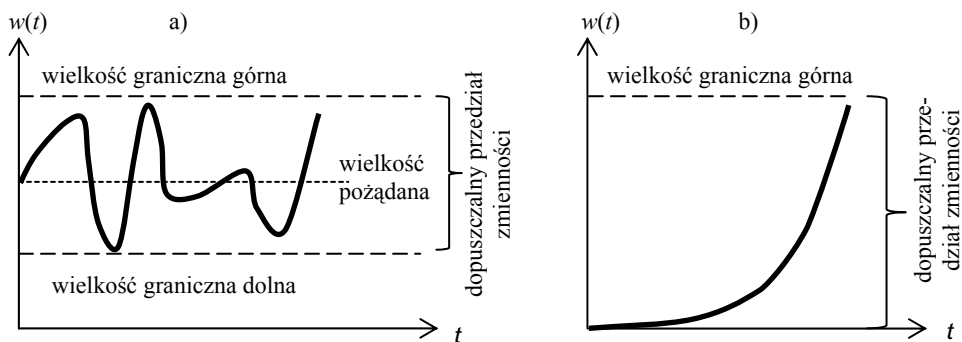
Obszar badań	Element obszaru badań	Grupy najważniejszych atrybutów
$OE_1 \rightarrow OT$ : obiekty techniczne	$OM$ – badany obiekt mechaniczny	Dane identyfikacyjne, funkcja, wymiary, masa, rodzaj napędu, wydajność, stan techniczny, wymagania użytkowe i obsługowe, wartość, wartości graniczne atrybutów
	$ITU$ – infrastruktura techniczna użytkowania	Dane identyfikacyjne, funkcja, wymiary, masa, stan techniczny, wartości graniczne atrybutów
	$ITO$ – infrastruktura techniczna obsługi	Dane identyfikacyjne, funkcja, wymiary, masa, stan techniczny, wartości graniczne atrybutów
	$ITE$ – infrastruktura techniczna otoczenia	Dane identyfikacyjne, funkcja, wymiary, masa, stan techniczny, wartości graniczne atrybutów
$OE_2 \rightarrow HE$ : ludzie w eksploatacji	$H_1$ – eksploataotorzy	Płeć, wiek, stanowisko, wykształcenie, kwalifikacje, uprawnienia, okresy ważności uprawnień, staż pracy
	$H_2$ – ludzie jako przedmioty działania	Płeć, wiek, masa, wzrost, bagaż podróżny, wymagania i preferencje odnośnie jakości usługi, relacja z obiektem badań
	$H_3$ – osoby postronne	Płeć, wiek, kultura osobista, relacja/odległość od obiektu badań
$OE_3 \rightarrow ON$ : otoczenie naturalne eksploatacji	$N_1$ – gleba, podłoże	Rodzaj i stan nawierzchni, pochylenie, krętość drogi, stan zagospodarowania, wartości graniczne atrybutów
	$N_2$ – atmosfera, powietrze	Temperatura, ciśnienie, wilgotność, zanieczyszczenia, wartości graniczne atrybutów
	$N_3$ – woda	Temperatura, prędkość przepływu, zanieczyszczenia, odległość od toru ruchu obiektu badań, wartości graniczne atrybutów
	$N_4$ – fauna	Rodzaj zwierzęcia, siedliska, ilość w zasięgu oddziaływania obiektu badań, ruchliwość, zwyczaje, czynniki szkodliwe
	$N_5$ – flora	Rodzaj rośliny, ilość w zasięgu oddziaływania obiektu badań, czynniki szkodliwe
$OE_4 \rightarrow PEM$ : proces eksploatacji	$PEP$ – poprawny proces eksploatacji	Stany użytkowania, nazwa zdarzenia (zmiana stanu), czasy przebywania w wyróżnionych stacjach użytkowania
	$PEZ$ – zakłócony proces eksploatacji	Stany obsługi, nazwa zdarzenia (zmiana stanu), czasy przebywania w wyróżnionych stacjach obsługi

## 5.2. Generowanie danych w eksploatacji

Atrybuty charakteryzujące obiekty analizy mogą występować w każdej z wcześniej podanych postaci liczbowych, tj. jako charakterystyki ciągłe, dyskretne lub w szczególności binarne. W obecnym stanie rozwoju techniki komputerowej, także dane opisowe, dźwiękowe czy obrazowe poddaje się digitalizacji i archiwizacji w postaci ciągu cyfr [146]. Zmienne analogowe są próbkowane z wymaganą częstotliwością, cyfryzowane i zapisywane w postaci cyfrowej [10, 139, 151]. W zależności od szybkości zmian charakterystyk oraz technicznych możliwości monitorowania i zapisu danych, dane ciągłe można także zapisywać w postaci analogowej, zachowując w ten sposób pełen obraz zmian.

Ciągły przebieg zmienności atrybutu  $w(t)$  w czasie jest sam w sobie cenną informacją eksploatacyjną. Jednak w odniesieniu do złożonego obiektu mechanicznego składającego się z dużej liczby elementów charakteryzowanych wieloma atrybutami archiwizacja przebiegu zmian może być niewykonalna lub co najmniej nieefektywna ze względu na koszty i osiąganą celę poznawczą. Mimo tych ograniczeń, dla systemów o dużym znaczeniu dla odbiorców oraz ze względu na bezpieczeństwo, jak np. elektrownie atomowe, samoloty pasażerskie czy pojazdy kosmiczne, zakres ciągłego monitorowania ich atrybutów nie jest zawężany i często przewymiarowany. W badaniach eksploatacyjnych, które zazwyczaj są badaniami długookresowymi, nie praktykuje się ciągłej, analogowej archiwizacji zmienności atrybutów, poza okresowymi badaniami wybranych charakterystyk [11].

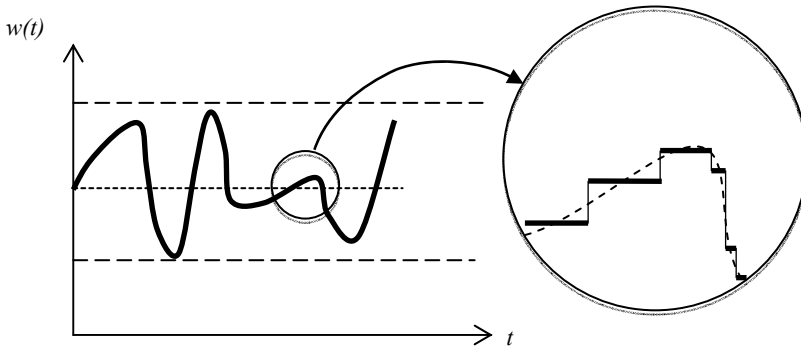
Rzeczywisty przebieg zmienności atrybutów o postaci ciągłej opisujący stan techniczny obiektu jest najczęściej obrazowany jako: funkcja o zmienności przypadkowej (rys. 5.1a) lub funkcja monotonicznie zmienna (niemalejąca, nierosnąca) (rys. 5.1b) [82, 106, 182, 218, 250, 251, 292].



Rys. 5.1. Zmienność eksploatacyjna atrybutów elementów ( $w(t)$  – wartość atrybutu w chwili  $t$ )

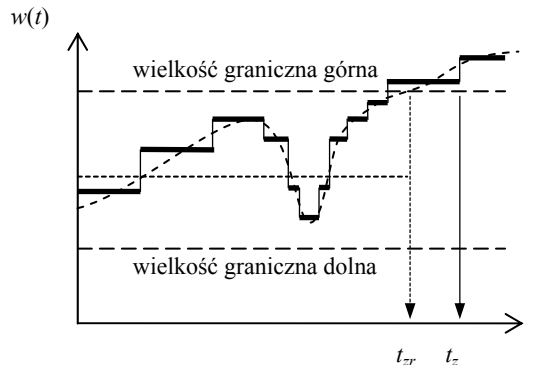
Digitalizacja przebiegu zmienności atrybutu  $w(t)$  lub okresowa obserwacja funkcji  $w(t)$  zmienia obraz funkcji ciągłej na funkcję przedziałowo zmienną, gdzie między

przedziałami o stałej wartości atrybutu  $w(t)$  obserwuje się skoki odpowiadające zdarzeniom (rys. 5.2). Stały przebieg wartości atrybutu w okresach między zdarzeniami charakteryzują stany elementu.



Rys. 5.2. Relacja między ciągłą a skokową zmiennością atrybutu

Interesujące w aspekcie zarządzania eksploatacją są zdarzenia związane ze zmianą stanu atrybutu, a zwłaszcza przekroczenia granicznych, dopuszczalnych poziomów zmienności. Na rysunku 5.3 pokazano fragment ciągłego przebiegu zmienności atrybutu oraz przykładową transformację na funkcję skokową (digitalizację). Rysunek ilustruje także chwilę rzeczywistego przekroczenia górnego poziomu granicznego  $t_{zr}$  oraz aproksymację chwili obserwacji tego zdarzenia  $t_z$ . Chwila ta jest późniejsza niż chwila zajścia rzeczywistego zdarzenia. Także w przypadku malejącej funkcji  $w(t)$  i przekraczania dolnego poziomu granicznego, obserwacja  $t_z$  będzie opóźniona w stosunku do  $t_{zr}$ . Jest to jeden z czynników niepewności danych eksploatacyjnych.



Rys. 5.3. Rzeczywista  $t_{zr}$  i modelowa  $t_z$  chwila zajścia zdarzenia

Atrybuty  $w_{is}$ , charakteryzujące  $i$ -ty element, przyjmują wartości  $dw_{is}$  ze zbioru  $DW_{is}$  ( $dw_{is} \in DW_{is}$ ), gdzie:  $i = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m_i$ , należącego do zbioru liczb rzeczywistych  $\mathbf{R}$ . Dla każdego atrybutu  $i$ -tego elementu wyznacza się przestrzeń fazową  $PW(e_i)$  określającą zbiór możliwych wartości wszystkich jego atrybutów:

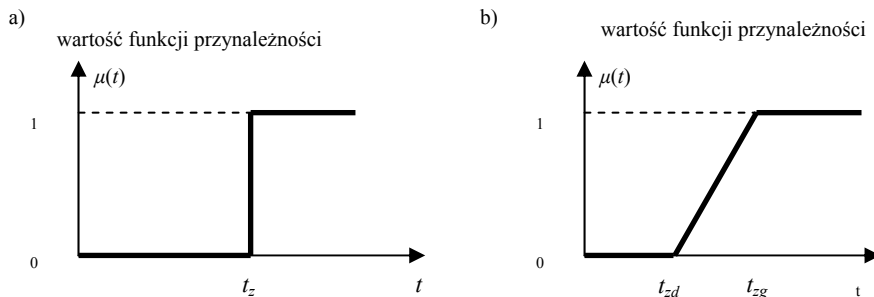
$$PW(e_i) = \{ DW_{is} \}, s = 1, \dots, m_i \quad (5.1)$$

gdzie:  $PW(e_i)$  – przestrzeń dopuszczalnych wartości atrybutów  $i$ -tego elementu,  
 $DW_i$  – zbiór wartości atrybutów  $i$ -tego elementu.

Przestrzeń ta obejmuje podprzestrzenie, które można sklasyfikować stosownie do przyjętych kryteriów: technicznych, funkcjonalnych, jakościowych, niezawodnościowych czy bezpieczeństwa [293, 315]. W literaturze podawany jest często podział ciężkości skutków uszkodzeń [108, 162, 185, 221, 273], wagi właściwości obiektu [292], ryzyka [117, 189], wagi miar oceny bezpieczeństwa w projektowaniu według podejścia *Safety-Fail Design* (projektowanie na bezpieczne uszkodzenie) [282], stosując określenia: katastroficzny, krytyczny, ważny, nieistotny [184, 217, 292].

Ten rodzaj epistemicznej niepewności odnośnie do rzeczywistej chwili pojawienia się zdarzenia najwygodniej jest modelować z wykorzystaniem logiki rozmytej [14]. Niepewność dokładnej chwili powstania zdarzenia  $t_{zr}$  wynika z procesu przepływu informacji, a więc pewnego intencjonalnego przyjęcia sposobu rejestracji danych i błędów z tego wynikających. Na rysunku 5.4 porównano model dyskretny danej o chwili wystąpienia zdarzenia i jej model rozmyty takiej chwili, w którym  $t_{zd}$  i  $t_{zg}$  oznaczają odpowiednio najwcześniejszą i najpóźniejszą chwilę przyjętą jako chwila zajścia zdarzenia. Rzeczywista chwila powstania zdarzenia  $t_z$  jest opisana zmienną rozmytą definiowaną funkcją przynależności:

$$t_z^f = \{(t, \mu(t)) : t_z^f \in t, \mu(t) \in [0, 1]\} \quad (5.2)$$



Rys. 5.4. Porównanie modeli chwili wystąpienia zdarzenia;  
 a) chwila wystąpienia zdarzenia jako zmienna dyskretna,  
 b) chwila wystąpienia zdarzenia jako zmienna rozmyta  
 w przedziale  $(t_{zd}, t_{zg})$  z liniową funkcją przynależności

W badaniach eksploatacyjnych podziału przestrzeni fazowej  $PW(e_i)$  należy dokonać zgodnie z założonym celem i szczegółowością badań, zdając sobie jednak sprawę z równowagi między ilością informacji, która rośnie stosownie do większej liczby podprzestrzeni, a wiarygodnością i możliwościami wykorzystania danych.

Najprostszym podziałem przestrzeni  $PW(e_i)$  jest jej podział na dwie podprzestrzenie obejmujące ogólnie: wartości dopuszczalne i niedopuszczalne.

Jeśli przyjmując  $DW_{d,is} \subset DW_{is}$  jako zbiór dopuszczalnych wartości dla atrybutów  $i$ -tego elementu, gdzie  $s = 1, 2, \dots, m_i$ , to w przestrzeni fazowej  $PW(e_i)$  można zdefiniować podprzestrzeń  $PWD(e_i)$  (5.3) zawierającą wszystkie możliwe, dopuszczalne wartości jego atrybutów oraz podprzestrzeń niedopuszczalnych wartości (5.4). Oczywiście jest zależność  $\overline{PWD(e_i)} \cup PWD(e_i) = PW(e_i)$ .

$$PWD(e_i) = \{ DW_{d,is} \}, s = 1, 2, \dots, m_i \quad (5.3)$$

$$\overline{PWD(e_i)} = PW(e_i) - \{ DW_{d,is} \}, s = 1, 2, \dots, m_i \quad (5.4)$$

gdzie:  $PWD(e_i)$  – podprzestrzeń dopuszczalnych wartości atrybutów  $i$ -tego elementu,  
 $\overline{PWD(e_i)}$  – podprzestrzeń niedopuszczalnych wartości atrybutów  $i$ -tego elementu,

$DW_{is}$  – zbiór wartości atrybutów  $i$ -tego elementu,  $s = 1, 2, \dots, m_i$ ,

$DW_{d,is}$  – zbiór dopuszczalnych wartości atrybutów  $i$ -tego elementu, przy czym  $s = 1, 2, \dots, m_i$ .

W przyjętym modelu zmienności atrybutów, zdarzeniem eksploatacyjnym podlegającym ewentualnej rejestracji jest opuszczenie (5.5) lub powrót do dopuszczalnego przedziału zmienności  $W_{d,is}$  dowolnego atrybutu, zdefiniowanego dla  $\Delta t \rightarrow 0$  (5.6). Postać zdarzenia, tj. charakterystykę dopuszczalnego poziomu przekroczenia oznaczono  $r_s$ . Ogólnie, dla każdego atrybutu może być zdefiniowanych wiele obszarów zmienności, pozwalając na operowanie modelami procesów wielostanowych [171]:

$$t_{zis} : dw_{is} \in DW_{d,is}, \text{ jeśli dla } (t_{zis} - \Delta t) : dw_{is} \notin DW_{d,is} \quad (5.5)$$

$$t_{zis} : dw_{is} \notin DW_{d,is}, \text{ jeśli dla } (t_{zis} - \Delta t) : dw_{is} \in DW_{d,is} \quad (5.6)$$

gdzie:  $t_{zis}$  – chwila przekroczenia dopuszczalnej wartości,

$dw_{is}$  – wartość  $s$ -tego atrybutu  $i$ -tego elementu,

$DW_{d,is}$  – zbiór dopuszczalnych wartości atrybutów  $i$ -tego elementu, przy czym  $s = 1, 2, \dots, m_i$ .

Powstałą informacją eksploatacyjną jest wówczas chwila  $t_{zis}$  przekroczenia dopuszczalnej wartości, postać zdarzenia  $r_s$  (np. przekroczenie wartości dolnej lub górnej), przez  $s$ -ty atrybut  $i$ -tego elementu  $w_{is}$ :  $I_{zis} = \langle i, s, w_{is}, r_s, t_{zis} \rangle$ .

Szczególnie ważnymi w eksploatacji zdarzeniami są uszkodzenia i zakończenie naprawy. Za chwilę uszkodzenia przyjęto zdarzenie wyjścia pierwszej wartości atrybutu

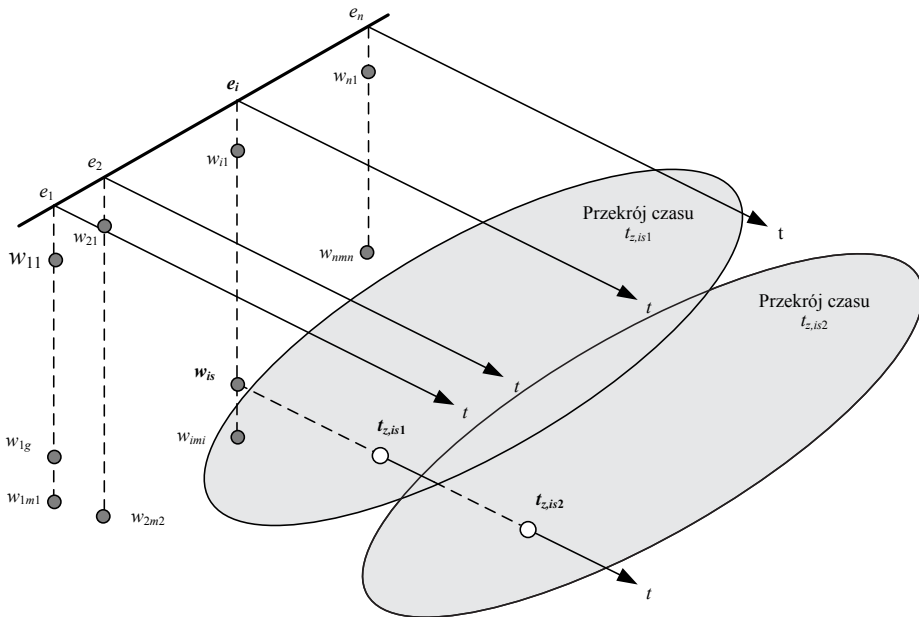
obiektu  $dw_{is}$  z dopuszczalnego przedziału zmienności  $DW_{d,is}$  (5.7). Na wstępnym etapie procesu naprawy często ujawniają się inne uszkodzenia, które trudno umiejscowić w czasie, dlatego informacja o takich faktach wielokrotnego przekroczenia wartości dopuszczalnych przez atrybuty obiektu zawarta jest w opisie uszkodzenia *OPU*:

$$t_{uis} : t_{zis} = \min \{t : dw_{is} \notin DW_{d,is}\} \quad (5.7)$$

Za chwilę zakończenia naprawy należy uznać chwilę przywrócenia zdatności obiektu utożsamianą z chwilą powrotu do zbioru wartości dopuszczalnych ostatniego z atrybutów będących przyczyną uszkodzenia:

$$t_{unis} : t_{zis} = \max \{t : dw_{is} \notin DW_{d,is}\} \quad (5.8)$$

Na rysunku 5.5 przedstawiono schematycznie ideę powstawania przekrojów czasu wyznaczających chwile generowania informacji eksploatacyjnych dla jednego z atrybutów obiektu składającego się z  $n$  elementów. Każdy  $i$ -ty element charakteryzowany jest zbiorem atrybutów  $w_{ij}$ , gdzie  $j = 1, \dots, m_j$ . Zdarzeniem eksploatacyjnym jest zmiana stanu elementu obserwowana jako wyjście z obszaru lub powrót do dopuszczalnego obszaru zmienności  $DW_{d,is}$ .



Rys. 5.5. Generowanie informacji eksploatacyjnych w przekrojach czasu odpowiadających zdarzeniom w chwili  $t_{z,isx}$ , dla atrybutu  $w_{is}$ , dla elementu  $e_i$

Każdy z atrybutów opisujących encje systemu eksploatacji generuje ciąg chwil zmiany stanu systemu zilustrowany na rysunku 5.5 jako ciąg przekrojów czasu. Two-

rzący się w trakcie obserwacji eksploatacji ciąg zdarzeń jest wektorem zdarzeń  $T$  o argumentach oznaczających chwile zaistnienia zdarzenia w systemie (5.9), a indeksy  $a, b, c$  dla zmiennej  $t_{z,abc}$  oznaczają kolejno: numer elementu, numer atrybutu tego elementu i numer zdarzenia dla tego atrybutu (kolejny numer przekroju czasowego w procesie eksploatacji)

$$T = [t_{z,isk}] \quad (5.9)$$

gdzie  $t_{z,pqr} < t_{z,pq(r+1)}$ .

W ujęciu obiektowym dane gromadzone są w postaci wielowymiarowej macierzy zdarzeń  $Z$  w systemie, o elementach  $t_z(i, j, k)$  oznaczających chwilę zmiany stanu systemu, spowodowaną  $k$ -tym zdarzeniem, dla  $j$ -tego atrybutu,  $i$ -tego elementu systemu

$$Z = [t_z(i, j, k)] \quad (5.10)$$

gdzie:  $i = 1, 2, \dots, n$  – numerator zbioru elementów systemu,

$j = 1, 2, \dots, m_j$  – numerator zbioru atrybutów,

$k = 1, 2, \dots, z_{mj}$  – numerator  $m$  zdarzeń dla wybranego atrybutu.

Podana analiza powstawania informacji eksploatacyjnej dotyczy dwuwartościowej przestrzeni stanów określanych jako stan pożądany lub niepożądany, czy stan zdatny lub niezdatny. W takim przypadku można zdefiniować binarną przestrzeń stanów obiektu  $X(t) = \{0, 1\}$ :

$$x(t) = \begin{cases} 1, & \text{jeśli } dw_{is} - \Delta w_{isd} \leq dw_{is} \leq dw_{is} + \Delta w_{isg} \\ 0, & \text{w przeciwnym razie} \end{cases} \quad (5.11)$$

gdzie:  $\Delta w_{ids}, \Delta w_{isg}$  – odpowiednio dolna i górna dopuszczalna odchyłka  $w_{is}$ .

W szerszym ujęciu, przestrzeń stanów rozważa się jako przestrzeń wielowartościową i przypisuje wartość pewnego atrybutu  $w$  do numerowanych przedziałów zmienności np.:  $0, 1, 2, \dots, M$  odpowiadających granicom zmienności  $(dw_0, dw_1, dw_2, \dots, dw_M)$  atrybutu  $w$  [101, 171, 241]. Poszczególne stany przebiegają od „najgorszego” –  $0$ , oznaczającego np. niezdatność lub brak możliwości działania, do stanu „najlepszego” –  $M$ , oznaczającego np. pełną zdatność lub największą efektywność. Stan obiektu  $x$  tworzy wówczas  $M+1$  elementowa przestrzeń ze stanem obiektu w dowolnej chwili oznaczonym jako  $x(t) \in [0, 1, 2, \dots, M]$  i wynoszącym:

$$x(t) = \begin{cases} 0, & \text{jeśli } dw_0 \leq dw_s(t) < dw_1 \\ 1, & \text{jeśli } dw_1 \leq dw_s(t) < dw_2 \\ \vdots & \vdots \\ M, & \text{jeśli } dw_M \leq dw_s(t) \end{cases} \quad (5.12)$$

Podobnie jak w przypadku obiektów dwustanowych, zdarzeniem eksploatacyjnym jest chwila zmiany stanu, przy czym rozdzielczość stanów ustalana jest w odniesieniu do fizycznej interpretacji atrybutu i możliwości jego monitorowania. Rodzaj zmiany stanu opisany jest postacią zdarzenia  $r_s$ .

Niezależnie od przyjętej rozdzielczości stanów obiektu, obiekt może przebywać w dowolnej chwili  $t: t \in \langle t, T \rangle, T > 0$  w jednym ze stanów  $X = \{0, 1, \dots, M\}$ . Funkcja  $X(t)$  wyznacza wówczas proces eksploatacji obiektu. Realizacje procesu są przedmiotem obserwacji i zapisywane w bazie danych. Powstała baza danych, w szczególnym przypadku, dla obiektu dekomponowanego na poziomie elementu, dla którego definiuje się atrybuty zmienne w czasie, można zobrazować jako macierz wielowymiarową. W przypadku większego stopnia dekompozycji wymiar macierzy zwiększa się stosownie do tego stopnia dekompozycji powiększonego o wymiar atrybutów i czasu, co może wymagać uproszczenia zapisu do postaci tabeli gromadzącej realizacje jednego atrybutu.

W procedurze tworzenia bazy danych uwzględnia się zbiór obserwowanych obiektów (elementów na dowolnym poziomie dekompozycji) (5.13) oraz zbiór opisujących je atrybutów (5.14).

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n\}, \quad i = 1, \dots, n \quad (5.13)$$

$$W(e_i(t)) = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iz}, \dots, w_{im_i})(t), \quad s = 1, 2, \dots, m_i \quad (5.14)$$

Dane eksploatacyjne reprezentują atrybuty obiektów, których wartości zawarte są w pewnej łącznej dziedzinie określonej przez przestrzeń atrybutów  $PW$ . Celem pośrednim badań jest zbudowanie bazy danych eksploatacyjnych, tj. określenie funkcji przypisującej wartości atrybutom deskryptyjnym obiektu badań.

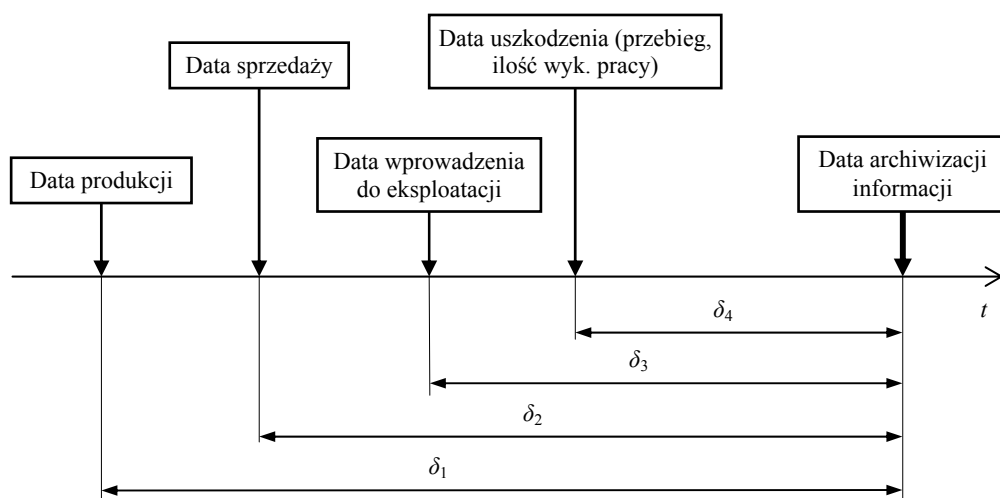
### 5.3. Niepewność danych

Dane eksploatacyjne zapisane w bazie danych charakteryzują się niepewnością związaną między innymi z procesem ich pozyskiwania, archiwizacji i przetwarzania. Modelowanie zjawisk eksploatacyjnych wymaga wprowadzania założeń i ograniczeń modelowych dotyczących postrzegania obiektów oraz ich zachowania się w czasie i przestrzeni. Modele wymagają następnie opisanie atrybutów obiektów i ich stanów w czasie. Niestety czynniki, takie jak: ograniczony czas obserwacji, naturalna zmienność procesów, pozyskanie danych niepełnych (ucięcie danych), brak informacji o przyczynach zdarzeń lub subiektywne podejmowanie decyzji przyczyniają się do wprowadzania niepewności do gromadzonych danych i całego procesu modelowania. Należy więc rozdzielić i poszukiwać: probabilistycznej losowości leżącej w naturalnej zmienności zjawisk (*aleatory variability*) i niepewności modelowej (*epistemic uncertainty*) wynikającej z przyjętych założeń modelowych, metod obserwacji czy nieprecyzyjnych lub niepełnych danych [110]. Niepewność epistemiczna jest redukowalna i można ją zmniejszać, stosując teorię zbiorów rozmytych, teorię możliwości czy teorię dowodów Dempstera–Shafera [14, 101]. Innym rodzajem nieredukowalnej niepewności jest błąd numeryczny, niepowodowany brakiem wiedzy, a wykrywalnym poprzez sprawdzanie procedur [101].



Epistemiczna niepewność danych może wpływać w procesie zbierania danych z wielu źródeł, do których należy zaliczyć [14, 221, 231]:

- niezapisanie informacji o zdarzeniu wymagającym archiwizacji,
- utrata informacji w procesie przesyłania lub przetwarzania,
- opóźnienie w zapisie (rys. 5.6),
- pozyskanie danych ankietowych, zagregowanych obarczonych subiektywnością,
- dane grupowane w przedziałach zmienności lub podawane z dużym zaokrągleniem,
- dane niedokładne, niesprecyzowane, dwuznaczne,
- dane uproszczone,
- dane ucięte (lewostronnie, prawostronnie, przedziałowo), dane wrywkowe,
- błąd, pomyłka w zapisie informacji.



Rys. 5.6. Opóźnienia  $\delta_i$  w archiwizacji danych generujące niepewność informacji

Zarządzanie eksploatacją systemów technicznych wymaga ciągłego lub okresowego pozyskiwania informacji, które można określić jako: informacje operacyjne stanowiące podstawę do bieżącego sterowania procesami lub informacje alarmowe (awaryjne) powiadamiające o nieprawidłowym działaniu systemu. Informacje awaryjne stanowią podstawę do podejmowania decyzji kryzysowych i tworzenia statystycznej oceny pojawiających się zdarzeń niepożądanych. W dłuższej perspektywie czasu archiwizowane dane mogą budować bazę danych o różnych zmiennych opisujących proces działania. Zmienne takie mają postać zmiennych dyskretnych (liczba zdarzeń) lub zmiennych ciągłych (zmienne opisujące czas, wydajność, przebieg itp.).

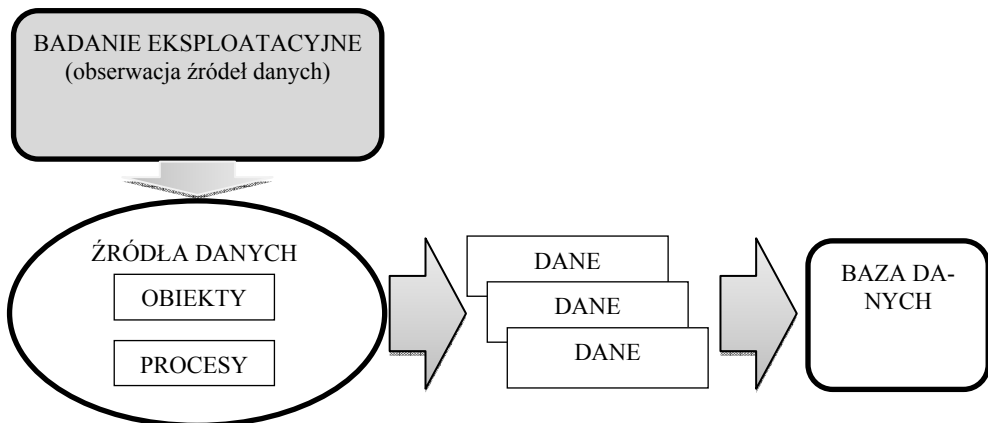
Ocena niezawodności i bezpieczeństwa systemów technicznych wymaga zgromadzenia i przetworzenia wiarygodnych danych charakteryzujących zachodzące procesy. Takie dane gromadzi się w wyniku obserwacji procesu eksploatacji prowadzonych w sposób bierny lub czynny. Bierna obserwacja eksploatacji polega na gromadzeniu danych istniejących i zapisywanych w rutynowej dokumentacji. W czynnym

eksperymentcie obserwacyjnym gromadzi się określone, wybrane pod kątem spełnienia celu badań dane, co wymaga zastosowania specjalnych procedur i nośników danych. Niemniej przy użyciu każdej z tych metod istnieje możliwość uzyskania niepoprawnego lub niepełnego zbioru informacji, wynikająca z nierozpoznania systemu eksploatacji, niedostosowania dokumentacji do celu badań, błędu człowieka lub systemu rejestrującego [26].

## 5.4. Przepływ danych eksploatacyjnych

Cel badań eksploatacyjnych jest zorientowany przede wszystkim na wyznaczenie miar i ocenę obiektu technicznego eksploatowanego w określonym systemie eksploatacji według założonego procesu eksploatacji. Wynik oceny jest bezpośrednią informacją w procesie podejmowania decyzji eksploatacyjnych, czyli w zarządzaniu eksploatacją.

Przedstawione źródła danych (rozd. 3.1) stanowią zbiór obiektów (encji) podlegających obserwacji w trakcie badań eksploatacyjnych. Obszar mapowania tych encji jest związany z problematyką eksploatacyjną i dostarcza danych w postaci obrazu zjawisk eksploatacyjnych wykonanego z wykorzystaniem pewnej procedury obserwacyjnej (badanie eksploatacyjne) odwzorowującej właściwości encji (ich atrybuty) poprzez wartości pewnych zmiennych [99]. Związki między obiektami (encjami) reprezentowane są przez liczbowe relacje między zmiennymi i gromadzone w bazach danych podlegających w dalszej kolejności przetwarzaniu w celu ujawnienia tych związków (rys. 5.7). Pojawienie się informacji wymagającej archiwizacji odbywa się w sposób czynny (diagnozowanie, rutynowe obserwacje obiektów i ich parametrów) lub bierny (uszkodzenia, zdarzenia losowe). System badawczy powinien „zauważyć” taką informację, wstępnie przeanalizować jej wiarygodność i zarchiwizować. Wykorzystanie zgromadzonych danych odbywa się zwykle z pewnym opóźnieniem wynikającym z konieczności zapisania większej liczby danych [284].



Rys. 5.7. Pozyskiwanie danych ze źródeł danych

Dane o eksploatacji obiektów klasyfikuje się w zależności od przyjętych kryteriów w odniesieniu do obiektów [2, 96] i wyróżnia:

- dane identyfikacyjne, stałe, odnoszące się do obiektów na wyższym poziomie złożoności (przedsiębiorstwo, instalacja, stałe numery identyfikacyjne, daty instalacji, modyfikacji, kasacji, specjalne właściwości i akcesoria),
- dane o bieżącym użytkowaniu (regularne, generowane w procesie użytkowania),
- dane o losowych zakłóceniach eksploatacyjnych (uszkodzenia, naprawy, obsługi profilaktyczne, modernizacje).

Najważniejszymi danymi ze względu na zarządzanie eksploatacją są dane pochodzące z bieżącej eksploatacji, gdyż tylko na ich podstawie można budować modele zjawisk eksploatacyjnych i określać spodziewane zachowanie się systemu i procesu w przyszłości.

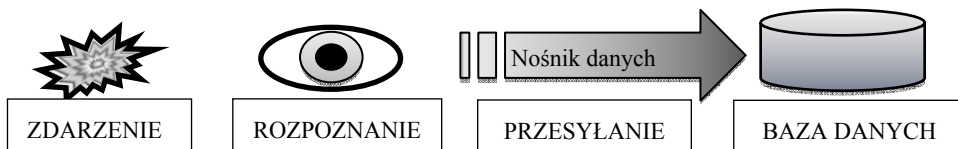
Przepływ danych w rzeczywistym systemie obserwacyjnym jest przeciwny do metody analizy systemu i przedstawionego procesu. Informacja o zdarzeniu w systemie jest piątką uporządkowaną:  $I_{zis} = \langle i, s, w_{is}, r_s, t_{zis} \rangle$ . Warunkiem koniecznym do zarejestrowania danych w bazie danych jest:

- powstanie impulsu informacyjnego, tj. zaistnienie zdarzenia generującego,
- aktywność systemu monitorującego zdarzenia eksploatacyjne,
- ciągłość przepływu informacji od źródła do rejestrującej bazy danych.

Impuls informacyjny oznaczający zdarzenie w procesie eksploatacji może być zarejestrowany w bazie danych natychmiast po powstaniu lub z pewnym opóźnieniem, zależnie od rodzaju monitoringu i sposobu przesyłu informacji. Jeśli system ma ciągły monitoring atrybutów, to informacja o zdarzeniu w systemie  $I_z$  jest zarejestrowana w chwili  $t_z$ . W innych przypadkach monitorowania (nieciągłego) informacja przesyłana jest okresowo i jest opóźniona w stosunku do rzeczywistej chwili powstania zdarzenia.

System rejestracji danych obejmuje co najmniej cztery elementy (rys. 5.8) [10, 40, 267, 268, 284, 315, 332]:

- element diagnozowany, generujący dane (zdarzenie),
- element rozpoznający zdarzenia,
- element przesyłania danych (nośnik danych),
- element gromadzenia danych.



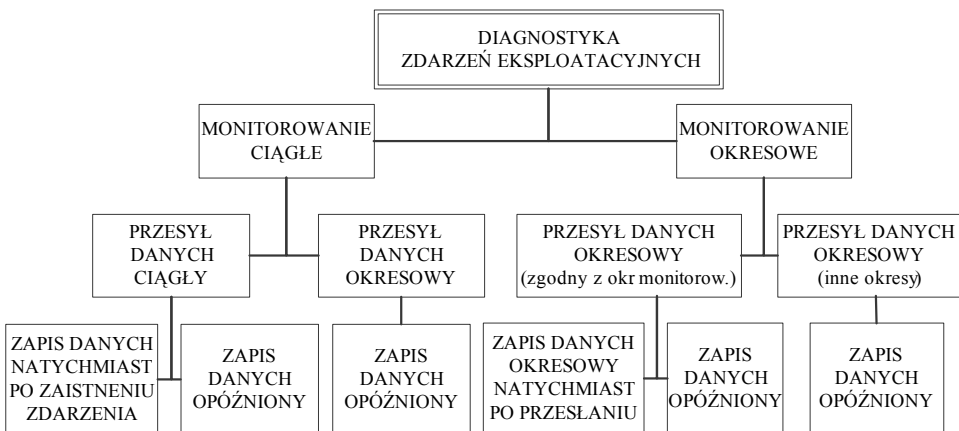
Rys. 5.8. Schemat przepływu danych w systemie archiwizacji danych

System ten może mieć różną konfigurację w zależności od dostępności technologii, budżetu badań, czy wymagań dotyczących szybkości przepływu danych. Rolą elementu diagnozującego jest rozpoznanie zaistniałego zdarzenia, przetworzenia sygnału

i wysłanie danych (diagnostyka on-line) bądź przechowanie danych. Przesłanie danych odbywa się wówczas okresowo w postaci paczki danych lub w postaci zagregowanej. Istotnym elementem jest tutaj poprawność rozpoznania zdarzenia oraz chwila wysłania danych.

Innym ważnym zagadnieniem w aspekcie zarządzania eksploatacją wymagającym analizy jest zapewnienie niezawodnego przepływu danych, tj. niezawodnych elementów diagnozujących, układów przesyłu i rejestracji danych. Tu przyjmuje się, że ten element przesyłu jest niezawodny.

W schemacie przepływu danych od źródła danych do bazy danych można wyróżnić kilka schematów przepływu: diagnozowanie ciągle lub okresowe, przekaz danych natychmiastowy po ich pojawieniu się lub okresowy przekaz danych zakumulowanych w elemencie diagnozującym, przy czym okresy przesyłu mogą być zgodne lub różne od okresów diagnozowania (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Schematy przesyłu danych eksploatacyjnych od źródła danych do bazy danych

Klasyfikacja ta pokazuje, że zapis danych (rejestracja) może odbywać się w sposób ciągły (on line) niezwłocznie po zaistnieniu zdarzenia bądź dane zapisywane są z opóźnieniem, które jest losowe lub zdeterminowane.

## 5.5. Model informatyczny danych eksploatacyjnych

Projektowanie bazy danych obejmuje konceptualne, logiczne i fizyczne modelowanie danych [3, 17, 27, 47, 180, 247, 307, 317]. Punktem wyjścia w projektowaniu bazy danych jest konceptualny model danych obejmujący informacje powstające w trakcie eksploatacji łącznie z charakterystyką obszarów badań. Modelowi temu odpowiada model sytuacji eksploatacyjnej, w którym zostały zidentyfikowane obserwowane w badaniach eksploatacyjnych encje i ich atrybuty, a następnie przekształcone w cząstkowe i zintegrowane schematy przepływu danych. Model konceptualny opisany jest

jako zbiór  $DE$  (5.15) zawierający modelowaną encję oraz zbiór atrybutów opisujących encję, a także w ogólnym przypadku współczynnik wiarygodności  $CF$  (*Certainty Factor*) [170, 231, 317]. Encją  $K$  jest w tym ujęciu dowolny zidentyfikowany w rzeczywistości eksploatacyjnej obiekt materialny, proces lub pojęcie.

$$D = \{K, A, CF\} \quad (5.15)$$

gdzie:  $D$  – zbiór danych eksploatacyjnych,  
 $K$  – zbiór zaobserwowanych zjawisk,  
 $A$  – zbiór atrybutów opisujących zjawisko,  
 $CF$  – współczynnik wiarygodności.

Relacyjna baza danych tworzona jest przez zapisywane w niej dane dotyczące zjawisk eksploatacyjnych. Logiczny model danych [170] opisuje relacja  $MDL$  przyporządkowująca atrybuty do obserwowanych „obiektów”:

$$MDL : K \times A \rightarrow DW_A \quad (5.16)$$

gdzie:  $MDL$  – logiczny model danych,  
 $DW_A$  – zbiór wartości atrybutów.

Pojedyncze „obiekty”, procesy i inne encje zidentyfikowane w analizie  $SEOM$  opisywane są *formułami atomowymi* [170]. Proponowana w pracy obiektowa identyfikacja i analiza komponentów systemu eksploatacji (obszary eksploatacji) pozwala na przyjęcie logicznego modelu danych w postaci (5.17), co odpowiada egzemplarzowi encji [3]:

$$\alpha_i = [A_{i1} = dw_{i2}] \wedge [A_{i2} = dw_{i2}] \wedge \dots \wedge [A_{is} = dw_{is}], \quad (5.17)$$

gdzie:  $dw_{ij} \in DW_j$  – wartość atrybutów  $A_j$  należących do dziedziny  $DW_j$ .

Poszczególnym atrybutom zjawisk przypisywane są kolejne wartości obserwacji, wówczas opis zjawiska na podstawie wielokrotnej obserwacji, np. dla  $n$  obserwacji, przedstawia się:

$$AZ = \alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \dots \wedge \alpha_i \wedge \dots \wedge \alpha_n, \quad i = 1, \dots, n \quad (5.18)$$

gdzie:  $\alpha_i$  – logiczny model danych  $i$ -tej obserwacji,  
 $AZ$  – łączny opis zbioru realizacji zjawiska.

Struktura gromadzonych danych w modelu relacyjnym, ujęta dla pojedynczej encji lub ich grup charakteryzowanych takimi samymi atrybutami (np. obszar badań), pokazana jest w postaci tabeli relacyjnej (5.19) oraz na rys. 5.10:

$$OBIEKT \subseteq \{(dw_1, dw_2, \dots, dw_m) : dw_1 \in DW_1, dw_2 \in DW_2, \dots, dw_m \in DW_m\} \quad (5.19)$$

gdzie  $dw_s$  –  $s$ -ty atrybut „obiekту”.

*OBIEKT*

$A_1$	$A_2$	...	$A_s$	...	$A_m$
$dw_{11}$	$dw_{12}$	...	$dw_{1s}$	...	$dw_{1m}$
$dw_{21}$	$dw_{22}$	...	$dw_{2s}$	...	$dw_{2m}$
...	...		...		...
$dw_{i1}$	$dw_{i2}$	...	$dw_{is}$	...	$dw_{im}$
...	...		...		...
$dw_{n1}$	$dw_{n2}$	...	$dw_{ns}$	...	$dw_{nm}$

Rys. 5.10. Ilustracja relacji OBIEKT

Schematem relacji opisującej obiekt i jego atrybuty jest zapis:

$$OBIEKT(A_1, A_2, \dots, A_m) \quad (5.20)$$

Najważniejszymi postulatami poprawności zbudowanej bazy danych są:

- niepowtarzanie się rekordów,
- jednoznaczność identyfikacji encji,
- istnienie jednoznacznego klucza identyfikującego obiekt,
- realizowanie przez bazę danych rzeczywistych działań.

W zakresie metodyki badań eksploatacyjnych leży przede wszystkim opracowanie konceptualnego modelu danych. Logiczny i fizyczny projekt relacyjnego modelu danych jest zadaniem realizowanym na styku informatyki i eksploatacji [47, 317].

Efektom konceptualnego projektu bazy danych jest model bazy danych niezależny od przyjętego w późniejszej fazie systemu bazy danych. Wymaga się tu:

- zidentyfikowania na podstawie analizy OBE zbiorów encji,
- określenia relacji (związków, zależności, przyporządkowania, itp.) między encjami,
- wyszczególnienia atrybutów opisujących encje i relacje oraz wartości ich zmienności,
- wyznaczenia kluczy relacji, kandydujących, a następnie klucza głównego, będących zbiorami atrybutów zapewniającymi niepowtarzalność wierszy (krotek) dla wszystkich atrybutów klucza,
- zweryfikowania modelu pod kątem występowania nadmiarów i ich usunięcia,
- sprawdzenia zgodności modelu z rzeczywistym systemem oraz weryfikacja możliwości realizacji transakcji.

## 6. Gromadzenie i przetwarzanie danych

### 6.1. Gromadzenie danych eksploatacyjnych

Realizacja badań eksploatacyjnych polega na obserwacji zdarzeń eksploatacyjnych (planowych i przypadkowych) generowanych przez źródła danych (obszary eksploatacji) zarchiwizowaniu ich na pierwotnych nośnikach danych, przesłaniu do banku danych, zweryfikowaniu i przetworzeniu [31, 85, 96]. Wszystkie obiekty (encje)  $e_i$  zidentyfikowane w modelu sytuacji eksploatacyjnej *MSEOM* pogrupowane są według kryterium obszarowego na grupy odpowiadające wyróżnionym obszarom badań  $OE_j$ . W badaniach archiwizowane są dane dla realizacji atrybutów  $i$ -tego obserwowanego obiektu badań, z przyjętej w modelu sytuacji eksploatacyjnej przestrzeni fazowej atrybutów

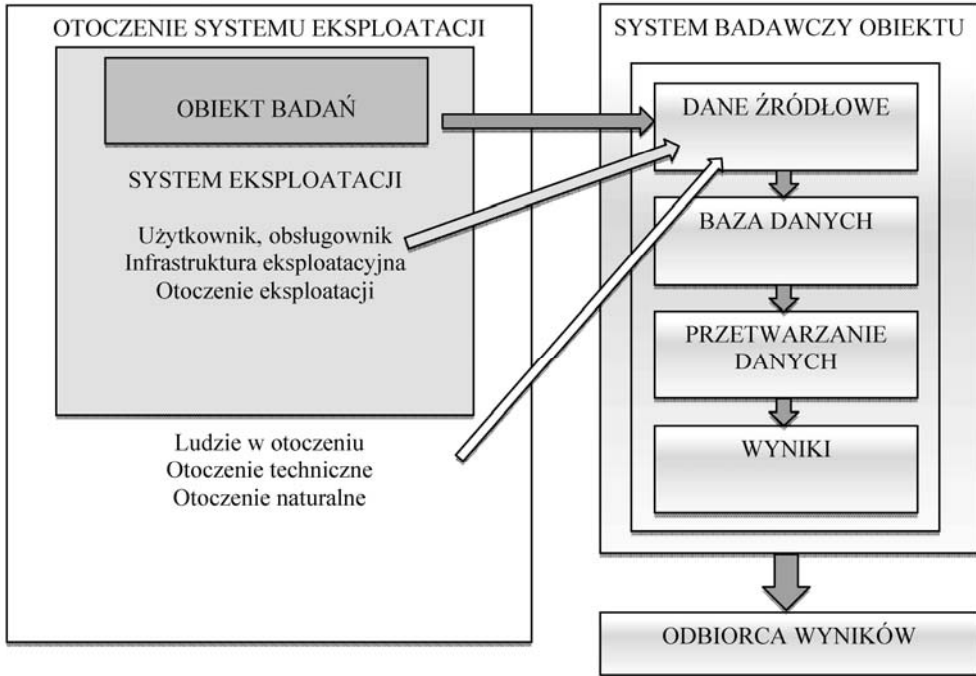
$$W(OE_j) = \{W_j(e_i \in PW(OE_j)); j = 1, \dots, 4; i = 1, \dots, n\} \quad (6.1)$$

Na rysunku 6.1 przedstawiono porównanie schematów pozyskiwania i przepływu danych od źródeł danych do końcowego odbiorcy wyników dla eksploatacyjnego i obiektowego podejścia do analizy obiektów eksploatacji. Podejście obiektowe tworzy dane źródłowe w postaci spójnych zbiorów charakteryzujących się takimi samymi atrybutami, co ułatwia i przyspiesza opracowywanie formularzy danych, które dotyczą jednolitych zbiorów atrybutów dla takich samych grup encji (obiektów).

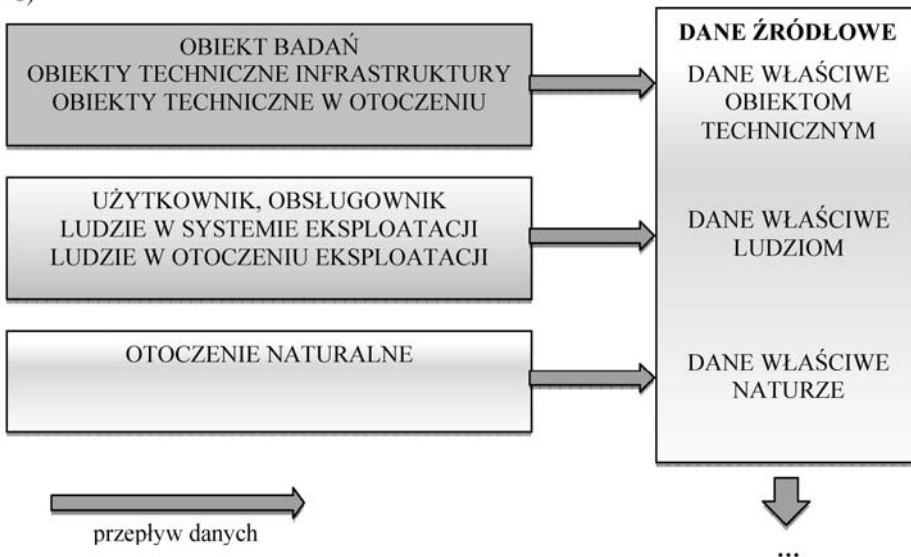
Dane eksploatacyjne zapisane na nośnikach „papierowych” lub bezpośrednio wprowadzone przez użytkowników końcowych poprzez interfejsy komputerowe lokowane są w bazie danych, będącej elementem systemu bazy danych [27, 135]. Pełna informatyczna architektura badań eksploatacyjnych oparta na *MSEOM* i systemie bazy danych przedstawiona jest na rys. 6.2. W części informatycznej wyróżnia się:

- użytkowników systemu (administrator, serwis systemu, użytkownicy końcowi wprowadzający dane i korzystający z wyników),
- interfejsy użytkowników o różnych uprawnieniach dostępu do systemu i danych,
- oprogramowanie automatycznego tworzenia baz danych (CASE),
- programy użytkowe i aplikacje analizy danych,
- bazę wiedzy gromadzącą definicje bazy, wzory raportów, formularzy i ekranów (*repository*),
- system zarządzania bazą danych (DBMS),
- bazę danych wiążącą logicznie i systematyzującą dane eksploatacyjne.

a)

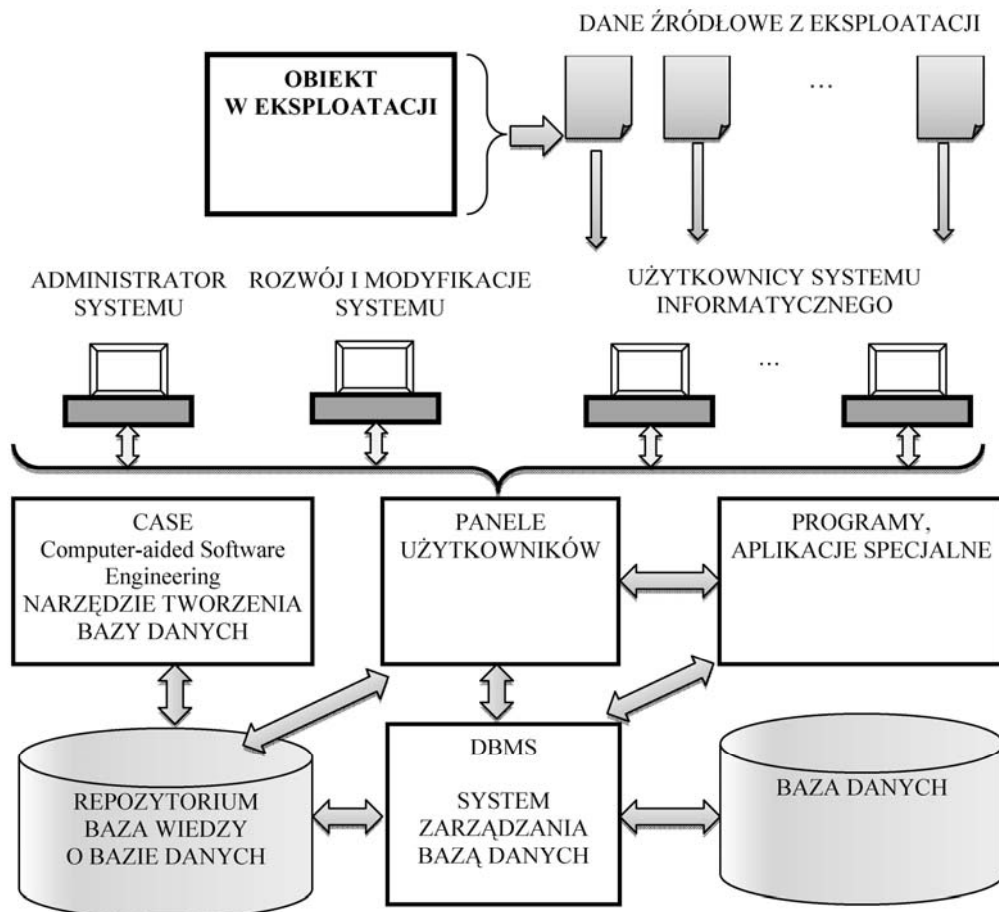


b)



Rys. 6.1. Źródła danych i ich przepływ w: a) eksploatacyjnym, b) obiektowym ujęciu obiektów w badaniach eksploatacyjnych





Rys. 6.2. Architektura systemu bazy danych w relacji do eksploatacji obiektu

System badawczy *SBE* obejmuje między innymi zbiór nośników danych jako miejsc, gdzie po raz pierwszy pojawia się obserwowana informacja eksploatacyjna. Opracowanie tej dokumentacji wymaga: aktualności i kompletności informacji, rejestracji bez konieczności interpretacji (prostota formularza), jednoznaczności zapisu i procedury przesyłania oraz zapewnienia możliwości modyfikacji dokumentacji w miarę przyszłych potrzeb systemu badawczego. Ze względu na różnorodność gromadzonych informacji wynikającą głównie ze zmienności obserwowanych zjawisk formularze, w konsekwencji także baza danych, dedykowana jest różnym danym, np.: dane dedykowane obiektom i ich komponentom, zdarzeniom katastroficznym, źródłom uszkodzeń, procesom eksploatacyjnym itp. [2, 31, 96, 101, 221, 229, 315]. W eksploatacji obiektów mechanicznych proponuje się tworzenie baz danych dotyczących trzech rodzajów danych:

- dane identyfikacyjne (stałe dla obiektu lub wolnozmiennie w okresie obserwacji),
- dane operacyjne, dokumentujące bieżący przebieg procesu eksploatacji (stały zbiór danych diagnostycznych),
- dane o zdarzeniach niepożądanych (dane o losowo pojawiających się zdarzeniach eksploatacyjnych).

Podane grupy danych gromadzone są w trakcie obserwacji obiektu na zróżnicowanych nośnikach danych oraz pojawiają się z różną częstotliwością. Zbiór danych eksploatacyjnych tworzą odpowiednio trzy grupy rodzajów danych  $GD_i$ :

$$GDE = \{GD_i\}; i = 1, 2, 3 \quad (6.2)$$

gdzie:  $GDE$  – zbiór danych eksploatacyjnych,

$GD_i$  – rodzaje danych:

$i = 1$  – identyfikacyjne,

$i = 2$  – procesowe,

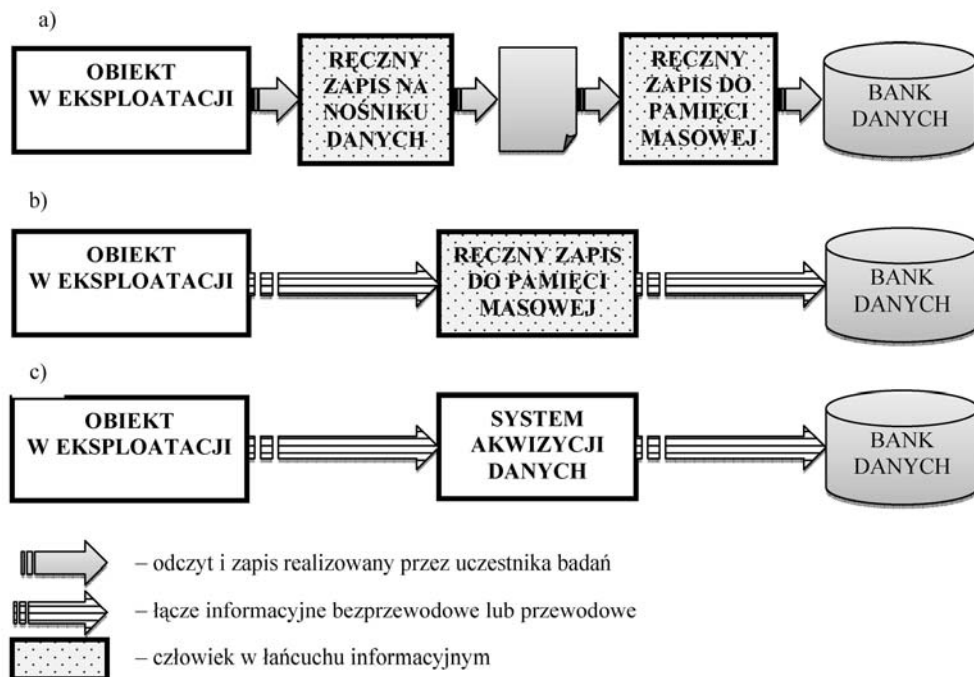
$i = 3$  – zdarzeniowe.

Podany podział danych orientuje jednocześnie sposób ich zapisu na pierwotnym nośniku danych. Postać nośnika danych może przybierać różnorodną formę w zależności od: możliwości dostępu do sprzętu komputerowego lub formularzy papierowych, możliwości zapisywania w warunkach warsztatowych czy w terenie oraz konieczności stosowania nośników pośrednich (obligatoryjne lub opcjonalne książki pracy/obsługi, własne notatki użytkowników i personelu obsługi, pamięci masowe skojarzone z przyrządami pomiarowymi itp.). Obecnie najbardziej racjonalnym sposobem archiwizacji danych jest informatyczna baza danych, dlatego możliwe są trzy zasadnicze drogi przebiegu i gromadzenia danych:

- zdarzenie → arkusz papierowy → interfejs komputerowy → baza danych,
- zdarzenie → interfejs komputerowy → baza danych,
- zdarzenie → elektroniczny układ rejestrujący → baza danych.

Sposoby przebiegu informacji od źródła jej powstania do bazy danych pokazano na rysunku 6.3, gdzie zwrócono również uwagę na obecność człowieka w łańcuchu informacyjnym oraz możliwość przesyłu danych drogą przewodową (np. Internet) lub bezprzewodową transmisją radiową (np. GPRS).

Ostatnie rozwiązanie (rys. 6.3c) jest w aspekcie szybkości i pewności danych najlepszą możliwością, jednak jest droższe oraz nie zawsze i nie wszędzie możliwe do wdrożenia ze względu na konieczność instalowania elementów diagnozujących stan atrybutów. Tam, gdzie jest to możliwe, zaleca się eliminowanie udziału człowieka [151]. Czynniki ludzki obecny w dwóch pierwszych rozwiązaniach jest zawsze źródłem niepewności danych, jednak koszty systemów automatycznej obserwacji i generowania danych, dodatkowy czas zabudowy urządzeń oraz możliwe problemy związane z inżynierią w układy bezpieczeństwa przemawiają często za pasywną obserwacją wybranych atrybutów, opartą na obserwacji post factum.



Rys. 6.3. Schematy przepływu informacji o różnym stopniu udziału człowieka

Wpływ na koncepcję systemu gromadzenia danych powinny mieć czynniki określone w fazie modelowania eksploatacji *MSEOM*. Należą do nich: mobilność obiektu, rozległość systemu eksploatacji, pożądany stopień dekompozycji, zakres wykorzystania wyników, zasoby ludzkie, czas i koszt badań [84, 85, 153].

Obiekty mobilne (pojazdy) wykonują swoje zadania (spełniają funkcje) w określonej bazie użytkowej rozłożonej na większym obszarze działania. Obiekty takie okresowo odwiedzają stałe lub zmienne miejsca obsługi. Przykładem może być ciągnik siodłowy realizujący przewozy międzynarodowe i obsługiwany w punktach serwisowych rozmieszczonych w pobliżu tras przejazdu. Podobny proces eksploatacji obserwuje się dla samolotów pasażerskich obsługiwanych okresowo w różnych bazach naziemnych dobieranych przez operatora stosownie do planu lotów, a właściwie ustalaniu planów lotu, tak aby loty kończyły się w miejscach obsługi technicznej [141]. Dla obiektów mobilnych przepływ informacji powinien być tak zorganizowany, aby dokumentacja obsługowa „poruszała się” z obiektem lub była przesyłana z punktów obsługi do centralnej bazy danych.

Dla obiektów stacjonarnych łatwiejsza jest konsolidacja dokumentacji użytkowej z obsługą ze względu na realizowanie procesu użytkowania i obsługiwania w tym samym miejscu. Organizacja systemu badawczego jest bardziej zwarta i łatwiejsza w kierowaniu.

Jednocześnie zwraca się uwagę na problemy i błędy pojawiające się w trakcie zbierania danych:

- dane dotyczące obserwowanych zdarzeń nie są zanotowane, zostają pominięte lub utracone przez błędne zapisy,
- pojawia się opóźnienie w notowaniu danych mogące mieć wpływ na uzyskane miary oceny z bieżącego przetwarzania danych,
- grupowanie danych powoduje utratę szczegółowych wartości (dane agregowane tracą wartości indywidualnych zdarzeń),
- cenzurowanie danych (brak szczegółowej informacji o poszczególnych zdarzeniach).

### 6.1.1. Dokumentacja identyfikacyjna

Zakres gromadzonych danych identyfikacyjnych zależy od stopnia dekompozycji systemu i poziomu obserwacji obiektów. Najszerszy podział takich danych dotyczy poziomu przedsiębiorstwa (lokalizacja, struktura organizacyjna, rodzaj działalności) oraz poziomu obserwowanego obiektu (struktura funkcjonalna, konstrukcyjna, typ, marka, producent, data produkcji i instalacji itp.) [85, 96, 227]. Zdarzeniem jest tutaj zmiana stanu obiektu polegająca na wprowadzeniu obiektu do eksploatacji lub obserwacji. Baza danych tworzona jest wraz z uruchomieniem badań i jest stosunkowo rzadko uzupełniana, czy modyfikowana.

Obiektami, dla których wymaga się archiwizacji danych identyfikacyjnych są obszary badań: obiekty techniczne, ludzie i otoczenie eksploatacji. Zbiory danych identyfikacyjnych  $W^{Ii}$  odpowiadające obszarom badań:  $OE_j$  ( $j = 1, \dots, 4$ ) opisane są zależnościami:

$$OE_1 \rightarrow OT \text{ (obiekty techniczne): } W^{I1} = \{w_{is}^{I1}\} \quad (6.3)$$

gdzie:  $w_{is}^{I1}$  –  $s$ -ty atrybut identyfikacyjny  $i$ -tego obiektu technicznego

$$OE_2 \rightarrow HE \text{ (ludzie): } W^{I2} = \{w_{is}^{I2}\} \quad (6.4)$$

gdzie:  $w_{is}^{I2}$  –  $s$ -ty atrybut identyfikacyjny  $i$ -tego człowieka

$$OE_3 \rightarrow ON \text{ (otoczenie naturalne): } W^{I3} = \{w_{is}^{I3}\} \quad (6.5)$$

gdzie:  $w_{is}^{I3}$  –  $s$ -ty atrybut identyfikacyjny  $i$ -tego elementu otoczenia naturalnego

$$OE_4 \rightarrow PEM \text{ (proces eksploatacji): } W^{I4} = \{w_{is}^{I4}\} \quad (6.6)$$

gdzie:  $w_{is}^{I4}$  –  $s$ -ty atrybut identyfikacyjny  $i$ -tego elementu procesu eksploatacji.

Gromadzone dane charakteryzują pochodzenie obiektów, ich umiejscowienie w systemie eksploatacji i relacje z pozostałymi obiektami, nominalne lub uśrednione oraz wymagane (zalecane) wartości atrybutów właściwości funkcjonalnych, przeciętne wartości atrybutów charakteryzujących otoczenie. W odniesieniu do procesu eksplo-

atacyjnego należy podać: plan użytkowania, oczekiwany czas przebywania w stanach eksploatacyjnych, harmonogram obsługi itp.

### 6.1.2. Dokumentacja operacyjna

Dokumentacja operacyjna gromadzi dane charakteryzujące przebieg eksploatacji, przy czym ze względu na specyfikę miejsca obiektu w łańcuchu działania eksploatacyjnego obserwuje się zdecydowaną różnicę między dokumentacją użytkowania i obsługi obiektu. Dokumentacja ta stanowi podstawę podejmowania bieżących decyzji eksploatacyjnych. Gromadzeniu podlegają dane pochodzące z obserwacji atrybutów funkcjonowania obiektów technicznych i eksploatorów oraz towarzyszących im warunków otoczenia. Zbiory danych operacyjnych  $W^{Oj}$  odpowiadające obszarom badań:  $OE_j$  ( $j = 1, \dots, 4$ ), opisane są zależnościami:

$$OE_1 \rightarrow OT \text{ (obiekty techniczne): } W^{O1} = \{w_{is}^{O1}\}, \quad (6.7)$$

gdzie:  $w_{is}^{O1}$  –  $s$ -ty atrybut operacyjny  $i$ -tego obiektu technicznego,

$$OE_2 \rightarrow HE \text{ (ludzie): } W^{O2} = \{w_{is}^{O2}\} \quad (6.8)$$

gdzie:  $w_{is}^{O2}$  –  $s$ -ty atrybut operacyjny  $i$ -tego człowieka,

$$OE_3 \rightarrow ON \text{ (otoczenie naturalne): } W^{O3} = \{w_{is}^{O3}\} \quad (6.9)$$

gdzie:  $w_{is}^{O3}$  –  $s$ -ty atrybut operacyjny  $i$ -tego elementu otoczenia naturalnego,

$$OE_4 \rightarrow PEM \text{ (proces eksploatacji): } W^{O4} = \{w_{is}^{O4}\} \quad (6.10)$$

gdzie:  $w_{is}^{O4}$  –  $s$ -ty atrybut operacyjny  $i$ -tego elementu procesu eksploatacji.

Dokumentacja operacyjna tworzy zwykle najobszerniejszą bazę danych, ponieważ obejmuje niemal wszystkie obiekty i znaczną liczbę atrybutów, których zmienność jest naturalnym efektem użytkowania i obsługi. Ograniczanie wielkości tej bazy uzyskuje się poprzez agregowanie i kumulowanie obserwacji z okresów archiwalnych stopniowo, w miarę upływu czasu eksploatacji i dezaktualizacji danych, zastępując dane źródłowe wskaźnikami, rozkładami zmienności i trendami atrybutów.

### 6.1.3. Dokumentacja zdarzeniowa

Dokumentacja zdarzeniowa dotyczy zdarzeń losowych uznawanych w eksploatacji jako zdarzenia niepożądane, zagrażające ludziom, środowisku naturalnemu lub mającym duże znaczenie dla efektywności obiektu. Szczególne znaczenie tych zdarzeń wymaga też szczególnej uwagi i szerokiego zakresu informacji będących podstawą analizy przyczyn i opracowania środków ograniczających skutki lub zapobiegawczych. Często poza standardowymi formularzami badawczymi sporządzane są raporty lub

specjalne dokumenty zawierające wyniki dodatkowych badań i ekspertyz. Zbiory danych o zdarzeniach niepożądanych  $W^{Zi}$  odpowiadające obszarom badań:  $OE_j$  ( $j = 1, \dots, 4$ ), opisane są zależnościami:

$$OE_1 \rightarrow OT \text{ (obiekty techniczne): } W^{Z1} = \{w_{is}^{Z1}\} \quad (6.11)$$

gdzie:  $w_{is}^{Z1}$  –  $s$ -ty atrybut zdarzeniowy  $i$ -tego obiektu technicznego,

$$OE_2 \rightarrow HE \text{ (ludzie): } W^{Z2} = \{w_{is}^{Z2}\} \quad (6.12)$$

gdzie:  $w_{is}^{Z2}$  –  $s$ -ty atrybut zdarzeniowy  $i$ -tego człowieka,

$$OE_3 \rightarrow ON \text{ (otoczenie naturalne): } W^{Z3} = \{w_{is}^{Z3}\} \quad (6.13)$$

gdzie:  $w_{is}^{Z3}$  –  $s$ -ty atrybut zdarzeniowy  $i$ -tego elementu otoczenia naturalnego,

$$OE_4 \rightarrow PEM \text{ (proces eksploatacji): } W^{Z4} = \{w_{is}^{Z4}\} \quad (6.14)$$

gdzie:  $w_{is}^{Z4}$  –  $s$ -ty atrybut zdarzeniowy  $i$ -tego elementu procesu eksploatacji.

Dokumentacja zdarzeniowa powstaje niezwłocznie po wystąpieniu zdarzeń niepożądanych i jest sporządzana niezależnie od dokumentacji operacyjnej. Dokumentacja ta jest podstawą budowy bazy wiedzy w zarządzaniu ryzykiem, a w szczególności powinna być wykorzystana do zapobiegania zdarzeniom niepożądanym i ograniczania ich skutków.

W tabeli 6.1 zestawiono przykładowe zbiory atrybutów zdarzeniowych odpowiadających wyróżnionym obszarom badań. Stanowi ona uszczegółowienie tabeli 5.2 przedstawiającej grupy atrybutów obiektowych. Atrybuty są dodatkowo przypisane do rodzaju dokumentacji badawczej.

#### 6.1.4. Baza danych eksploatacyjnych

Miejscami powstawania danych są elementy systemu eksploatacji oraz proces eksploatacji generowany zdarzeniami eksploatacyjnymi. Dane są archiwizowane w postaci dostosowanej do nośników danych i bazy danych, a istotnymi zagadnieniami na etapie powstawania zbioru danych są:

- oczekiwana liczba danych w okresie obserwacji,
- częstotliwość powstawania zdarzeń,
- gęstość strumienia danych,
- pewność i wiarygodność rejestracji danych i ich przekazywania,
- pewność przechowywania i niezmiennosc zawartości,
- ustalona systematyka, np. czasowa, obiektowa, problemowa integralność bazy danych (wieloaspektowość danych).

Tabela 6.1. Przykłady atrybutów odpowiadających rodzajom dokumentacji badawczej

Rodzaj dokumentacji/ obszar badań	Grupy najważniejszych atrybutów
Dokumentacja identyfikacyjna	
$OE_1 \rightarrow OT$ : obiekty techniczne	Nazwa obiektu, typ, marka, faza produkcyjna, rok produkcji, miejsce instalacji, właściciel, funkcje, zadania, charakterystyka obsługi profilaktycznych (częstość, rodzaje, zakres, materiały)
$OE_2 \rightarrow HE$ : ludzie	Wymagane kwalifikacje personelu użytkownika i obsługi, wymagania sprawnościowe i zdrowotne, ocena ryzyka zawodowego na stanowisku pracy, choroby zawodowe, liczba zatrudnionych, populacja ludności w otoczeniu
$OE_3 \rightarrow ON$ : otoczenie naturalne	Klimat (średnie i ekstremalne parametry w lecie i zimie: temperatura, wilgotność, opady deszczu i śniegu, zachmurzenie, prędkość i kierunek wiatru), dominująca i unikatowa roślinność i zwierzyzna
$OE_4 \rightarrow PEM$ : proces eksploatacji	Parametry pracy zalecane i ekstremalne, sposób użytkownika i obsługi, harmonogram obsługi
Dokumentacja operacyjna	
$OE_1 \rightarrow OT$ : obiekty techniczne	Okresowe lub ciągłe wartości parametrów pracy, wydajność (szt., km, cykli, $m^3$ , kg, N, Pa, itp.), jakość, czas funkcjonowania, czas wyłączenia, zużycie energii/paliwa,
$OE_2 \rightarrow HE$ : ludzie	Czas pracy dzienny/miesięczny/..., czas absencji, liczba pasażerów, wydajność, jakość pracy
$OE_3 \rightarrow ON$ : otoczenie naturalne	Krótkookresowe wartości temperatury, wilgotności, opady deszczu i śniegu, pokrywa śniegu, stan wody w rzece/zbiorniku, prędkość i kierunek wiatru, nasłonecznienie,...
$OE_4 \rightarrow PEM$ : proces eksploatacji	Chwilowy czas przebywania w wyróżnionych stanach eksploatacyjnych
Dokumentacja zdarzeniowa	
$OE_1 \rightarrow OT$ : obiekty techniczne	Opis zdarzenia (chwila, rodzaj zdarzenia, przyczyna, postać, skutek, sposób przywrócenia stanu poprawnego), identyfikacja obiektów/elementów, ich liczba, rodzaj i zakres strat, koszt strat,
$OE_2 \rightarrow HE$ : ludzie	Dane osobowe sprawcy/poszkodowanego, straty w wyniku zdarzenia: liczba rannych/zabitych/poszkodowanych, stopień utraty zdrowia, czas niezdolności do pracy na skutek zdarzenia, stan psychofizyczny w chwili zdarzenia
$OE_3 \rightarrow ON$ : otoczenie naturalne	Chwilowa (dla zdarzenia) temperatura, wilgotność, opady deszczu i śniegu, pokrywa śniegu, stan wody w rzece/zbiorniku, prędkość i kierunek wiatru, nasłonecznienie,...
$OE_4 \rightarrow PEM$ : proces eksploatacji	Wykaz stanów eksploatacyjnych przed zdarzeniem, wykaz zdarzeń powodujących zmianę stanu, parametry pracy lub obsługi obiektu w chwili zdarzenia

Pozyskane dane eksploatacyjne tworzą zbiory danych dla odpowiednich obszarów obserwacji i w grupach danych: (6.15), co ilustruje także tabela (6.2):

$$WD = \{OE_i \times GD_j\} = \{WD_{ij}\} \quad (6.15)$$

Każdy ze zbiorów  $WD_{ij}$  jest elementem zbioru danych, gdzie:  $GD_j$  jest rodzajem danych;  $j = 1, 2, 3$  oraz  $OE_i$  jest obszarem badań;  $i = 1, \dots, 4$ .

Tabela 6.2. Zbiory danych w obszarach badań

Obszary badań <i>OBE</i>	Zbiór rodzajów danych <i>GDE</i>		
	Dane identyfikacyjne <i>GD<sub>1</sub></i>	Dane operacyjne <i>GD<sub>2</sub></i>	Dane zdarzeniowe <i>GD<sub>3</sub></i>
<i>OE<sub>1</sub> → OT:</i> obiekty techniczne	<i>WD<sub>11</sub></i>	<i>WD<sub>12</sub></i>	<i>WD<sub>13</sub></i>
<i>OE<sub>2</sub> → HE:</i> ludzie	<i>WD<sub>21</sub></i>	<i>WD<sub>22</sub></i>	<i>WD<sub>23</sub></i>
<i>OE<sub>3</sub> → ON:</i> otoczenie naturalne	<i>WD<sub>31</sub></i>	<i>WD<sub>32</sub></i>	<i>WD<sub>33</sub></i>
<i>OE<sub>4</sub> → PEM:</i> proces eksploatacji	<i>WD<sub>41</sub></i>	<i>WD<sub>42</sub></i>	<i>WD<sub>43</sub></i>

Organizacja i zarządzanie danymi w bazie danych podporządkowane są systemowi bazy danych DBMS. Najczęściej stosowanym współcześnie modelem danych, obok modelu danych hierarchicznego, semistrukturalnego czy sieciowego, jest obecnie model relacyjny wykorzystujący tabelaryczną systematykę danych [317].

## 6.2. Przetwarzanie danych

Przetwarzanie danych eksploatacyjnych jest wieloetapowym procesem, którego efektem powinny być miary oceny zjawisk eksploatacyjnych pozwalających na rozwiązanie problemu badawczego. Pierwszym krokiem jest identyfikacja problemu wymagającego działania, sprecyzowanie celu analizy oraz numerycznego sposobu rozwiązania problemu. Jest to podstawą sformułowania założeń modelowych problemu i określenia sposobu uzyskania danych i ich analizy. Uzyskane dane dopasowuje się do założonego modelu i sprawdza poprawność modelu. Brak zgodności modelu z danymi wymaga zmiany modelu i powtórzenia procedury sprawdzającej. Potwierdzony model daje podstawę podjęcia decyzji rozwiązującej zdefiniowany problem [58, 74, 175, 226].

Analiza danych ma istotne znaczenie dla uzyskiwanych wyników końcowych ze względu na możliwość subiektywnego sterowania wiarygodnością danych oraz niepewność informacji wbudowanej w obserwowane procesy i sposoby pozyskiwania danych [158]. Analiza danych, jako metoda postępowania, klasyfikowana może być według różnorodnych kryteriów [58, 74, 176, 221], do których zalicza się np.: poziom dekompozycji systemu czy matematyczne podejście analityczne. Niezawodność kryterium oceny obiektu rozpatrywana jest jako cecha własna obiektu zależna od projektu i wykonania lub niezawodność zależna od warunków eksploatacji [221]. Ten zakres analizy jest szczególnie istotny w przypadku badań obiektów eksploatowanych w różnych warunkach środowiskowych [232]. W naturalnej eksploatacji obiektu krytycznymi zdarzeniami dla przedsięwzięcia są uszkodzenia powodujące przerwanie spełniania funkcji i zaburzenie rytmu działania, dlatego też analiza uszkodzeń jest kluczowym



etapem badań koniecznym do uwzględnienia w archiwizacji i przetwarzaniu danych [175].

Dla każdego uszkodzenia przeprowadza się analizę postaci uszkodzenia co najmniej w zakresie rozstrzygnięcia, czy jest to: uszkodzenie o charakterze stopniowym (zużycie, zmęczenie, korozja, itp.), uszkodzenie nagłe, przypadkowe (zerwanie, złamanie, skręcenie, pożar, eksplozja, itp.) lub uszkodzenie powtarzające się okresowo i zanikające. Analiza przyczyn powinna określić czy uszkodzenie jest spowodowane przyczynami wewnętrznymi (osłabienie wytrzymałości, zużycie lub inne wewnętrzne), zewnętrznymi (błąd użytkownika, wada projektowa lub produkcyjna) lub uszkodzenie ma charakter wtórny spowodowany uszkodzeniem innego obiektu w systemie. W procesie naprawy należy stosownie dane zapisać po zakończeniu i sprawdzeniu poprawności naprawy. Wyboru miar oceny dokonuje się zgodnie z celem badań, a koncepcja wyboru wskaźników w zależności od sytuacji eksploatacyjnej podana jest w postaci zaleceń normowych wyboru wskaźników niezawodności [253]. Przetwarzanie danych jest obecnie w szerokim zakresie wspomagane przez aplikacje komputerowe pozwalające na wielokryterialne analizy i ocenę badanych zjawisk [203, 204, 249]

### **Poziom dekompozycji systemu w analizie danych**

Zakres wykorzystania wyników badań wiąże się bezpośrednio ze stopniem dekompozycji obserwowanego systemu. Dane gromadzone na poziomie elementu lub zespołu stanowią zazwyczaj bazę danych wykorzystywaną w analizach procesów degradacyjnych i niezawodności oraz w zarządzaniu zapotrzebowaniem na części wymienne.

Analizy danych dokonuje się na trzech zasadniczych poziomach dekompozycji, zapewniając w ten sposób rzetelną i wnikliwą w odniesieniu do przedmiotu analizy wiedzę niezbędną w zarządzaniu eksploatacją. Powołując się na obiektowe postrzeganie eksploatacji (rozdz. 3.1), należy przyjąć następujące poziomy analizy danych:

- o komponentach obiektu technicznego (analiza funkcjonalności, przyczyn i postaci uszkodzeń, czas do uszkodzenia, czas obsługi/naprawy, sposób i technologia naprawy, koszt naprawy),
- o obiekcie, jako elemencie systemu eksploatacji (analiza użyteczności i funkcjonalności obiektu, analiza wydajności i efektywności obiektu, analiza kosztów użytkowania i obsługi vs. dochody, korzyści eksploatacyjne),
- o systemie eksploatacji (analiza trendów zapotrzebowania na usługi, starzenia parku maszynowego, perspektyw odnowy lub modernizacji obiektów, analiza strategii eksploatacyjnej).

### **Zakres analizy danych**

Analiza i przetwarzanie danych powinno odbywać się na trzech zasadniczych płaszczyznach obejmujących:

- bieżące zarządzanie eksploatacją i ryzykiem (sterowanie procesem, kontrola środków bezpieczeństwa),
- zarządzanie w sytuacjach kryzysowych, takich jak: awarie i katastrofy (analiza przyczyn i skutków, analiza scenariuszy rozwoju wydarzeń),

- tworzenie bazy wiedzy dla faz przedeksplatacyjnych: projektowania i wytwarzania (modelowanie zdarzeń eksploatacyjnych, analizy regresyjne, analizy szeregów czasowych).

Dwie pierwsze płaszczyzny wymagają szybkiego sprzężenia zwrotnego z procesem analityczno-przetwórczym danych, a analiza powinna przebiegać w kierunku:

- analizy wydajnościowej obiektu (planowanie użytkowania, parametry energetyczne, sprawność, produkty uboczne użytkowania),
- analizy niezawodnościowej w naturalnych warunkach eksploatacji (zakłócenie procesu użytkowania, planowanie części wymiennych i materiałów wspomagających, logistyka obsługiwanie),
- analizy zagrożeń w systemie eksploatacji (ludzie, obiekty, środowisko).

Projektowanie i wytwarzanie obiektów technicznych wymaga analiz uszkodzeń w zakresie intensywności uszkodzeń, warunków otoczenia i narażeń zewnętrznych, pierwotnych i wtórnych przyczyn uszkodzeń, postaci uszkodzenia, sposobu naprawy, bezpośrednich skutków i kosztów uszkodzeń.

### Podójście analityczne

W procesie przetwarzania danych wyróżnia się trzy rodzaje analizy danych różniące się kolejnością w procedurze analitycznej [74]:

- **Klasyczna analiza danych obejmuje sekwencję działań:**

PROBLEM→DANE→MODEL→ANALIZA→WYNIKI.

Dane są wykorzystane do sprawdzenia hipotetycznego modelu zjawiska i określenia parametrów modelu, szczególnie przydatne w tworzeniu zaleceń projektowych i wytwórczych.

- **Przeszukiwanie danych (EDA – *Exploratory Data Analysis*) obejmuje sekwencję:**

PROBLEM→DANE→ANALIZA→MODEL→WYNIKI.

Dane są podstawą analizy, poszukiwania i przyjęcia właściwego modelu dopasowanego do badanego zjawiska, co jest podstawą zarządzania.

- **Analiza Bayesowska łączy oba rodzaje analizy i proponuje działania:**

PROBLEM→DANE→MODEL→WSTĘPNY ROZKŁAD→ANALIZA→WYNIKI.

Analiza danych poprzedzona jest wstępnym założeniem rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych losowych na podstawie wiedzy inżynierskiej i eksperckiej.

Wykorzystanie wskazane również w analizie poprawności projektu i procesie wytwarzania.

Z podanego zestawienia wynika, że najbardziej odpowiednim podejściem na potrzeby zarządzania eksploatacją jest przeszukiwanie danych określane jako: *Exploratory Data Analysis* (EDA) [74]. Ten rodzaj przetwarzania danych obejmuje liczny zbiór metod i narzędzi, których celem jest: dopasowanie dobrego modelu do zaobserwowanych w eksploatacji danych, wyznaczenie wartości skrajnie odbiegających od założonego modelu, elastyczna ocena modelu, oszacowanie parametrów i niepewności, okre-

ślenie istotności uzyskanych wniosków. EDA określana jest jako zbiór metod w dużej mierze graficznych obejmujących w odniesieniu do zagadnień eksploatacyjnych:

- metody ilościowe:
- testowanie hipotez statystycznych,
- analizę wariancji,
- estymację punktową i przedziały ufności,
- metodę najmniejszych kwadratów (regresja liniowa),
- metody graficzne:
- wykresy punktowe,
- histogramy,
- dystrybuanty prawdopodobieństwa,
- wykresy rozrzutu,
- wykresy pudełkowe,
- wykresy wpływu.

### 6.2.1. Model oceny eksploatacyjnej obiektu badań

Ocena obiektu w eksploatacji jest złożonym zagadnieniem metodycznym, biorąc pod uwagę uogólnienie zagadnienia, to znaczy szeroką gamę obiektów, systemów eksploatacji i kryteriów oceny formułowany przez różnych odbiorców miar oceny. Najszerszym punktem widzenia może tu być pojęcie *zdolności prawidłowego działania* (tłum. z ang.: *performability*) wprowadzone do techniki w 1980 r. przez Johna Meyera [101]. W ujęciu Meyera i w dalszych modyfikacjach pojęcie to odnosi się do zespołu cech obiektu obejmujących gotowość, funkcjonalność, jakość, nieuszkodzalność, naprawialność i bezpieczeństwo [71, 101, 221, 254]

Kompleksową miarą obejmującą podane właściwości obiektów ujmuje wskaźnik  $CEM = GOT \text{ WYK } JAK \text{ BEZP}$  przedstawiony w rozdz. 2. Czynniki  $CEM$  dotyczą kolejno:

- gotowości obiektu (cecha własna i systemu eksploatacji),
- wykorzystania obiektu (cecha systemu zarządzania eksploatacją),
- jakości wytworu (produktu, usługi) obiektu (cecha obiektu i systemu użytkowania),
- bezpieczeństwa (cecha obiektu, systemu eksploatacji i zarządzania eksploatacją).

Rozwinięcie formuły  $CEM$  poprzez wprowadzenie wzorów pośrednich 6.16–6.19 prowadzi do zależności (6.20):

$$GOT = \frac{T^U(t)}{t} \quad (6.16)$$

$$WYK = \frac{T^A(t)}{T^U(t)} \quad (6.17)$$

$$JAK = \frac{N(t) - N^F(t)}{N(t)} \quad (6.18)$$

$$BEZP = \frac{D(t) - S(t)}{D(t)} \quad (6.19)$$

gdzie:  $T^U(t)$  – czas użytkowania w okresie  $t$ ,  
 $T^A(t)$  – czas efektywnego wykorzystania (aktywny czas pracy),  
 $N(t)$  – ilość uzyskanego efektu (liczba sztuk produktów, liczba zrealizowanych cykli, miara ilości wykonanej pracy),  
 $N^F(t)$  – ilość wadliwego efektu (liczba sztuk braków produkcyjnych, liczba źle zrealizowanych cykli, miara ilości niewłaściwie wykonanej pracy),  
 $D(t)$  – dochód uzyskany z działalności w okresie  $t$ ,  
 $S(t)$  – straty wynikające ze zdarzeń niepożądanych.

Przyjmuje się założenia w stosunku do określenia jakości i wielkości straty:

$\lambda = \frac{N^F(t)}{N(t)}$  – wskaźnik wadliwości działania (udział braków, błędów, w całkowitym efekcie działania),

tym efekcie działania),

$\gamma = \frac{D(t)}{N(t)}$  – koszt jednostkowy efektu działania (produktu, usługi),

$\delta$  – współczynnik ryzyka proporcjonalny do ilości uzyskiwanego efektu wyrażający np. wielkość ubezpieczenia równoważnego średnim długoterminowym stratom odniesionym do dochodu uzyskanego w tym samym czasie.

W rezultacie uzyskuje się:

$$CEM = \frac{T^U(t)}{t} \frac{T^A(t)}{T^U(t)} \frac{N(t) - N^F(t)}{N(t)} \frac{D(t) - S(t)}{D(t)}$$

$$CEM = \frac{T^A(t)}{t} \frac{N(t) - \lambda N(t)}{N(t)} \frac{\gamma N(t) - \gamma N(t) \delta}{\gamma N(t)}$$

oraz:

$$CEM = \frac{T^A(t)}{t} (1 - \lambda)(1 - \delta) \quad (6.20)$$

Wnioskiem wpływającym z analizy postaci wskaźnika  $CEM$  jest możliwość wpływania na efektywność działania poprzez maksymalizowanie czasu poprawnej, aktywnej pracy oraz minimalizowaniu wskaźników błędów i braków w działaniu. Zawarte są tu postulaty związane z poprawą eksploatacji w zakresie:

- uszkodzalności obiektu (częste obsługiwanie skraca czas użytkowania),
- naprawialności obiektu (łatwa naprawialność skraca czas obsługiwaniania),
- organizacji użytkowania (jałowe stany pracy i przestoje skrcają czas aktywnej pracy),

- jakości użytkowej obiektu („lepsze” obiekty realizują efekt o wyższej jakości, powodują mniej braków),
- bezpiecznego działania (straty wynikające z działania z niezidentyfikowanym zagrożeniami powinny być ograniczone inwestycjami proaktywnego zarządzania ryzykiem).

Postulaty te implikują działania, których skuteczność można ocenić, znając realizację następujących zmiennych w odniesieniu do różnych poziomów dekompozycji systemów dostarczających informacji o tych zmiennych:

- czas między uszkodzeniami,
- czas obsługiwanania,
- czas przebywania w pozostałych wyróżnionych stanach eksploatacyjnych,
- pracochłonność napraw,
- parametry techniczne charakteryzujące stan techniczny,
- ilość uzyskiwanego efektu,
- wielkość strat wynikających ze zdarzeń niepożądanych,

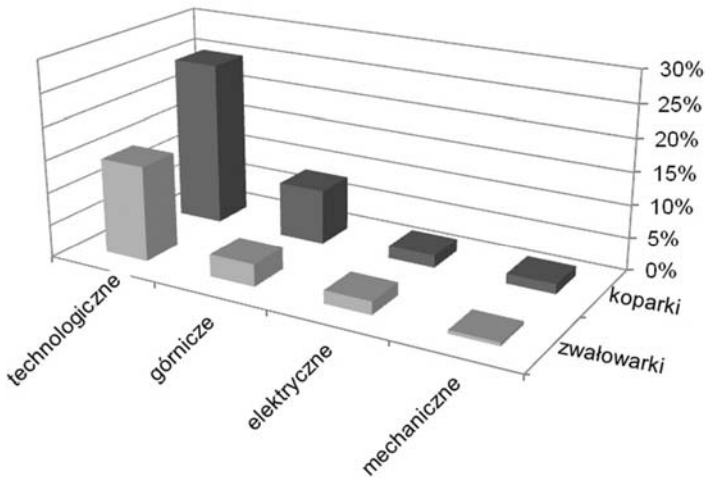
Realizacja podanych postulatów jest możliwa po prowadzeniu długookresowej obserwacji obiektu w eksploatacji, a uzyskane dane oparte na zmiennych losowych i zeterminowanych, po odpowiednim przetworzeniu, dają pożądane, proste i złożone miary oceny (wskaźniki, miary kompleksowe, funkcje). Literatura tematu przynosi liczne modele i metody oceny obiektów w eksploatacji [4, 31, 32, 33, 50, 61, 85, 86, 100, 101, 102, 133, 203, 233, 273].

### 6.2.2. Przykłady oceny obiektów w świetle badań własnych

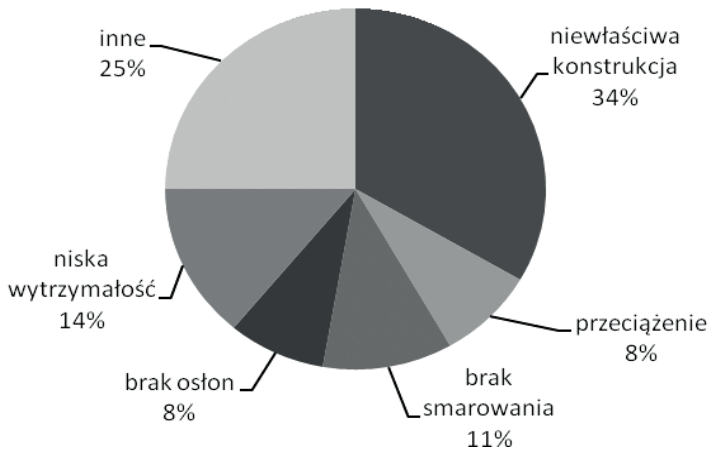
Wybrane wyniki z badań zrealizowanych w kopalni węgla brunatnego przedstawiono jako weryfikację opisanych sposobów przetwarzania danych i prezentacji wyników. Na rysunkach 6.4–6.7 pokazano proste oceny obiektów (udziały procentowe) na poziomie maszyna robocza (koparka) dla różnych aspektów eksploatacji: przyczyny postojów koparek, postaci uszkodzeń oraz sposoby naprawy.

Przykładowy rozkład rodzajów uszkodzeń taśm przenośnikowych w jednej z kopalni węgla brunatnego pokazano na rys. 6.7. Udział uszkodzeń starzeniowych dla uszkodzeń przenośników jest znaczny (46%), a dominujące uszkodzenia to: uszkodzenia złącza, rozwarstwienia taśm przenośnikowych i wycieranie okładek taśmy.

Bardziej złożonymi miarami oceny są rozkłady prawdopodobieństwa dla istotnych w badaniach zmiennych losowych. Rozkład prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia powiązany funkcją niezawodności, funkcją gęstości i intensywności uszkodzeń daje najpełniejszą informację o zmiennej losowej, co pozwala na wykorzystanie tych funkcji w zarządzaniu i podejmowaniu ryzyka zadaniowego. Na rysunku 6.8 pokazano funkcję intensywności uszkodzeń dla układu kierowania ogniem w czołgu TWARDY. Malejący przebieg funkcji sugeruje, że uszkodzenia analizowanego układu są uszkodzeniami wczesnymi, tzw. burn-in, świadczącymi o błędach w produkcji lub projektowaniu [155, 191].

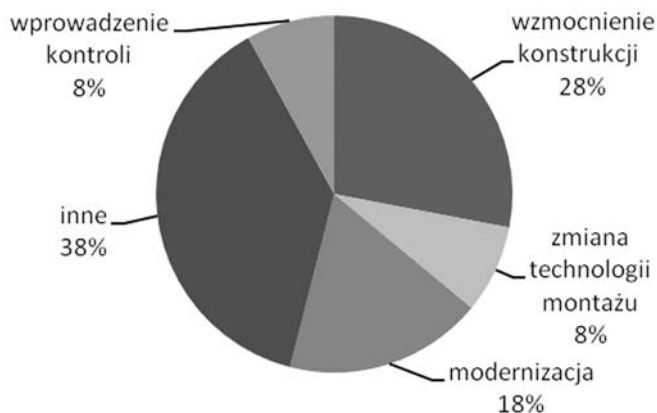


Rys. 6.4. Udziały procentowe przyczyn postojów nieplanowych koparek i zwałowarek w KWB Bełchatów

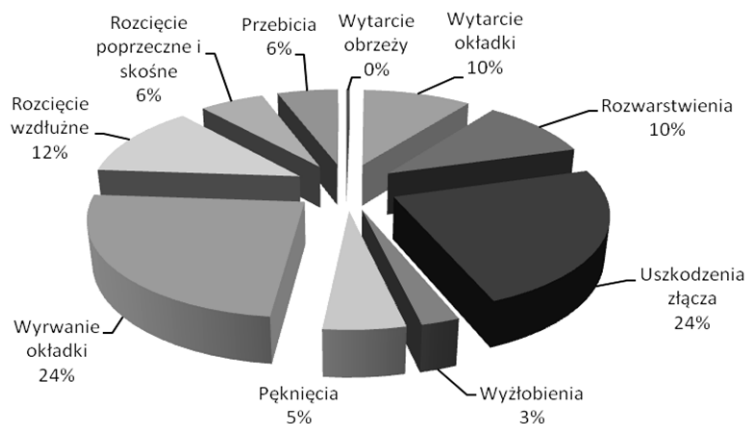


Rys. 6.5. Postaci uszkodzeń koparek w kopalni odkrywkowej węgla brunatnego

Modelowanie procesów degradacyjnych jest zadaniem bardziej złożonym ze względu na konieczność połączenia większej liczby atrybutów, nie zawsze mających postać mierzalną. Informacjami wejściowymi do takiej złożonej oceny mogą być wyniki pomiarów w postaci: dyskretnej, rozkładów prawdopodobieństwa, widm częstotliwościowych i amplitudowych oraz w postaci zmiennych opisowych (lingwistycznych) dotyczących atrybutów niemierzalnych [98, 205, 274]. Wielkości te stają się podstawą budowy bazy reguł o stopniu degradacji obiektu. W tabeli 6.3 zestawiono atrybuty wykorzystywane w ocenie degradacji maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego.



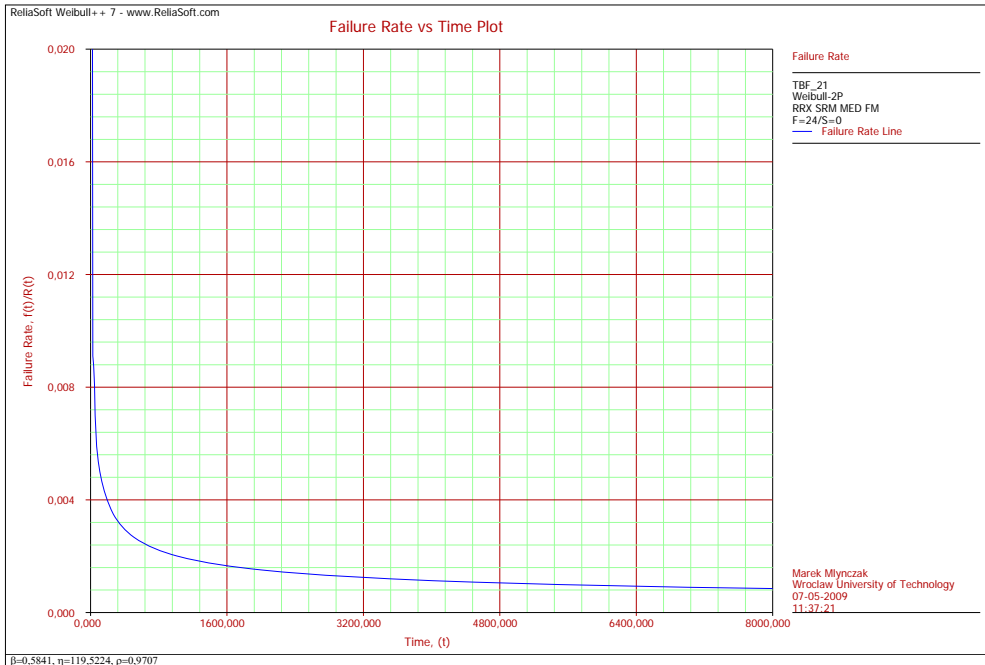
Rys. 6.6. Sposoby napraw koparek w kopalni odkrywkowej węgla brunatnego



Rys. 6.7. Rozkład rodzajów uszkodzeń taśm przenośnikowych w kopalni węgla brunatnego

Procedura rozmywania (fuzzyfikacji) danych wejściowych opiera się na określeniu funkcji przynależności, której postać kształtuje się arbitralnie w zależności od żądanego stopnia rozmytości zmiennej. W praktyce ogranicza się funkcje przynależności do kilku typowych postaci: trójkątnej, trapezoidalnej, zetowej i tzw. „dzwonowej”.

W odniesieniu do analizowanych procesów degradacji (korozja, zmęczenie, pęknięcie, zużycie ściernie, odkształcenia plastyczne, pełzanie) należy dokonać rozmycia zmiennych charakteryzujących te procesy. Wprowadza się cztery zmienne lingwistyczne określające ocenę stanu maszyny ze względu na czynniki degradacji: bez zastrzeżeń, czasowe dopuszczenie, stan niebezpieczny, stan awaryjny. Funkcje przynależności dla każdego czynnika i każdej zmiennej opisywane są przez ekspertów, zgodnie z ich wiedzą i doświadczeniem.



Rys. 6.8. Malejący przebieg funkcji intensywności uszkodzeń dla system kierowania ogniem w czołgu TWARDY

Tabela 6.3. Dane wejściowe do rozmytej oceny rodzajów uszkodzeń maszyny

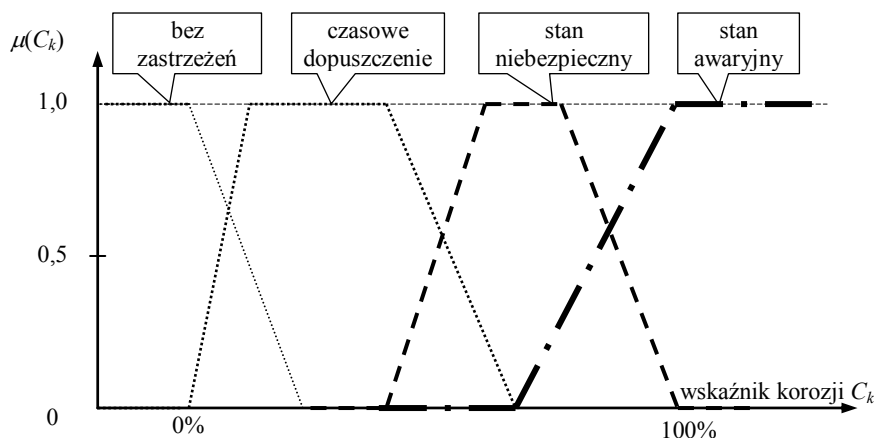
Czynnik degradacyjny	Typ zmiennej	Zasięg oddziaływania
Korozja	Wskaźnik korozyjności	Wybrane punkty struktury nośnej (pręty, spoiny, dźwigary)
Zmęczenie	Stopień degradacji maszyny $q^T_{\Sigma}$	Wybrane elementy struktury nośnej (pręty)
Pęknięcie	długość pęknięcia w punkcie obserwacji	Wybrane punkty struktury nośnej (pręty, spoiny)
Zużycie ściernie	Ubytek masy, wymiaru liniowego, luz	Wybrane elementy maszyny
Odkształcenia plastyczne	Zmienna lingwistyczna – tekst	Wybrane elementy struktury nośnej (pręty, liny, dźwigary)
Odkształcenia-pępelzanie	Zmienna lingwistyczna – tekst	Wybrane elementy struktury nośnej (pręty, liny)

Obiektywizowanie ocen eksperckich można uzyskiwać, stosując rozmytą metodę delficką. Zakłada ona, że każdy z  $n$  ekspertów podaje realizację oceny np. w postaci trójkątnej liczby rozmytej, definiując wartość skrajnie najmniejszą, oczekiwaną i skrajnie największą ( $A^{(i)}_1, B^{(i)}_1, C^{(i)}_1$ ), gdzie  $i$  jest numerem eksperta, a 1 określa pierwszą fazę oceny. Na podstawie  $n$  trójkątnych liczb rozmytych wyznaczana jest liczba średnia: ( $A^m_1, B^m_1, C^m_1$ ). Każdy z ekspertów otrzymuje z kolei informację o rozbieżności jego oceny od oceny średniej: ( $A^m_1 - A^{(i)}_1, B^m_1 - B^{(i)}_1, C^m_1 - C^{(i)}_1$ ). Daje to możliwość sko-



rygowania swojej opinii w stosunku do średniej i wydania nowej oceny ( $A_2^{(i)}, B_2^{(i)}, C_2^{(i)}$ ). Procedura powtarzana jest kolejny raz, aż do uzyskania zadowalającej stabilności kolejnych ocen, w praktyce do chwili uzyskania różnic bliskich 0. Dopuszczalne są też inne kryteria zakończenia pętli oceny, takie jak: określona liczba iteracji, czy nie dopuszczenie do zwiększania błędu w stosunku do średniej.

Na rysunku 6.9 pokazano przykładową funkcję przynależności dla wskaźnika korozyjności  $C_k$  z wartościami: bez zastrzeżeń, czasowe dopuszczenie, stan niebezpieczny, stan awaryjny.



Rys. 6.9. Przykład funkcji przynależności dla korozji obiektu

Reguły wnioskowania o stanie degradacji można zbudować według logicznej zależności przyczynowo-skutkowej „JEŻELI *przesłanka* TO *konkluzja*” łączone w miarę potrzeby operatorami I oraz LUB. Przykładowa reguła dla stanu czasowego dopuszczenia maszyny może mieć następującą postać:

**Jeżeli** {(korozja jest czasowe dopuszczenie) i (zmęczenie jest bez zastrzeżeń) i (pęknięcie jest stan niebezpieczny) i (zużycie ściernie jest bez zastrzeżeń) i (odkształcenie plastyczne jest bez zastrzeżeń) i (pełzanie jest bez zastrzeżeń)} **TO** czasowe dopuszczenie do ruchu.

Reguły o tej samej konkluzji mogą być agregowane (łączone operatorem LUB) tak, że w końcowym wyniku tworzenia bloku reguł otrzymuje się cztery reguły dla każdego ze stanów maszyny.

Wnioskowanie (wyostrzenie funkcji przynależności) wymaga wyznaczenia dla funkcji przynależności konkluzji metodą maksimum lub środka ciężkości ostrej odpowiedzi w postaci jednego z czterech stanów degradacji maszyny.

Przyczyna, rodzaj, skutek uszkodzenia i sposób naprawy są charakterystykami opisowymi, jakościowymi, mającymi najczęściej postać: tekstową, graficzną (fotograficzną), diagramów Ishikawy, drzew wydarzeń (ETA), drzew błędów (uszkodzeń) (FTA), analizy rodzajów uszkodzeń i ich skutków (FMEA/FMECA) [53, 125]. Miary

tych charakterystyk są zwykle względnymi wartościami odnoszącymi się do danego systemu eksploatacji, przedziału czasu, czy określonego zbioru obiektów [56, 259, 261].

W literaturze i badaniach eksploatacyjnych wiele miejsca poświęca się analizie przyczyn uszkodzeń, dążąc do eliminowania uszkodzeń poprzez znajomość pierwotnych zdarzeń i okoliczności. Analiza pierwotnych uszkodzeń na najniższym poziomie dekompozycji (element, para kinematyczna) ukierunkowana jest na zidentyfikowanie dominującego zjawiska fizycznego.

Rodzaj uszkodzenia, będący przedmiotem analizy FMEA, jest zależny w dużej mierze od obiektu i jego funkcji spełnianej w użytkowaniu. W tabeli 6.4 przedstawiono wybrane przykłady rodzajów uszkodzeń obiektów mechanicznych i ich udziały we wszystkich uszkodzeniach [233].

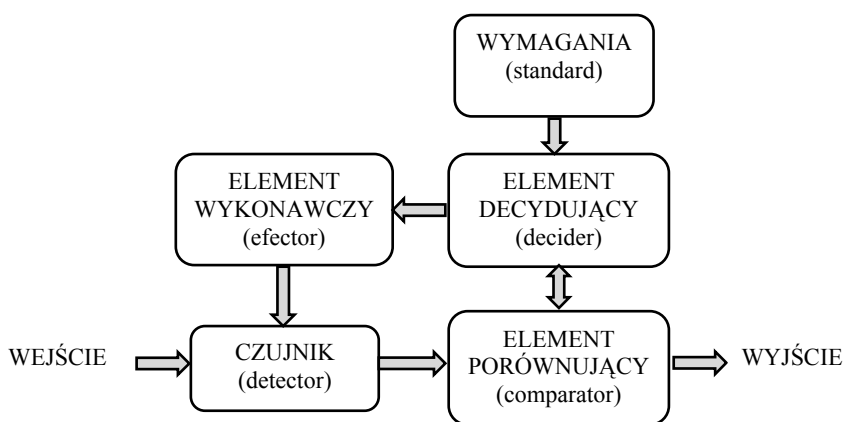
Tabela 6.4. Zaobserwowane udziały rodzajów uszkodzeń

Urządzenie	Rodzaj uszkodzenia	Udział rodzaju uszkodzenia
Siłownik	▪ błędne położenie	0,47
	▪ zatarcie	0,23
	▪ zużycie	0,20
	▪ zanieczyszczenie	0,10
Łożysko	▪ zatarcie	0,50
	▪ nadmierny luz	0,43
	▪ zanieczyszczenie	0,07
Hamulec	▪ nadmierne zużycie	0,56
	▪ wyciek	0,23
	▪ przebicie	0,11
	▪ korozja	0,05
	▪ nadmierny luz	0,05
Pas napędowy	▪ nadmierne zużycie	0,75
	▪ zerwanie	0,25
Tuleja	▪ nadmierne zużycie	0,85
	▪ nadmierny luz	0,11
	▪ pęknięcie	0,04
Sprzęgło	▪ zatarcie	0,56
	▪ poślizg	0,24
	▪ brak ruchomości	0,20
Przekładnia zębata	▪ nadmierne zużycie	0,54
	▪ zatarcie	0,46
Filtr mechaniczny	▪ nieszczelność	0,67
	▪ zapchanie	0,33
Pompa hydrauliczna	▪ nieszczelność	0,82
	▪ niewłaściwy wydatek	0,12
	▪ brak przepływu	0,06
Złącze śrubowe	▪ poluzowanie	0,67
	▪ nadmierne zużycie	0,33
Zawór hydrauliczny	▪ nieszczelność	0,77
	▪ niemożność otwarcia	0,12
	▪ niemożność zamknięcia	0,11

## 6.3. Zakres wykorzystania wyników badań

### 6.3.1. System badań w zarządzaniu eksploatacją

Zarządzanie jest pewną odmianą sterowania procesem opisanym w ogólnej teorii systemów jako cybernetyczne działanie pomiędzy wejściem a wyjściem do systemu, gdzie sprzężenie zwrotne dostarcza informacji o poprawności sterowania [145, 289]. W schemacie ogólnego systemu sterującego wymienia się pięć podstawowych elementów: detektor (czujnik), element porównujący symptom z detektora z wymaganym standardem, element decydujący o działaniu, element wykonawczy, sterujący sygnałem wejściowym (rys. 6.10.) [289].



Rys. 6.10. Cybernetyczny model sterowania

Zarządzanie w ujęciu zarządzania eksploatacją obiektów mechanicznych obejmuje takie same działania, jak w klasycznym modelu zarządzania [16, 246], tj.:

- projektowanie procesu działania,
- bieżące organizowanie i sterowanie działaniem,
- sprawdzanie i ewentualna poprawa efektu działania.

Celem zarządzania eksploatacją jest osiągnięcie efektów działania systemu technicznego ocenianego przez pryzmat wielu kryteriów, spośród których najważniejszymi są [16]:

- jakość (działanie/usługa oceniana przez odbiorcę produktu lub usługi),
- szybkość (krótki czas dostarczenia produktu lub usługi),
- niezawodność (zgodność z oczekiwaniem odbiorcy),
- elastyczność (dostosowanie się do zmieniających się warunków),
- ekonomiczność (możliwie najmniejszy koszt działania).

Zarządzanie przedsiębiorstwem (eksploatacją) odbywa się na płaszczyźnie instytucjonalnej (ludzie na stanowiskach mogący podejmować decyzje strategiczne) i funkcjonalnej (kierowanie bieżącymi procesami w trakcie realizacji działań) [298]. Jest

określane jako kompleksowa działalność spełniająca funkcje: planowania, organizacji i kontroli oraz funkcje rzeczowe (zakup, produkcja, sprzedaż). W eksploatacji obiektów technicznych funkcje rzeczowe spełniane są poprzez pozyskiwanie obiektów i zapewnienie środków do realizacji funkcji (użytkowanie).

W nowym podejściu do zarządzania zaleca się także uwzględnienie zagrożeń mogących wywoływać straty (koszty zewnętrzne), a przez to obniżyć efektywność działania. Integracja zarządzania eksploatacją i ryzykiem powinna być zorientowana na osiągnięcie wysokiej gotowości i wykorzystania systemu na akceptowalnym poziomie ryzyka [320]. Funkcja celu w proaktywnym zarządzaniu ma postać:

$$f_z = (\max(k_g, k_w), \min(RYZ)).$$

Podane rozważania dotyczące zarządzania muszą opierać się na informacji pochodzącej z bieżącej obserwacji systemu. Informacja ta trafia zazwyczaj do trzech głównych grup odbiorców [2], przy czym każda z grup oczekuje innego profilu danych na swoje potrzeby:

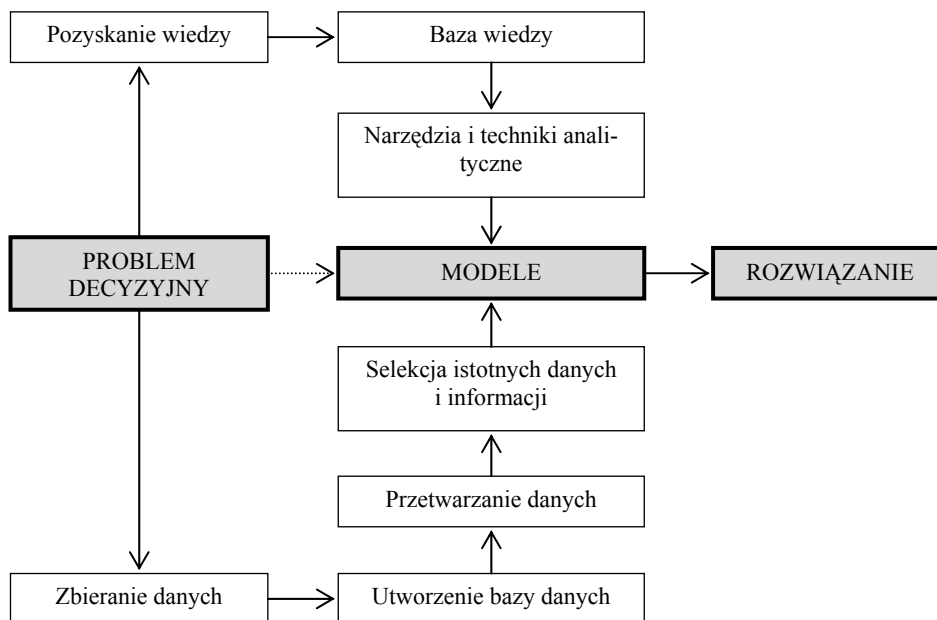
- analitycy niezawodności i bezpieczeństwa prognozujący niezawodność złożonych systemów technicznych (dane o gotowości i nieuszkodzalności, intensywność uszkodzeń),
- projektanci analizujący i optymalizujący elementy systemów technicznych (dane o postaciach i przyczynach uszkodzeń, słabe ogniwa),
- inżynierowie użytkowania i obsługi zarządzający bieżącą eksploatacją (dane o gotowości i naprawialności, uszkadzalność).

Wykorzystanie wyników badań będzie także miało różne horyzonty czasowe w zależności od poziomu zarządzania. Bieżąca, krótko okresowa eksploatacja, tzw. operacyjne wymaga zasilania w szczegółowe informacje na poziomie obiektów i ich komponentów w celu podejmowania decyzji operacyjnych związanych z bieżącym kierowaniem eksploatacją. Zarządzanie na poziomie średnio okresowym wiąże się z rocznym planowaniem, sprawozdawczością i wyznaczaniem trendów w bieżącej eksploatacji. Strategiczne zarządzanie długo okresowe wymaga wartości uśrednionych, rozkładów statystycznych wybranych zmiennych i charakterystyk trwałościowych do planowania wielkości parku maszynowego.

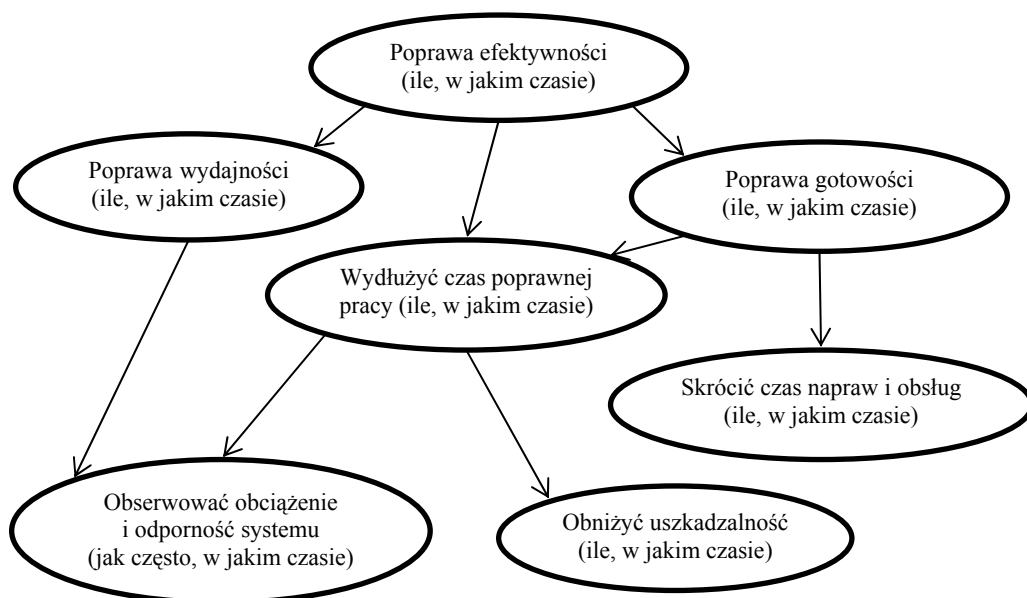
Osiąganie celów w procesie zarządzania eksploatacją wymaga sformułowania problemów i kryteriów oceny, podania założeń i zbudowania modelu oraz wyznaczenie oceny na drodze analitycznej, numerycznej, symulacyjnej czy empirycznej. Schemat takiego podejścia podany jest na rys. 6.11 [221].

Tworzenie modeli problemów decyzyjnych opiera się na wiedzy i danych niezbędnych do weryfikacji modeli i ich wykorzystaniu predykcyjnym [231].

Określenie pożądanego modelu funkcjonowania i sprecyzowanie nadrzędnej strategii działania pozwala na wyznaczenie cząstkowych celów zapewniających osiągnięcie założonych kryteriów [122]. Przykład drzewa przyczyn dla poprawy efektywności działania systemu pokazano na rys. 6.12. Ważnym warunkiem działania jest tu określenie stopnia poprawy (wartość docelowa miar oceny) oraz okres, w jakim zamierza się osiągnąć poprawę.



Rys. 6.11. Schemat wykorzystania wiedzy i informacji w procesie zarządzania



Rys. 6.12. Drzewo działań dla poprawy efektywności systemu poprzez sterowanie jego niezawodnością

Tabela 6.5. Analiza zagrożeń w kolejowym transporcie pasażerskim metodą FMECA (arkusz uporządkowany wg malejącej wartości wskaźnika RPN)

Lp.	Element systemu	Funkcja w systemie transportu.	Postać uszkodzenia zakłócenia działania	Przyczyna	Bieżąca kontrola	Wpływ na funkcję systemu	Szacowana częstość <i>P</i>	Szacowana wielkość straty <i>S</i>	Szacowana możliwość wykrycia <i>D</i>	RPN	Działania korygujące
7	Przejazdy kolejowo-drogowe kat. D	Sygnalizacja o zamknięciu przejazdu	Brak sygnalizacji	Uszkodzenie techniczne		Możliwe zderzenie z pojazdem	4	10	5	200	System diagnostyczny, monitoring
3	System sterowania	Zapewnienie bezpieczeństwa na szlaku	Brak sygnału sterującego	Uszkodzenie techniczne, błąd człowieka	Dyżurny ruchu	Brak ruchu na szlaku	3	8	7	168	System diagnostyczny, monitoring
5	Przejazdy kolejowo-drogowe kat. A,B,C	Rozdzielenie ruchu	Brak opuszczenia zapór	Uszkodzenie techniczne, błąd człowieka	Dróżnik, sygnalizacja	Możliwe zderzenie z pojazdem	3	10	5	150	System diagnostyczny
8	Maszyniści	Prowadzenie pojazdu szynowego	Brak uwagi, nie przestrzeganie przepisów i sygnałów	Brak szkolenia, kultury techn.		Możliwe zderzenie z pojazdem drogowym, kolizja z innym pojazdem szynowym	2	8	5	80	Szkolenie
13	Osoby postronne	Otoczenie	Celowe zakłócenie ruchu, samobójstwo	Brak kultury, depresja	Maszynista	Brak ruchu na szlaku	2	10	3	60	Monitoring
12	Pasażerowie na peronie	Przedmiot transportu	Agresywne zachowanie, niszczenie mienia	Brak kultury	Zawiadowca	Uszkodzenie ciała, zakłócenie porządku, straty materialne	3	4	4	48	Akcje promocyjne, podnoszenie kultury, zapewnienie dobrych warunków oczekiwania, monitoring

2	Torowisko	Zapewnienie ciągłości ruchu	Pęknięcie, podmycie, naprawa	Starzenie, przyczyny naturalne		Brak ruchu na szlaku	1	8	5	40	Komunikacja zastępcza
10	Dyżurny ruchu	Nadzór nad ruchem pojazdów	Brak uwagi, obojętność	Brak szkolenia, kultury techn.		Zakłócenie ruchu, katastrofa	2	10	2	40	Szkolenie
1	Pojazd szynowy	Transportowanie pasażerów	Niezdadność ruchowa	Uszkodzenie, obsługa planowa	Dyspozytor trakcji	Brak kursu	2	7	5	35	Podniesienie wsk. Gotowości taboru jako grupy pojazdów
9	Konduktorzy	Nadzór nad ruchem pasażerów przed odjazdem poj.	Brak uwagi, obojętność	Brak szkolenia, kultury techn.		Uszkodzenie ciała, zakłócenie porządku, straty materialne	2	4	3	24	Szkolenie
11	Pasażerowie w pojeździe	Przedmiot transportu	Agresywne zachowanie, niszczenie mienia	Brak kultury	Konduktor	Uszkodzenie ciała, zakłócenie porządku, straty materialne	2	4	2	16	Akcje promocyjne, podnoszenie kultury, monitoring
6	Przejazdy kolejowo-drogowe kat. A,b,c	Rozdzielenie ruchu	Brak podniesienia zapór	Uszkodzenie techniczne, błąd człowieka	Dróżnik, sygnalizacja	Zator drogowy	1	3	5	15	System diagnostyczny
4	Perony	Dojście do pojazdu	Utrudnione wejście/wyjście z pociągu	Uszkodzenie techniczne	Zawiadowca	Obniżenie płynności potoku pasażerów	2	3	2	12	–

Tabela 6.6. Analiza procesu kolejowego transportu pasażerskiego metodą HAZOP

Lp.	Faza procesu	Parametr	Zakłócenie	Skutek	Możliwe zapobieganie
1	Pojazd stoi przy peronie, wymiana pasażerów	Czas postoju	Za krótki postój	Niezabranie wszystkich pasażerów	Usprawnić przepływ informacji, Poprawić organizację ruchu
2	Pojazd stoi przy peronie, wymiana pasażerów	Czas postoju	Za długi postój	Opóźnienie ruchu	Analiza rozkładu jazdy
3	Odjazd pojazdu z peronu	Zamknięcie drzwi	Niepełne zamknięcie	Możliwość wypadnięcia pasażera	Wprowadzić czujniki zamknięcia, monitoring pojazdu
4	Odjazd pojazdu z peronu	Zamknięcie drzwi	Niepełne zamknięcie	Przycięcie pasażera/bagazu	Wprowadzić czujniki zamknięcia, monitoring pojazdu
5	Odjazd pojazdu z peronu	Odległość pasażera od krawędzi peronu	Zbyt mała	Możliwość potrącenia/ wpadnięcia między peron i pojazd	Ostrzeżenie i akcje informacyjne dla pasażerów
6	Przyspieszanie	Przyspieszenie	Zbyt mała	Opóźnienie ruchu	Szkolenie motorniczych
7	Przyspieszanie	Przyspieszenie	Zbyt duża	Utrata równowagi przez stojących pasażerów	Szkolenie motorniczych
8	Jazda po torze między posterunkami	Prędkość	Zbyt mała	Opóźnienie ruchu	Szkolenie motorniczych
9	Jazda po torze między posterunkami	Prędkość	Zbyt duża	Przekroczenie zasad bezpieczeństwa	Szkolenie motorniczych
10	Jazda przez przejazd kolejowodrogowy kat. A,b,c	Prędkość	Zbyt duża	Przekroczenie zasad bezpieczeństwa	Szkolenie motorniczych
11	Jazda przez przejazd kolejowodrogowy (niestrzeżony) kat. D	Prędkość	Zbyt duża	Przekroczenie zasad bezpieczeństwa	Szkolenie motorniczych
12	Hamowanie pojazdu	Opóźnienie	Zbyt mała	Opóźnienie ruchu	Szkolenie motorniczych
13	Hamowanie pojazdu	Opóźnienie	Zbyt duża	Utrata równowagi przez stojących pasażerów	Szkolenie motorniczych
14	Dojazd do peronu	Odległość pasażera od krawędzi peronu	Zbyt mała	Możliwość potrącenia/ wpadnięcia między peron i pojazd	Ostrzeżenie i akcje informacyjne dla pasażerów



Nieuszkodzalność, gotowość, obsługiwalność i bezpieczeństwo ujmowane są obecnie pod wspólnym akronimem RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability, Safety*). Techniki RAMS konsolidują metody matematyczne w celu ustanawiania polityki i strategii efektywnego utrzymania obiektów technicznych w eksploatacji [298]. Celem techniki RAMS stają się:

- zapewnienie właściwych warunków dla utrzymania technicznego obiektów,
- racjonalizowanie wymagań dotyczących nieuszkodzalności, gotowości, obsługiwalności i bezpieczeństwa w stosunku do ponoszonych nakładów,
- określenie priorytetów w osiąganiu zamierzonej jakości i bezpieczeństwa,
- określenie strategii obsługowych dla uzyskania najlepszych sposobów obsługiwan-
- zapewnić równowagę między kosztami i zyskami z działania obiektu.

Natomiast bezpośrednimi efektami wprowadzenia techniki RAMS jest: poznanie procesów eksploatacyjnych, funkcjonalności obiektów, postaci, przyczyn i skutków uszkodzeń oraz krytyczności uszkodzeń powodujących zagrożenie bezpieczeństwa, niezdatność i łańcuchy zdarzeń niepożądanych (efekt domina).

### 6.3.2. System badań w zarządzaniu ryzykiem

Zarządzanie ryzykiem opiera się na trzech zasadniczych etapach wspomaganych przez liczne metody heurystyczne [51, 125, 272]:

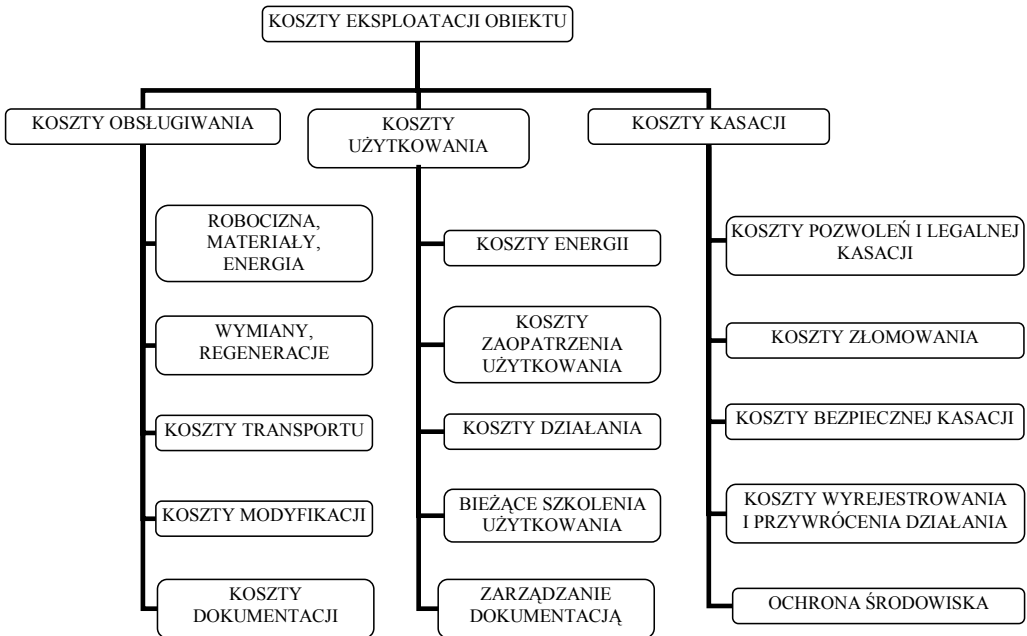
- identyfikację zagrożeń,
- oszacowanie i ocenę ryzyka,
- sterowanie ryzykiem obejmujące:
  - zapobieganie zdarzeniom niepożądanym,
  - ochronę przed zdarzeniami niepożądanymi,
  - przekazywanie ryzyka – ubezpieczenia,
  - zmniejszenie ryzyka.

Kompleksowe podejście do tego zagadnienia prezentują uznane i zalecane metody FMECA i HAZOP obejmujące elementy identyfikacji zagrożeń oraz oceny ryzyka i działań poprawiających stan bezpieczeństwa [4, 70, 144, 233, 310]. W tabelach 6.5 i 6.6 pokazano przykłady analizy kolejowego procesu transportowego wykonane metodami FMECA i HAZOP. W tabeli 6.5 postaci uszkodzeń zidentyfikowane na podstawie analizy obiektowej uszeregowano według malejącej wartości wskaźnika rangującego RPN, wskazując tym samym najważniejsze zagrożenia i kolejność rozwiązywania problemów zgodnie z możliwościami w zakresie wprowadzania środków bezpieczeństwa oraz zasadą BATNEC i ALARP [6, 11, 113, 36, 137].

### 6.3.3. System badań w zarządzaniu kosztami eksploatacji

Działania ekonomiczne są definicyjnym zakresem działań człowieka w eksploatacji [190, 257]. Na koszty eksploatacji systemu technicznego składają się koszty początkowe (inwestycyjne – zakup i instalacja) oraz bieżące (użytkowania, obsługiwanie i likwidacji). Na rysunku 6.13 pokazano grupy kosztów składające się na koszty bieżące eksploatacji. Zarządzanie kosztami powinno uwzględniać zgodnie z ideą [20, 21,

169, 230] wszystkie grupy kosztów ponoszone przez właściciela, począwszy od kosztu zakupu aż po likwidację obiektu. Jest to złożone zagadnienie wymagające uwzględnienia wielu założeń i uproszczeń modelowych, a także zasilania wiedzą i wiarygodnymi danymi.



Rys. 6.13. Klasyfikacja kosztów eksploatacyjnych uwzględniana w badaniach

Zagadnienia doboru najwłaściwszych obiektów do realizacji zadań eksploatacyjnych jest przykładem wykorzystania wiedzy z zakresu niezawodności i ekonomii. W przykładowym modelu kosztów ograniczono analizę kosztów do związku kosztu elementu z jego niezawodnością i zależności kosztu eksploatacji złożonego systemu od niezawodności komponentów [190]. W modelu kosztów przyjęto, że:

- koszt  $i$ -tego elementu jest liniowo zależny od jego niezawodności:

$$K_i(R_i) = f(R_i) = a + bR_i,$$

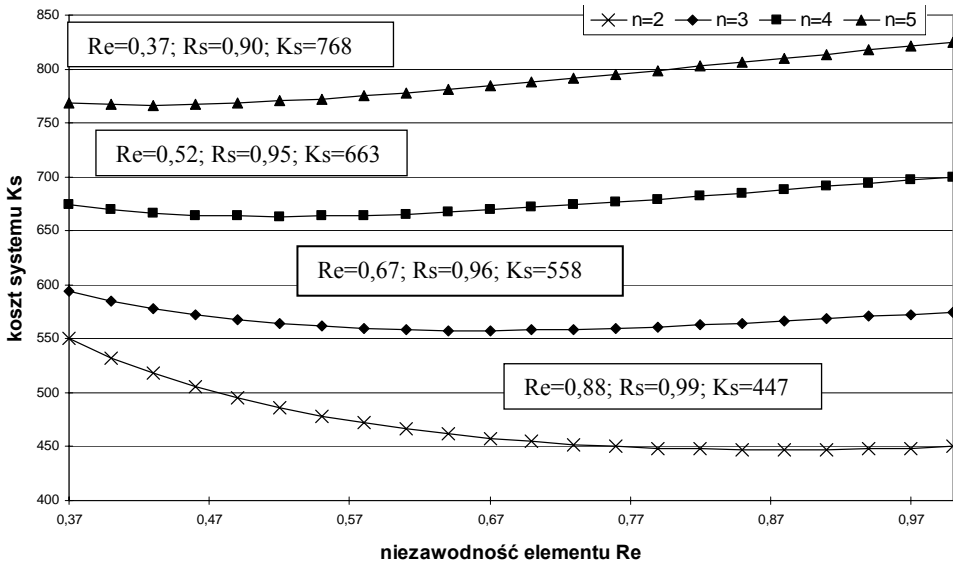
- koszt systemu, równoważny cenie zakupu systemu, zależy od liczby elementów  $n$ :

$$K_s(n) = \sum_i^n K_i,$$

- niezawodność złożonego systemu zależy od struktury systemu  $\varphi(x_i)$ , niezawodności elementów  $R_i$  i ich liczby  $n$ :  $R_s(\varphi(x_i), R_i, n) = \varphi(R_1, R_2, \dots, R_n)$ .
- koszt pozyskania i eksploatacji systemu jest sumą podanych kosztów:

$$K_s(n, R_i) = \sum_i^n (a + bR_i) + \frac{c}{R_s(\varphi(x_i), R_i, n)}, \text{ gdzie: } a, b, c - \text{ stałe.}$$

Analityczne rozwiązanie problemu doboru niezawodności elementów do budowy systemu o najniższym koszcie eksploatacji wymaga wyznaczenia rozwiązania równania dla pochodnej kosztu systemu względem niezawodności elementów. Problem ten można też rozwiązać numerycznie, przyjmując jednakową niezawodność elementów  $R_i = R_e$  oraz dobierając stałe w racjonalnym przedziale zmienności. Na rysunku 6.14 pokazano przebieg funkcji całkowitego kosztu systemu równoległego zbudowanego z od dwóch do pięciu elementów o różnej niezawodności. Na rysunku podano parametry niezawodności elementów i systemu dla najmniejszego kosztu systemu.



Rys. 6.14. Przykładowe realizacje funkcji kosztu dla równoległej struktury złożonej od 2 do 5 elementów ( $R_e$  – niezawodność elementu,  $R_s$  – niezawodność systemu,  $K_s$  – koszt systemu)

Wyniki obliczeń wskazują na możliwości racjonalnego doboru elementów o różnej jakości i konfigurowaniu ich w system o wymaganej niezawodności. Dla przyjętych założeń obliczeniowych system dwuelementowy o elementach, o wysokiej niezawodności ( $R_e = 0,88$ ) okazuje się najtańszy w eksploatacji, a także ma większą niezawodność w porównaniu z systemem o pięciu elementach, ale o niskiej jakości (tanich).



## 7. Weryfikacja metodyki BEOM w badaniach eksploatacyjnych autobusów szynowych

### 7.1. Założenia budowy badań eksploatacyjnych

Celem badań eksploatacyjnych autobusów szynowych jest gromadzenie danych do wspomagania zarządzaniem eksploatacją i bezpieczeństwem pojazdów w systemie pasażerskiego transportu regionalnego. Tabor realizujący przewozy tworzą autobusy szynowe dostarczane sukcesywnie do nowo tworzonego systemu transportowego. Liczność pojazdów zmienia się od kilku do ponad 20 egzemplarzy pojazdów pochodzących od tego samego producenta, mających w miarę jednorodne cechy produkcyjne. Kolejne egzemplarze różnią się między sobą fazą produkcyjną oraz szczegółami konstrukcyjnymi, jednak z funkcjonalnych względów można je uznać za jednakowe. Pojazdy eksploatowane są przez wydzieloną spółkę na obszarze jednego regionu Polski.

Uzgodniono w założeniach, że wsparcie zarządzania będzie miało postać informacyjnej aplikacji, z dostępem sieciowym dla wielu użytkowników. Baza danych zostanie posadowiona na serwerze i będzie zarządzana przez administratora systemu.

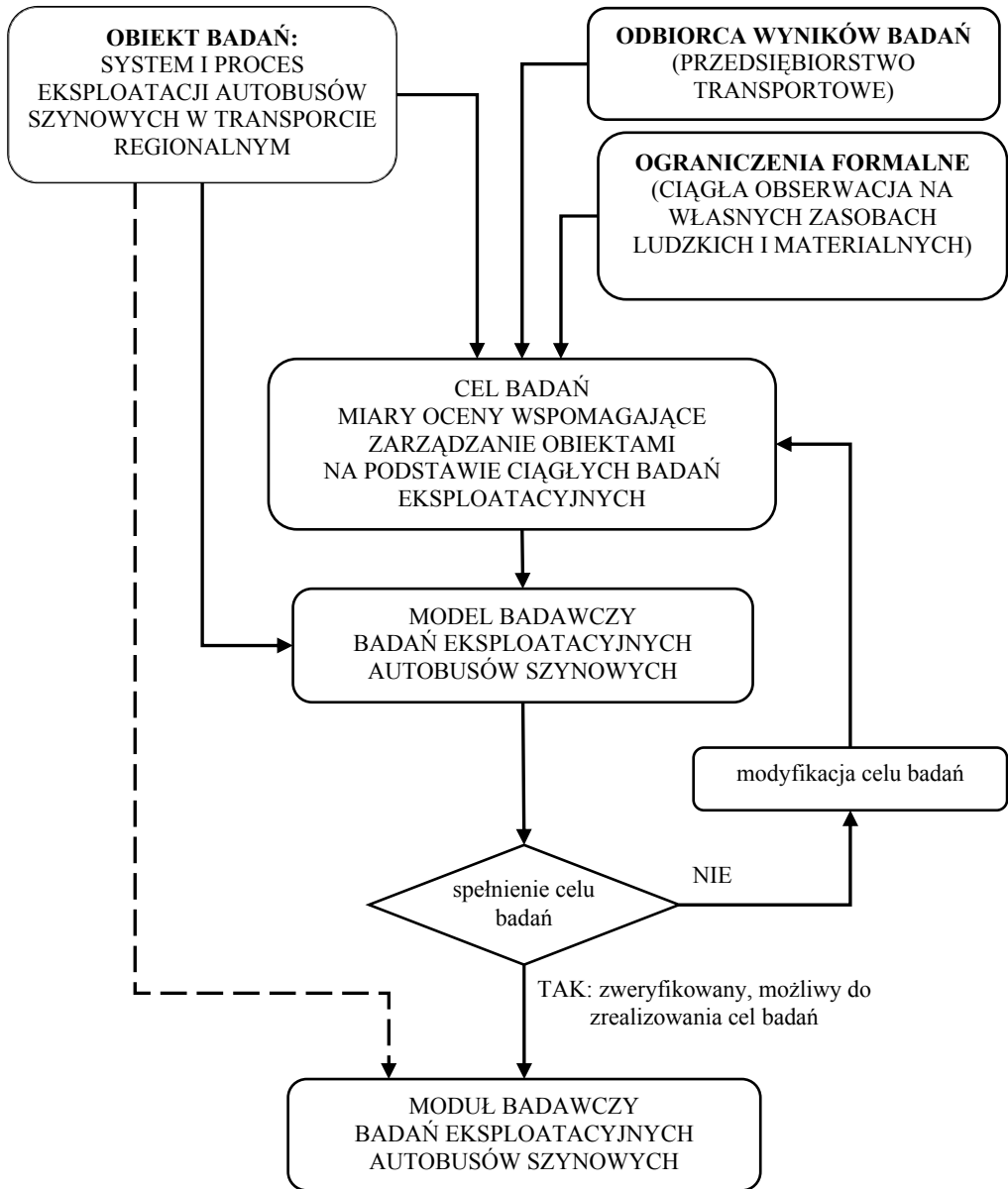
Metodyka badań eksploatacyjnych zakłada dwa zasadnicze etapy prac poprzedzone analizą sytuacji eksploatacyjnej:

- opracowanie modelu badawczego,
- opracowanie wykonawczego modułu badawczego.

Adaptacja schematu metodyki (rys. 3.2) do badań autobusów szynowych została pokazana na rysunku 7.1. Metodyka badań eksploatacyjnych autobusów szynowych jest  $n$ -tką pięcioelementową:

$$BEAS = \langle CBES, SEAS, MODAS, MBEAS, RBEOM \rangle \quad (7.1)$$

gdzie: *BEAS* – badanie eksploatacyjne autobusów szynowych,  
*CBES* – cel badań eksploatacyjnych autobusów szynowych,  
*SEAS* – sytuacja eksploatacyjna autobusów szynowych,  
*MODAS* – model badawczy autobusów szynowych,  
*MBEAS* – moduł badawczy autobusów szynowych,  
*RBEOM* – relacje między elementami *BEAS*.



Rys. 7.1. Algorytm budowy badań eksploatacyjnych autobusów szynowych

## 7.2. Cel badań autobusów szynowych

Nadrzędnym celem w stosunku do opisywanych badań jest wspomaganie zarządzania eksploatacją i bezpieczeństwem systemu transportowego opartego na informacjach pozyskiwanych z bieżącej eksploatacji. Przyjęto, że opracowana baza danych będzie

gromadziła dane w długim okresie eksploatacji, co pozwoli na wyznaczanie coraz bardziej wiarygodnych i precyzyjnych statystycznych informacji. Zakres możliwych do wyznaczenia miar oceny będzie powiększał się i z wielkości liczbowych możliwe będzie uzyskiwanie zależności funkcyjnych i poszukiwanie zależności między zmiennymi losowymi. Konieczny zbiór miar oceny eksploatacji autobusu szynowego określono stosownie do wyróżnionych w metodyce obszarów działania *OBAS*.

Najważniejszymi, pożądanymi miarami oceny w pierwszej fazie badań są:

- miary oceny obiektu: eksploatacyjne (wskaźnik gotowości technicznej, wskaźnik wykorzystania, średni czas między uszkodzeniami, średni czas naprawy, średni dzienny przebieg pojazdu, średni dzienny czas pracy, rodzaj i czas do najbliższej obsługi profilaktycznej,
- miary oceny infrastruktury: średnia prędkość techniczna i eksploatacyjna na odcinkach szlaku, średni czas oczekiwania na szlaku,
- miary oceny człowieka: średni dzienny czas pracy, liczba zmian pracy w tygodniu, średnia absencja w miesiącu,
- miary oceny otoczenia: średnie wartości parametrów pogodowych (temperatura, ilość opadów, zamglenia),

### 7.3. Analiza sytuacji eksploatacyjnej autobusów szynowych

Metoda *SEAS* (7.1) charakteryzuje analityczne podejście do sytuacji eksploatacyjnej autobusów szynowych, w wyniku której identyfikuje się pojazd, jego miejsce w systemie realizującym przewozy oraz zachodzące zarówno procesy sterowane, jak i niesterowane. System eksploatacji tworzą zgodnie z koncepcją obszarów eksploatacji:

$$OBEAS = \times \{OEAS_i\}; \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7.2)$$

gdzie: *OBEAS* – obszar badań eksploatacyjnych,

*OEAS*<sub>1</sub> → *OT* – obiekty techniczne, przy czym: *OT* = {*AS*, *ITAS*} ,

*OEAS*<sub>2</sub> → *HE* – człowiek w eksploatacji,

*OEAS*<sub>3</sub> → *ON* – otoczenie naturalne eksploatacji autobusów szynowych,

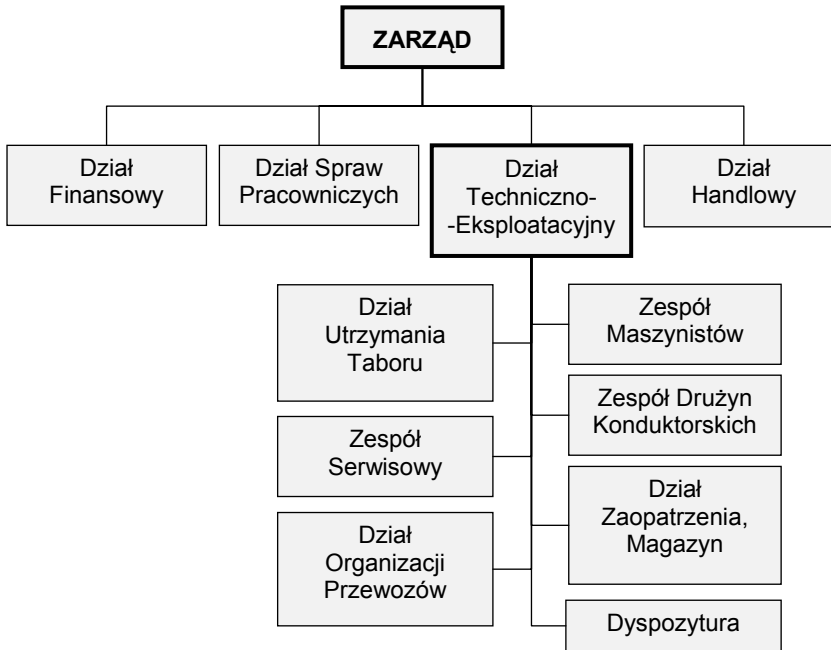
*OEAS*<sub>4</sub> → *PEAS* – proces eksploatacji autobusów szynowych,

*AS* – autobus szynowy będący przedmiotem badania,

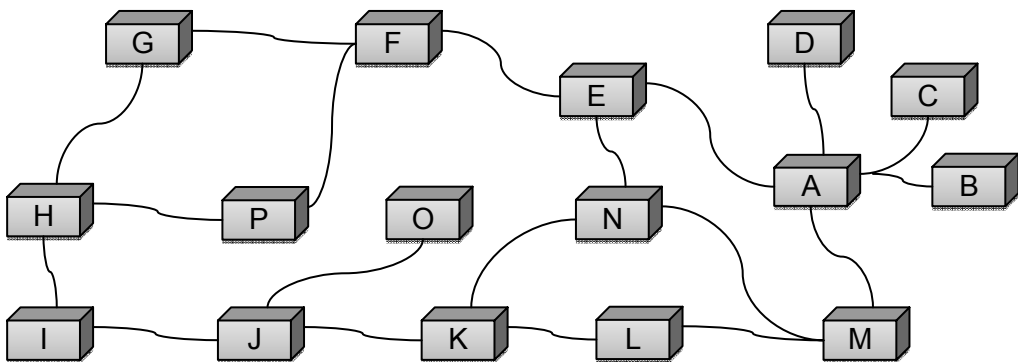
*ITAS* – obiekty infrastruktury technicznej autobusów.

Na rysunku 7.2 pokazano strukturę organizacyjną przedsiębiorstwa, w której zasadniczy wpływ na kształt bazy danych ma Dział Techniczno-Exploatacyjny dostarczający największej ilości informacji operacyjnych. Przykład analizy zawartości informacyjnej w dokumentacji przedsiębiorstwa przedstawiono w kolejnym podrozdziale.

Na rysunku 7.3 przedstawiono schemat połączeń kolejowych w rejonie działania autobusów. Stacje węzłowe A–P oraz szlak kolejowy łącznie z urządzeniami sterującymi, rogatkami i innymi urządzeniami inżynierskimi tworzą infrastrukturę techniczną eksploatacji autobusów [34].



Rys. 7.2. Schemat organizacyjny przedsiębiorstwa eksploatującego autobusy szynowe



Rys. 7.3. Schemat połączeń kolejowych w usłudze transportowej autobusów szynowych. Bloki A–P oznaczają stacje węzłowe

Analiza obszarów eksploatacji pozwala na specyfikację i klasyfikację wszystkich obiektów istotnie wpływających na przebieg eksploatacji autobusów. Klasyfikację tych obiektów pokazano w tab. 7.1.

Na podstawie wyspecyfikowanego zbioru obiektów określono wstępnie zbiory atrybutów przypisywanych do tych obiektów. Szczegółowe zestawienie atrybutów odpowiadających obiektom obszarów eksploatacji badań przedstawiono w tab. 7.2.



Tabela 7.1. Klasyfikacja encji uwzględnianych w eksploatacji autobusów szynowych w ujęciu obiektowym

Kryterium klasyfikacji		Obiekty wyróżnione w eksploatacji
Obiekty systemowe	Człowiek	Maszyniści, konduktorzy, obsługa stacyjna, mechanicy pasażerowie, osoba postronna związaną z eksploatacją poprzez jej relację z otoczeniem
	Obiekt techniczny	AUTOBUS SZYNOWY, stacje kolejowe, szlak kolejowy, hala obsługowa, stanowisko tankowania, drogi kołowe przecinające szlaki, mosty
	Otoczenie	Lasy, pola, rzeki i inne wody, dzika zwierzyna, parametry pogodowe regionu

Tabela 7.2. Zestawienie przykładowych atrybutów obszarów badań w modelu MSEOM

Obszar badań	Element obszaru badań	Grupy najważniejszych atrybutów
$OE_1 \rightarrow OT$ : obiekty techniczne	Autobus szynowy	Dane identyfikacyjne, parametry funkcjonalne, wymiary, masa, rodzaj napędu, zużycie paliwa, stan techniczny, wymagania użytkowe i obsługowe, wartości graniczne atrybutów
	$ITU$ – infrastruktura techniczna użytkowania	Liczba stacji i przystanków, długości i wysokości peronów, długości odcinków szlaku, sygnalizacja i sterowanie na odcinkach, stan techniczny torów i podtorza, kategorie przejazdów, ich liczba i stan, mosty i wiadukty, wartości graniczne atrybutów
	$ITO$ – infrastruktura techniczna obsługiwaną	Rodzaj stanowiska, wymiary stanowisk, liczba stanowisk obsługowych, wyposażenie w urządzenia diagnostyczne, pomocnicze i narzędzia, wielkość powierzchni magazynowej, stan zapasów materiałów i części wymiennych
	$ITE$ – infrastruktura techniczna otoczenia	Rodzaj przegrody między torowiskiem a otoczeniem, liczba przejazdów/przejeżdż kolizyjnych i bezkolizyjnych
$OE_2 \rightarrow HE$ : ludzie w eksploatacji	$H_1$ – eksploataotorzy	Płeć, stanowisko, wykształcenie, kwalifikacje, wiek, uprawnienia, okresy ważności uprawnień, staż pracy
	$H_2$ – ludzie jako przedmioty działania	Płeć, wiek, masa, wzrost, ilość i wielkość bagażu podróżnego, wymagania i preferencje odnośnie jakości usługi, relacja z obiektem badań, częstotliwość podróżowania pojazdem
	$H_3$ – osoby postronne	Płeć, wiek, kultura osobista, relacja/odległość od obiektu badań
$OE_3 \rightarrow ON$ : otoczenie naturalne eksploatacji	$N_1$ – gleba, podłoże	Rodzaj i stan nawierzchni, pochylenie, krętość drogi, stan zagospodarowania, wartości graniczne atrybutów
	$N_2$ – atmosfera, powietrze	Temperatura, ciśnienie, wilgotność, zanieczyszczenia, wartości graniczne atrybutów
	$N_3$ – woda	Temperatura, prędkość przepływu, zanieczyszczenia, odległość od toru ruchu obiektu badań, wartości graniczne atrybutów
	$N_4$ – fauna	Rodzaj zwierzęcia, siedliska, ilość w zasięgu oddziaływania obiektu badań, ruchliwość, zwyczaje, czynniki szkodliwe

Cd. tabeli 7.2

Obszar badań	Element obszaru badań	Grupy najważniejszych atrybutów
	$N_5$ – flora	Rodzaj rośliny, ilość w zasięgu oddziaływania obiektu badań, czynniki szkodliwe
$OE_4 \rightarrow PEM$ : proces eksploatacji	$PEP$ – poprawny proces eksploatacji	Stany użytkowania, nazwa zdarzenia (zmiana stanu), czas przebywania w wyróżnionych stanach użytkowania, parametry stanów, rodzaj zdarzenia powodującego przejście do procesu zakłóconego
	$PEZ$ – zakłócony proces eksploatacji	Stany obsługiwanego, nazwa zdarzenia (zmiana stanu), czas przebywania w wyróżnionych stanach obsługiwanego

## 7.4. Analiza dokumentacji eksploatacyjnej

Przewoźnik kolejowy ma obowiązek prowadzenia dokumentacji eksploatacyjnej zgodnie z § 9 i § 15 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z 12.10.2005 (z późniejszymi zmianami) w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych. Należy do niej:

- dokumentacja utrzymania pojazdów kolejowych (obsługiwanie okresowe pojazdów), system i plan utrzymania, zarządzanie dokumentacją systemu utrzymania,
- rejestr obsłóg,
- wykaz uszkodzeń pojazdów,
- rejestr przebiegu eksploatacji pojazdów kolejowych i podzespołów,
- system gromadzenia i przechowywania dokumentacji.

Dział Utrzymania Taboru podlegający Działowi Techniczno-Exploatacyjnemu prowadzi i nadzoruje dokumenty eksploatacyjne:

- książka pokładowa pojazdu z napędem (miejsce przechowywania: autobus szynowy),
- książka napraw bieżących pojazdu trakcyjnego (miejsce przechowywania: autobus szynowy),
- książka przeglądów okresowych (miejsce przechowywania: Dział Utrzymania Taboru),
- książka pojazdu trakcyjnego (miejsce przechowywania: Dział Utrzymania Taboru).

**Książka pokładowa pojazdu z napędem.** Zapisy w książce może wykonać maszynista, magazynier i obsługa techniczna. Książka zawiera: datę, godzinę i miejsce rozpoczęcia i zakończenia pracy, informacje o sprawności układów pojazdu (czuwak aktywny, samoczynne hamowanie pociągu, radiostop) oraz ogólnym stanie technicznym pojazdu. Po wykonaniu jazdy zapisuje się w niej: ilość paliwa w zbiorniku według wskazań komputera pokładowego, przebieg oraz czas pracy silnika i przekładni. Bieżące zapisy o zaistniałych zdarzeniach mogą zawierać opisy uszkodzeń. Podczas tankowania paliwa wpisuje się datę, przebieg pojazdu podczas tankowania, ilość zatankowanego paliwa. Jeśli przebieg pojazdu wskazuje na konieczność wykonania obsługi

profilaktycznej, odstawia się pojazd na stanowisko obsługowe. W książce pojawia się zapis o rodzaju wykonanej obsługi, użytych materiałach eksploatacyjnych i częściach wymiennych, przebiegu pojazdu i czasu pracy silnika i przekładni. Dopuszczenie pojazdu do ruchu kończy obsługę i następuje przekazanie pojazdu maszyniście.

**Książka napraw bieżących pojazdu trakcyjnego.** Zapisy maszynistów dotyczą informacji o uszkodzeniach powstałych podczas jazdy. W trakcie obsługi okresowej personel obsługowy podejmuje decyzję o działaniach i zapisuje informacje w książce o ewentualnej naprawie (data, godzina ukończenia naprawy).

**Książka przeglądów okresowych pojazdu trakcyjnego.** W książce przeglądów okresowych archiwizuje się informacje o rodzaju, dacie i godzinie rozpoczęcia oraz zakończenia przeglądu, wymienionych materiałach eksploatacyjnych i częściach wymiennych.

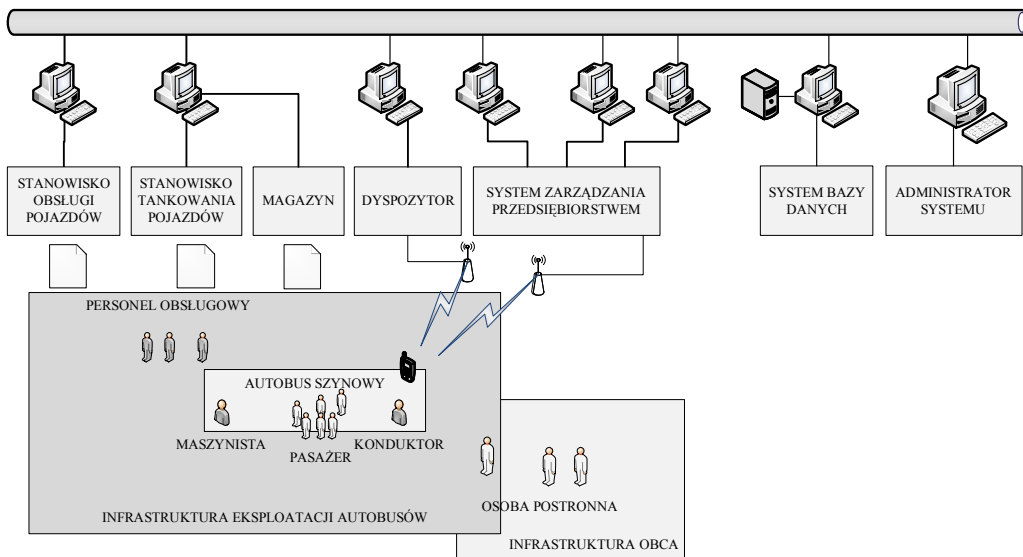
**Książka pojazdu trakcyjnego.** Książka służy do zbiorczego gromadzenia informacji o okresowym przebiegu użytkowania (miesięczny przebieg w km i motogodzinach pracy silnika i przekładni) i obsługiwania (daty wycofania z użytkowania i oddania do ruchu, przyczyny wycofania pojazdu z ruchu, liczby dni pracy, dni wolnych, dni, w których pojazd przebywał w obsłudze technicznej). W książce pojazdu trakcyjnego zapisuje się rodzaj wykonanych czynności obsługowych podczas PU3, PU4 i PU5, modernizacji lub napraw awaryjnych pojazdu, daty ich rozpoczęcia i zakończenia oraz przebieg (km, motogodzina pracy silnika).

## 7.5. Struktura bazy danych systemu wspomaganie zarządzaniem eksploatacją autobusów szynowych

System badań eksploatacyjnych autobusów szynowych zawiera dwie główne warstwy tworzące warstwę eksploatacyjną oraz warstwę informatyczną. Użytkowanie systemu informatycznego będzie odbywało się przez tych samych pracowników, którzy tworzą kadre eksploatacyjną. Zgodnie z przeprowadzoną analizą i klasyfikacją obiektów systemu eksploatacji wyróżnia się następujące elementy systemu wspomaganie eksploatacji autobusów szynowych (SWAS):

- warstwa eksploatacyjna:
  - użytkownicy pojazdów (maszyniści, konduktorzy),
  - obsługownicy pojazdów (mechanicy, tankowanie),
  - autobusy szynowe,
  - infrastruktura użytkowa i obsługowa,
  - pasażerowie i osoby postronne,
  - infrastruktura techniczna w otoczeniu eksploatacji,
- warstwa informatyczna:
  - sieć internetowa,
  - serwer aplikacji i bazy danych,
  - terminal administratora,
  - terminale użytkowników.

Poglądowy schemat relacji między wyróżnionymi elementami SWAS przedstawiono na rysunku 7.4. Pracownicy przedsiębiorstwa mają różne obowiązki i uprawnienia związane z korzystaniem z systemu.

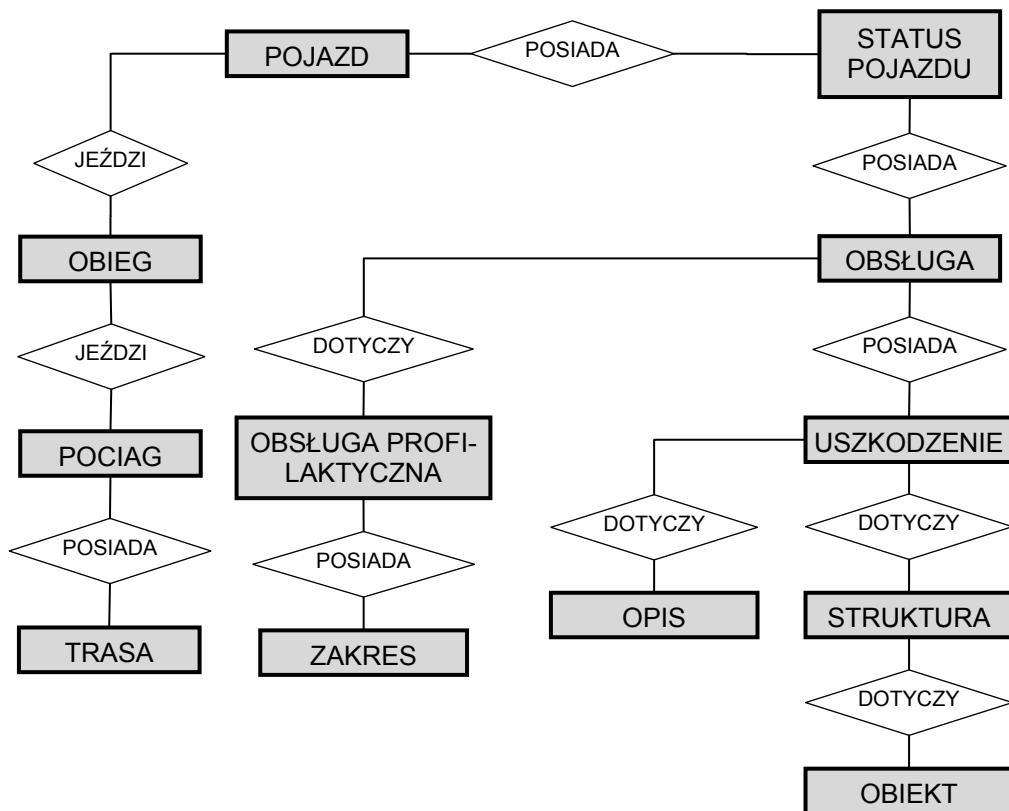


Rys. 7.4. Schemat zidentyfikowanych obszarów eksploatacji na tle systemu informatycznego badań

Na potrzeby tworzonego systemu opracowana została struktura bazy danych [70]. Przyjęto najczęściej stosowany model relacyjny. W pierwszym etapie prac stworzono statyczny opis systemu. Zidentyfikowano reprezentacje obiektów rzeczywistych oraz niematerialnych, czynności, pojęcia oraz atrybuty opisujące modelowany obszar systemu eksploatacji, na podstawie których możliwe było zdefiniowanie poszczególnych encji dla bazy danych. Pojęcia te zebrane zostały w formie diagramu związków encji (rys. 7.5).

Następnie przystąpiono do zaprojektowania szczegółowej struktury bazy danych (tabel, relacji, indeksów, kluczy), obejmującej pełen zakres informacji przewidzianych do gromadzenia w systemie. W trakcie prac wykorzystano narzędzie DBDesigner 4, umożliwiające w dalszym etapie m.in. generowanie instrukcji kodu SQL tworzących strukturę danych dla opracowanego schematu tabel wraz z ich wzajemnymi relacjami [Bojda].

Diagram związków encji jest przekształcony w logiczny model bazy danych, który reprezentują tabele utworzone w grupach: POJAZDY, PRZEWOZY, SERWIS, UŻYTKOWNICY [34]. Przykłady wybranych tabel z poszczególnych grup (tab. 7.3–7.11) reprezentują schematy relacji o postaci:  $OBIEKT(A_1, A_2, \dots, A_m)$ . Przedstawione tabele stanowią reprezentację logicznego modelu bazy danych, a ich wybór wynika z zawartości informacji najbliższych obszarom badań eksploatacyjnych (pominięto tabele zawierające klucze relacji).



Rys. 7.5. Diagram związków encji Chena dla bazy danych autobusu szynowego

Tabela 7.3. Tabela *cars* z grupy tabel: *Pojazdy*, przechowująca informacje o pojazdach szynowych ujętych w systemie

Nazwa pola	Opis
<b>id</b>	Unikatowy identyfikator tabeli (klucz główny)
<b>car_series_id</b>	Nazwa serii pojazdu (klucz obcy z tabeli <i>car_series</i> )
number	Numer kolejny pojazdu w serii
number_new	Nowy numer pojazdu nadany zgodnie ze standardem europejskiego numeru pojazdu kolejowego (EVN)
<b>manufacturer_id</b>	Identyfikator producenta pojazdu kolejowego (klucz obcy z tabeli <i>companies</i> )
production_year	Rok produkcji pojazdu szynowego
acquisition_year	Rok włączenia pojazdu do eksploatacji u przewoźnika
<b>car_descriptive_status_id</b>	Aktualny status pojazdu szynowego (klucz obcy z tabeli <i>car_descriptive_statuses</i> )

Tabela 7.4. Tabela *car\_statuses* z grupy tabel: *Pojazdy*, przechowująca informacje o chwilowym stanie pojazdów szynowych

Nazwa pola	Opis
<b>id</b>	Unikatowy identyfikator tabeli (klucz główny)
<b>kilometrage</b>	Przebieg całkowity pojazdu szynowego w km
<b>engine_hours_a</b>	Liczba motogodzin silnika A w h
<b>transmission_gear_a</b>	Liczba motogodzin przekładni głównej A w h
<b>engine_hours_b</b>	Liczba motogodzin silnika B w h
<b>transmission_gear_b</b>	Liczba motogodzin przekładni głównej B w h
<b>status_time</b>	Data odczytu liczników
<b>comments</b>	Uwagi dotyczące aktualizacji statusu
<b>revision_id</b>	Identyfikator przeglądu (klucz obcy z tabeli <i>revisions</i> )
<b>user_id</b>	Identyfikator użytkownika rejestrującego aktualizację statusu (klucz obcy z tabeli <i>users</i> )
<b>created</b>	Data rejestracji aktualizacji statusu w systemie

Tabela 7.5. Tabela *routes* z grupy tabel: *Przewozy*, przechowująca informacje o odcinkowych trasach przejazdów

Nazwa pola	Opis
<b>id</b>	Unikatowy identyfikator tabeli (klucz główny)
<b>station_start_id</b>	Identyfikator stacji początkowej (klucz obcy z tabeli <i>stations</i> )
<b>station_target_id</b>	Identyfikator stacji docelowej (klucz obcy z tabeli <i>stations</i> )
<b>distance</b>	Odległość między stacjami w km

Tabela 7.6. Tabela *revisions* z grupy tabel: *Serwis*, archiwizująca obsługę

Nazwa pola	Opis
<b>id</b>	Unikatowy identyfikator tabeli (klucz główny)
<b>car_id</b>	Identyfikator pojazdu dla którego wykonana została obsługa (klucz obcy z tabeli <i>cars</i> )
<b>revision_type_id</b>	Identyfikator typu obsługi (klucz obcy z tabeli <i>revision_types</i> )
<b>date_start</b>	Godzina i data rozpoczęcia wykonania obsługi
<b>date_end</b>	Godzina i data zakończenia wykonania obsługi
<b>user_id</b>	Identyfikator użytkownika rejestrującego obsługę (klucz obcy z tabeli <i>users</i> )
<b>created</b>	Data rejestracji obsługi w systemie

Tabela 7.7. Tabela *revision\_defects* z grupy tabel: *Serwis*, przechowująca informacje o uszkodzeniach

Nazwa pola	Opis
<b>id</b>	Unikatowy identyfikator tabeli (klucz główny)
<b>revision_id</b>	Identyfikator obsługi (klucz obcy z tabeli <i>revisions</i> )
<b>structure_id</b>	Identyfikator elementu struktury konstrukcyjnej podlegającej naprawie (klucz obcy z tabeli <i>structures</i> )
<b>description</b>	Opis uszkodzenia
<b>solution</b>	Szczegółowe objaśnienie podjętych czynności naprawczych
<b>worker_name</b>	Dane identyfikacyjne pracownika realizującego naprawę

Tabela 7.8. Tabela *structures* z grupy tabel: *Serwis*, przechowująca informacje o relacji elementu do elementu nadrzędnego

Nazwa pola	Opis
<b>id</b>	Unikatowy identyfikator tabeli (klucz główny)
part_number	Numer porządkowy elementu w strukturze
name	Nazwa elementu konstrukcyjnego lub istotnego układu grupującego zestaw elementów
parent_part_number	Numer porządkowy elementu nadrzędnego w strukturze względem danego elementu

Tabela 7.9. Tabela *revision\_materials* z grupy tabel: *Serwis*, przechowująca informacje o wykorzystanych materiałach

Nazwa pola	Opis
<b>id</b>	Unikalny identyfikator tabeli (klucz główny)
<b>revision_id</b>	Identyfikator obsługi (klucz obcy z tabeli <i>revisions</i> )
<b>material_id</b>	Identyfikator materiału eksploatacyjnego (klucz obcy z tabeli <i>materials</i> )
amount	Liczba jednostek zużytego materiału
cost	Koszt jednostkowy materiału eksploatacyjnego
worker_name	Dane identyfikacyjne pracownika pobierającego materiał eksploatacyjny

Tabela 7.10. Tabela *tasks* z grupy tabel: *Serwis*, przechowująca informacje o wykonanych czynnościach obsługowych

Nazwa pola	Opis
<b>id</b>	Unikatowy identyfikator tabeli (klucz główny)
task_section_id	Identyfikator grupy czynności przeglądowych (klucz obcy z tabeli <i>tasks_sections</i> )
description	Opis czynności przeglądowej
requirements	Opis dodatkowych wymagań jakie muszą być spełnione podczas wykonywania czynności
accept_type	Identyfikator sposobu zatwierdzania wykonania czynności

Tabela 7.11. Tabela *users* z grupy tabel: *Użytkownicy*, przechowująca informacje o użytkownikach systemu

Nazwa pola	Opis
<b>id</b>	Unikatowy identyfikator tabeli (klucz główny)
<b>group_id</b>	Identyfikator grupy użytkowników (klucz obcy z tabeli <i>groups</i> )
ip_address	Adres IP
username	Nazwa użytkownika
password	Hasło
salt	Kod wykorzystywany przy wyznaczaniu hasła
email	Adres e-mail użytkownika
activation_code	Kod aktywacyjny
forgotten_password_code	Kod aktywacyjny dla potrzeb przywracania hasła
created_on	Data utworzenia konta użytkownika
last_login	Data ostatniego logowania się do systemu
active	Status użytkownika

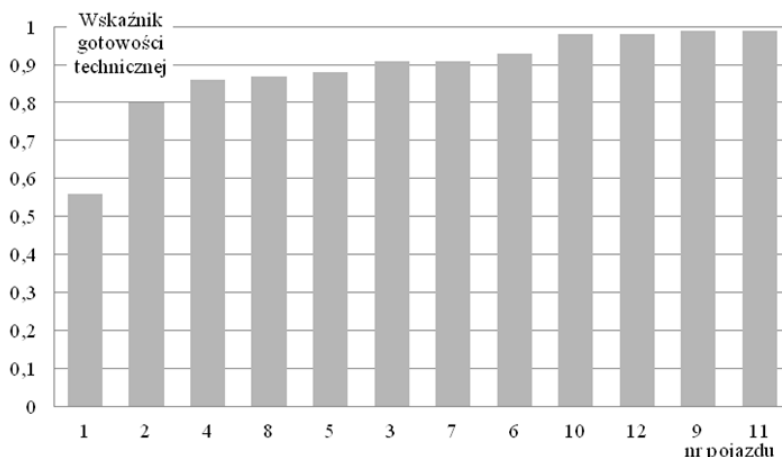
Wykonawczy moduł badawczy określa sposób prowadzenia obserwacji. Analiza sytuacji eksploatacyjnej oraz wymagania dotyczące celu badań ustalają poniższy sposób realizacji badań.

- Badania eksploatacyjne autobusów szynowych prowadzi się w nieokreślonym horyzoncie czasowym.
- Wielkość próbki badawczej obiektów jest zmienna i zależy od długookresowej strategii działania przedsiębiorstwa. Eksploatowane obiekty są jednorodne pod względem konstrukcyjnym i produkcyjnym, a liczba zmiennych losowych pojawiających się w eksploatacji wymaga stosowania modeli dla prób mało licznych.
- Badania realizuje się metodą próby ciągłej ze względu na małą liczebność grupy obiektów i jednorodność okresu produkcji w stosunku do oczekiwanej trwałości obiektów.
- W badaniach gromadzone są wszystkie rodzaje danych: dane identyfikacyjne obiektów technicznych, ludzi, infrastruktury, dane o bieżącym stanie obiektu, dane o zdarzeniach, dane o modyfikacjach i przebudowach obiektu.
- Zaprojektowano informatyczny system badawczy obejmujący system bazy danych z wielodostępem dla użytkowników o zróżnicowanych uprawnieniach. Wprowadzanie i komunikacja z systemem odbywa się drogą sieciowej wymiany danych.
- Dane wprowadzane są do systemu przez uprawnione osoby poprzez graficzne okna wymiany danych i przesyłane drogą sieciową do serwera bazy danych.
- Zaprojektowana baza danych jest relacyjną bazą danych z możliwością utworzenia hurtowni danych po pewnym czasie funkcjonowania systemu i zgromadzenia dużej liczby danych.
- Do wspomaganie zarządzania eksploatacją zaproponowano czytelne formularze do przeglądania stanu autobusów i w początkowym okresie samodzielnego wnioskowania. Większa liczba danych pozwoli na włączenie aplikacji statystycznych.
- System ma funkcje ostrzegania o zbliżających się terminach obsługi profilaktycznych, tak aby planowanie pojazdów do zadań przewozowych nie kolidowało z obowiązkowymi obsługami profilaktycznymi. Ponadto system generuje raporty o treści zgodnej z wymaganymi raportami właściciela pojazdów.

## 7.6. Interpretacja wyników badań

Badania eksploatacyjne autobusów szynowych zostały opracowane i wdrożone na początku 2012 roku, dlatego zbiór danych jest niewielki. Do bazy danych wprowadzono dane identyfikacyjne oraz sukcesywnie uzupełniane są dane operacyjne oraz zdarzeniowe. Na podstawie częściowo historycznych oraz bieżących danych wyznaczono skumulowane wartości wskaźników gotowości technicznej autobusów szynowych (rys. 7.6) oraz dystrybuanty czasu do uszkodzenia (rys. 7.9) [71].

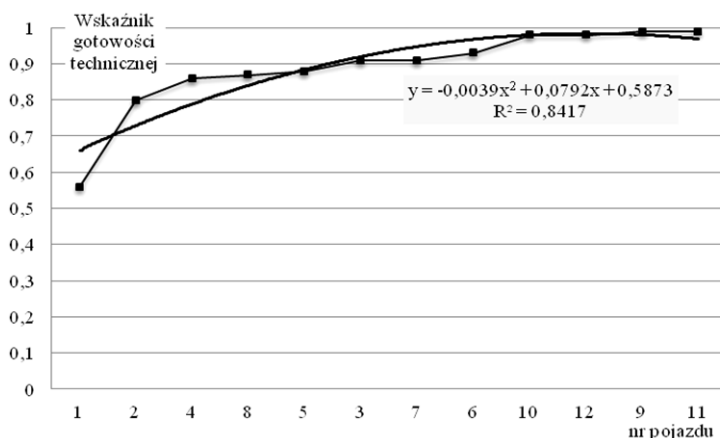




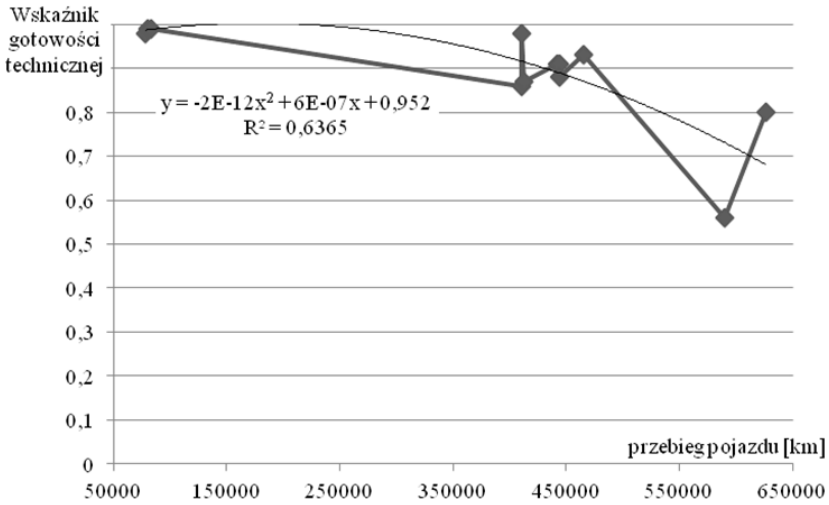
Rys. 7.6. Szereg rozdzielczy gotowości autobusów szynowych

Wykres wskaźnika gotowości technicznej (rys. 7.6) posortowano w układzie rosnących wartości tego wskaźnika, pokazujący związek wskaźnika z numerem pojazdu, co także odpowiada wiekowi pojazdu. Pojazd 1 został najwcześniej wprowadzony do eksploatacji. Wyznaczony współczynnik korelacji o wartości 0,77 (rys. 7.7) sugeruje, że nowsze pojazdy charakteryzują się większą gotowością techniczną. Związek ten może oznaczać ich większą niezawodność lub lepsze dostosowanie systemu eksploatacji do utrzymania autobusów szynowych i zapewnienia dłuższego okresu gotowości.

Oczywiste jest, że w rzeczywistej eksploatacji nie ma ścisłego związku numeru pojazdu z jego wiekiem. Pokazano to na rysunku 7.8, gdzie zachowana jest tendencja obniżenia wskaźnika gotowości z przebiegiem pojazdu oraz widać nierównomierność zużycia potencjału dla trzech grup pojazdów o przebiegach odpowiednio około 80 000, 450 000 oraz ponad 600 000 km.

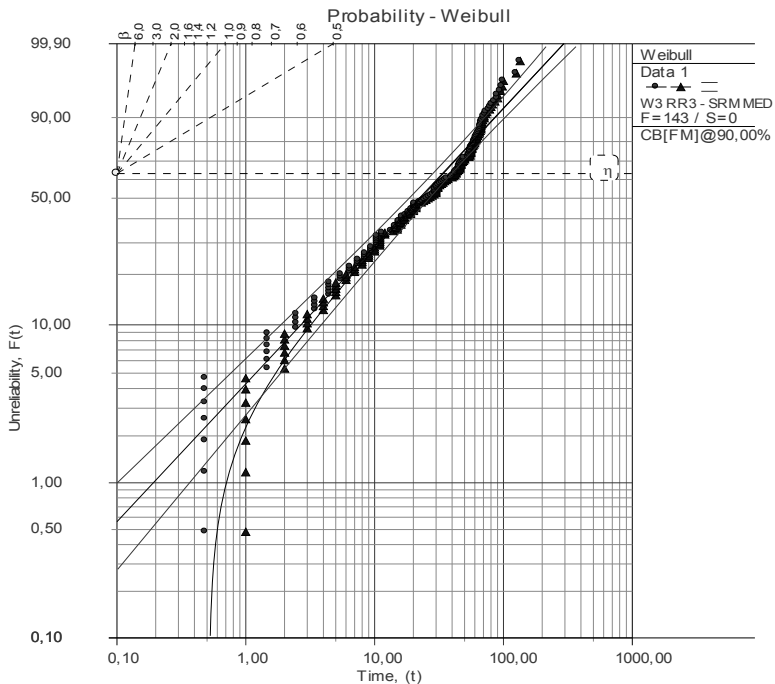


Rys. 7.7. Funkcja regresji i współczynnik korelacji dla wskaźnika gotowości i wieku autobusu szynowego



Rys. 7.8. Funkcja regresji i współczynnik korelacji dla wskaźnika gotowości w funkcji przebiegu autobusu szynowego

Analizy te potwierdzają słuszność gromadzenia danych eksploatacyjnych wielostronnego ich przetwarzania i wykorzystania w analizie eksploatacji obiektu.



$\beta=0,8905$ ,  $\eta=33,6223$ ,  $\gamma=0,5150$ ,  $\rho=0,9848$

Rys. 7.9. Dystrybuanta czasu do uszkodzenia autobusu szynowego

Dystrybuanta czasu między uszkodzeniami autobusu szynowego (rys. 7.9) została wyznaczona dla ograniczonej czasem eksploatacji liczby danych, jednak współczynnik korelacji  $\rho = 0,98$  świadczy o dobrej zgodności rozkładu z danymi empirycznymi. Współczynnik kształtu rozkładu Weibulla (tutaj  $\beta$ ) wynosi 0,89, co sugeruje przypadkowy charakter uszkodzeń powodujących niezdatność autobusu.

Opracowane i wdrożone badania eksploatacyjne autobusów szynowych potwierdzają poprawność proponowanej metodyki badań. Metodyka badań wspomaga działania organizatorów badań i poprzez systemowe podejście umożliwia szybkie opracowanie wariantów badań najlepiej dopasowanych do wymagań odbiorcy wyników. Ocena metodyki ze względów praktycznych wskazuje na skrócenie czasu opracowywania badań oraz uwzględnienie niezbędnych w badaniach czynników eksploatacyjnych.



## 8. Wnioski

Metodyka badań eksploatacyjnych *BEOM* stanowi unikatowy zbiór modeli i metod cząstkowych ukierunkowanych na analizę sytuacji eksploatacyjnej oraz syntezę badań w odniesieniu do szerokiej gamy obiektów mechanicznych. Podjęta w pracy problematyka tworzenia badań eksploatacyjnych jest tylko w niewielkim zakresie udokumentowana w literaturze, a systemowe podejście analityczne do całego obszaru eksploatacji obiektu praktycznie nie jest formalnie opisane.

Proponowana w pracy metodyka uzupełnia zagadnienie badań eksploatacyjnych o systematykę i formalną metodę wspomagającą budowę modelu sytuacji eksploatacyjnej oraz tworzenia systemu badawczego. Zasadniczymi metodami proponowanymi w pracy są:

- systemowa metoda analizy systemu i procesu eksploatacji *SEOM*,
- obiektowe podejście do metody modelowania sytuacji eksploatacyjnej,
- metoda tworzenia rosnącej struktury identyfikacyjnej obiektów systemu eksploatacji,
- formalizacja modelu *MOD* i modułu badawczego *MBE*,
- metoda modelowania danych eksploatacyjnych i budowy bazy danych.

Badania eksploatacyjne i obserwacje obiektów technicznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji ulegały metodycznym modyfikacjom wynikającym z postępu technologicznego zarówno w warstwie technicznej, jak i badawczej. Współczesne obiekty techniczne, a szczególnie mechaniczne osiągnęły wyższy poziom jakości i niezawodności, charakteryzują się mniejszą energochłonnością przy większej sprawności i efektywności. Ponadto rozwój elektroniki i telekomunikacji znacznie usprawnił przepływ informacji ułatwiający zdalny nadzór nad utrzymaniem obiektów w stanie zdatności. Czynniki te spowodowały też skomplikowanie obiektów pod względem konstrukcyjnym i obsługowym. Bardziej wyrafinowane systemy monitorujące oraz „wyszczuplanie” konstrukcji wymagają tym bardziej obserwacji wielu parametrów pracy oraz losowych narażeń ze strony użytkownika i otoczenia obiektu.

Celem systemowego podejścia do modelowania eksploatacji jest możliwość pełnego i jednolitego opisu różnych obiektów materialnych, ożywionych i otoczenia naturalnego uczestniczących w eksploatacji. Ujęcie takie wymaga zidentyfikowania systemu (obiektów) i procesu eksploatacji, a zwłaszcza:

- obiektu eksploatacji w systemie użytkowania i obsługiwanian,
- zasobów ludzkich niezbędnych do zarządzania i prowadzenia eksploatacji,
- infrastruktury wspierającej eksploatację,
- otoczenia systemu eksploatacji obejmującego ludzi, obiekty techniczne i środowisko naturalne w takim zakresie, jakim istnieje relacja między systemem eksploatacji a otoczeniem,
- procesu eksploatacji, zarówno pożądanego, jaki i zakłócającego,
- poświadanych i niepoświadanych efektów eksploatacji.

Eksploatację obserwuje się przez obserwacje wybranych atrybutów elementów systemu eksploatacji. Wybór atrybutów i ich identyfikacja w zakresie analizy zmienności i określenia przedziałów dopuszczalnej zmienności jest kluczowym zagadnieniem wpływającym na szczegółowość i ilość pozyskiwanych informacji eksploatacyjnych. W metodologii badań proponuje się wykorzystanie informacji eksploatacyjnej w postaci piątki:  $I_{zis} = \langle i, s, w_{is}, r_s, t_{zis} \rangle$ , gdzie:  $i$  oznacza numer elementu,  $s$  jest numerem atrybutu tego elementu,  $w_{is}$  jest atrybutem,  $r_s$  jest postacią zdarzenia, a  $t_{zis}$  chwilą zdarzenia eksploatacyjnego związanego z tym atrybutem. Atrybuty charakteryzują ogół zjawisk eksploatacyjnych i dlatego ich wybór i identyfikacja również wymaga szczególnej uwagi, a także wnikliwej analizy systemu i procesu eksploatacji w fazie identyfikacji źródeł danych. Służy temu rozbudowana analiza sytuacji eksploatacyjnej obejmująca: człowieka, technikę i otoczenie. Złożoność relacji między tymi elementami wymaga zidentyfikowania obiektów i opisujących je atrybutów, a następnie ograniczenie ich zakresu do zbioru zapewniającego spełnienie celu badań. W pracy zaproponowano pojęcie struktury bezpieczeństwa opisującej relację między stanem elementów systemu eksploatacji, a stanem bezpieczeństwa systemu. Poszerza to strukturę niezawodności o czynnik strat związany z uszkodzeniem.

Złożoność konstrukcyjna zaawansowanych technologicznie obiektów technicznych sięga setek tysięcy elementów, co powoduje, że rozpoznanie struktury obiektu badań wymaga w początkowej fazie badań znacznego nakładu pracy. Opracowana na potrzeby badawcze koncepcja rosnącej struktury obiektu ułatwia i przyspiesza inicjację badań. Wykorzystanie w badaniach koncepcji rosnącej struktury konstrukcyjnej obiektu pozwala na znaczne ograniczenie nakładu pracy (w badaniach pojawia się zwykle tylko ok. 10–30% wszystkich elementów) i szybszą identyfikację elementów w takiej strukturze.

## **Charakterystyka metod w postaci syntetycznych opisów działań**

### **Metoda identyfikacji sytuacji eksploatacyjnej obiektu mechanicznego**

Zidentyfikować sytuację eksploatacyjną poprzez obiektową analizę obszarów badań na podstawie dokumentacji technicznej i eksploatacyjnej, obserwacji oraz wstępnie zebranych danych bieżących i historycznych.

### **Metoda identyfikacji obiektu mechanicznego OM**

Dokonać inwentaryzacji aktywnych obiektów w systemie eksploatacji.

Zgromadzić dokumentację techniczną dotyczącą każdego obiektu.

Dokonać wstępnej, systemowej dekompozycji obiektu do poziomu, dla którego można uzyskać informacje eksploatacyjne.

Opisać na podstawie dokumentacji technicznej wymagania wynikające z użytkowania i obsługiwanania.

#### **Metoda identyfikacji infrastruktury technicznej eksploatacji obiektu *ITM***

Dokonać inwentaryzacji stanowisk użytkowania i obsługiwanania w systemie eksploatacji.

Dokonać inwentaryzacji obiektów technicznych w bazie użytkowej i obsługowej oraz obiektów towarzyszących.

Opisać funkcje i relacje obiektów infrastruktury z obiektem badań.

Opisać wymagania wynikające z użytkowania i obsługiwanania.

Zgromadzić dokumentację techniczną dotyczącą każdego typu obiektu.

#### **Metoda identyfikacji człowieka w systemie eksploatacji *HE***

Dokonać zestawienia uczestników eksploatacji w grupach:  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ .

Dokonać opisu funkcji, zadań i kompetencji uczestników eksploatacji.

Określić strukturę współdziałania i łącza informacyjne między uczestnikami eksploatacji.

#### **Metoda identyfikacji otoczenia naturalnego eksploatacji obiektu *ON***

Dokonać inwentaryzacji czynników otoczenia.

Zgromadzić dokumentację (informacje) dotyczącą szacunkowych wartości parametrów charakteryzujących elementy:  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ .

Dokonać inwentaryzacji obiektów:  $N_4$ ,  $N_5$ .

Określić potencjalne relacje elementów otoczenia z pozostałymi obiektami systemu eksploatacji.

#### **Metoda analizy procesu eksploatacji**

##### **Zakłócony proces eksploatacji**

Opisać na podstawie dokumentacji technicznej wymagania obsługowe obiektu (profilaktyczne i korekcyjne).

Scharakteryzować proces obsługi korekcyjnej według schematu:

- ustalić miejsca zdarzenia (źródła, miejsca, obiekty) powodującego niezdatność,
- ustalić postaci zdarzenia (uszkodzenia),
- wykonać analizę przyczyn zdarzenia,
- opisać sposoby usunięcia niezdatności (technologia, ludzie, materiały, pieniądze, czas),
- ustalić wielkość strat w wyniku zdarzenia i ich zasięg (technika, człowiek, otoczenie).

Dokonać identyfikacji stanów obsługiwanania obiektu.

Przeprowadzić racjonalną (odpowiednią do celu badań) dekompozycję stanów obsługiwanego.

Określić zbiór zdarzeń między stanami procesu zakłóconego oraz sposoby przejścia do stanu poprawnej eksploatacji.

### **Poprawny proces eksploatacji**

Opisać na podstawie dokumentacji technicznej zadania i funkcje obiektów oraz wymagania wynikające z użytkowania.

Dokonać identyfikacji stanów użytkowania obiektu.

Przeprowadzić racjonalną (odpowiednią do celu badań) dekompozycję stanów użytkowania.

Określić zbiór zdarzeń między poprawnymi stanami oraz przyczyny przejścia do stanu zakłóconego.

### **Metoda syntezy modelowej sytuacji eksploatacyjnej *MSEOM***

Przyjąć racjonalne kryteria ważności wyróżnionych atrybutów wyróżnionych obiektów.

Wprowadzić założenia modelowe dla każdej wyróżnionej encji.

Zestawić modele parametryczne encji i określić powiązania i zależności w czasie i bazie eksploatacyjnej.

Określić związki między obserwowanymi encjami a wymaganymi miarami oceny.

Przyjąć metodę badawczą.

### **Metoda syntezy systemu badawczego *SBE***

Zorganizować zespół badawczy obejmujący osoby odpowiedzialne za kluczowe elementy systemu informacyjnego: kierownik badań, kierownik gromadzenia danych, kierownik przetwarzania danych i kierownik administracyjny (dokumentacja, baza badawcza).

Sporządzić umowy na zbieranie danych przez eksploatorów.

Opracować wzory dokumentów do gromadzenia danych w terenie i ewentualnie, komputerowych wzorów okien wymiany danych, a także niezbędne instrukcje i zalecenia szkoleniowe.

Zapewnić bazę lokalową stacjonarną lub rozproszoną z podaniem adresów i linii komunikacyjnych.

Zapewnić niezbędny sprzęt komputerowy z oprogramowaniem (porty wymiany danych, internet, GPRS, GPS itp.).

Określić harmonogram spotkań i komunikacji między członkami zespołu.

### **Metoda syntezy programu badawczego *PBE***

Zestawić zadania badawcze (utworzenie zespołu badawczego, zapewnienie bazy badawczej, zgromadzenie zasobów badawczych, rozpoczęcie badań, realizacja, zakończenie).

Opracować rozkład zadań w czasie.



**Wdrożenie systemu badań WSB**

Przygotować i zgromadzić zapas dokumentów badawczych.

Przeprowadzić szkolenia dla personelu badawczego .

Przedstawić i nadzorować procedury zbierania i gromadzenia danych.



## Załącznik – baza pojęciowa

Baza pojęć stosowanych w niniejszej pracy podzielona została na trzy grupy obejmujące: pojęcia dotyczące metodyki badań naukowych, nauki o eksploatacji i bezpieczeństwie systemów technicznych oraz pojęcia dotyczące informacji w eksploatacji obiektów mechanicznych.

### Z.1. Pojęcia dotyczące metodyki badań

W pracy korzysta się z naukowego podejścia do problematyki badań eksploatacyjnych polegającego na: zauważaniu problemu, stawianiu hipotez, zbieraniu dowodów potwierdzających słuszność tez zawartych w hipotezie oraz decydowaniu o poprawności hipotez. W zakresie metodologii badań naukowych oraz nauki o systemach korzysta się z następujących pojęć:

**Badanie** jest zbiorem czynności wykonywanych w celu zmierzenia, określenia ilościowego lub sklasyfikowania charakterystyki lub właściwości obiektu. W technice wyróżnia się wiele rodzajów badań w zależności od postawionego celu i technicznych warunków wykonania [257]:

- badanie określające (*determination test*) – badanie mające na celu ustalenie wartości charakterystyki lub właściwości obiektu,
- badanie zgodności (*compliance test*) – badanie przeprowadzane w celu sprawdzenia zgodności charakterystyki lub właściwości obiektu z ustalonymi dla nich wymaganiami,
- badanie laboratoryjne (*laboratory test*) – badanie zgodności lub badanie określające, wykonywane w określonych i kontrolowanych warunkach, które mogą ale nie muszą, symulować eksploatacyjne warunki pracy,
- badanie eksploatacyjne (*field test*) – badanie zgodności lub badanie określające wykonywane w trakcie naturalnej eksploatacji badanego obiektu z rejestrowaniem występujących w czasie badań zdarzeń i warunków: użytkowych, obsługowych i środowiskowych,
- badanie przyspieszone (*accelerated test*) – badanie wykonywane w celu skrócenia czasu badań; w badaniu stosuje się poziom narażeń wyższy od poziomu w warunkach normalnych przez co uzyskuje się szybszą odpowiedź obiektu.
- badanie selekcyjne (*screening test*) badanie sortujące – badanie, którego celem jest wyeliminowanie lub wykrycie obiektów uszkodzonych lub z wadami ukrytymi.

Badanie naukowe obejmuje zwykle sekwencję następujących działań: obserwacja rzeczywistości, sformułowanie celu badania, postawienie hipotezy badawczej, zbudowanie modelu zjawiska, opracowanie sposobu weryfikacji hipotezy, zebranie danych i ich analizę, zweryfikowanie poprawności hipotezy i sformułowanie wniosków [52].

**Metoda** jest sposobem działania świadomie stosowanym w celu osiągnięcia rozwiązania w skończonej liczbie kroków. Wyróżnia się metodę algorytmiczną pozwalającą na ścisłe i dokładne sformułowanie kolejnych działań oraz metodę heurystyczną polegającą na twórczym, intuicyjnym działaniu wykorzystującym doświadczenia, obserwacje eksperymentalne i historyczne oraz na działaniu wspieranym wiedzą ekspertów. Dochodzenie do wniosków może odbywać się na drodze dedukcji lub indukcji. Metoda badawcza określana jest jako zespół świadomie, teoretycznie uzasadnionych i powtarzalnych sposobów rozwiązywania problemu lub dochodzenia do pożądaných wyników [138].

**Metodyka** łączy kilka metod zmierzających do rozwiązania określonego zadania. Zazwyczaj odpowiada na pytanie: jak osiągnąć cel.

**Byt, encja** (gr. – *ontos*, ang. – *entity*) jest pojęciem abstrakcyjnym stosowanym w ontologii, filozofii, teorii systemów, modelowaniu matematycznym, zagadnieniach baz danych do wyróżniania pewnych obiektów i zjawisk w zbiorze innych obiektów [41, 114]. **Byt** definiuje się jako niezależne, odosobnione, *określone istnienie* [41] będące fragmentem rzeczywistości, określające obiekt materialny, zdarzenie, działanie, a także relacje, przy czym opisuje go *istota*, to czym jest, i *moment*, czyli to, że jest. W ujęciu technicznym pojęciem encji określa się *przedmiot fizyczny lub abstrakcyjny, rozpoznawalny jako samodzielny i niezależny w organizacji rzeczywistości; rzecz znaczącą. Terminem encja obejmuje się zarówno typ encji, jak i jej reprezentanta, np. „nadwozie” może oznaczać typ encji, a „limuzyna” konkretną reprezentację nadwozia. Termin ukuty w środowiskach i na potrzeby specjalistów z dziedziny baz danych* [247]. Byty charakteryzowane są atrybutami wyróżniającymi je i różnicującymi między sobą, a w odniesieniu do każdego bytu można wyróżnić jego **czynniki determinacji**, tj. takie czynniki, od których zależy to, że ma on takie a nie inne atrybuty, oraz jego **czynniki realizacji**, od których z kolei zależy to, że ten byt w ogóle powstał [41]. **Atrybut** to cecha charakterystyczna, wyróżniająca, przypisywana konkretnej osobie lub rzeczy; symbol, oznaka czegoś [247].

**System** ma w nauce o systemach wiele definicji ukierunkowanych na takie zakresy postrzegania, jak struktura, funkcjonalność, relacyjność [6, 145, 287, 289, 308, 321]. Analiza pojęcia systemu w literaturze pozwala na wydzielenie około 40 propozycji, z których najbliższe do przyjęcia w opisie obiektów mechanicznych przytoczono poniżej. Według słownika Webstera cytowanego w [287] system określany jest jako:

- *jedność złożona, ukształtowana z reguły przez różne czynniki mające wspólny plan lub też służące osiągnięciu wspólnego celu,*
- *zbiór lub połączenie obiektów połączonych przez regularne oddziaływanie wzajemne lub wzajemną zależność,*
- *działająca w sposób uporządkowany całość.*

Definicja systemu podana przez [113] stanowi, że *system jest zbiorem uporządkowanych bytów tak połączonych lub skorelowanych, aby tworzyć jednostkę lub organizmiczną całość.*

L. von Bertalanffy [287] twierdzi, że *system może być określony jako kompleks oddziałujących nawzajem elementów  $f_1, f_2, \dots, f_n$ .*

System, w znaczeniu systemu technicznego, jest zbiorem wydzielonych elementów (encji) charakteryzowanych zbiorem atrybutów, powiązanych relacjami, a współistniejących w pewnym otoczeniu w celu spełniania określonej potrzeby [92, 101, 321].

Kluczową rolę w identyfikacji i modelowaniu danych eksploatacyjnych odgrywa pojęcie systemu pozwalające na organizację, klasyfikację i wyznaczanie granic analizy [14, 97, 101, 234, 289, 321]. Najważniejszymi zadaniami analizy systemowej jest: identyfikacja encji, ich zdefiniowanie, opis organizacji (struktury) oraz wyznaczenie głównych cech działania i wymagań systemu oraz oddziaływania systemów otoczenia [321].

Spśród pięciu definicji systemu według [145], dwie dotyczą struktur rzeczywistych: *struktury dziedziny badania systemu i sprzężeń (UC – Universe of Discourse and Couplings)* i *struktury stanów i przejść (ST – State-Transition)*.

Definicja systemu bazująca na pojęciu struktury rzeczywistej UC określa system jako *zbiór elementów i zachowań stałych oraz zbiór sprzężeń między elementami oraz między elementami i otoczeniem.* System  $S$  jest parą  $(B, C)$ , gdzie  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_r\}$  jest zbiorem zachowań systemu i  $C = \{c_{ij} \mid c_{ij} = A_i \cap A_j, i \neq j\}$ ; przy czym  $c_{ij} \mid c_{ij}$  jest relacją (sprzężeniem) pary  $(a_i, a_j)$ , będących elementami systemu:  $a_i, a_j \in A, i \neq j$ .

Definicję zbieżną z poglądami metodologów konstruowania podają D. Ellis i F. Ludwig [287]: *System – urządzenie, proces lub schemat, którego zachowanie określone jest jakąś regułą; funkcja systemu polega na operowaniu w czasie informacją i (albo) energią i (albo) materią.*

Uniwersalną definicję sytemu podają A. Hall i R. Fagen [287]: *System to zbiór obiektów wspólnych z relacjami między obiektami i relacjami między ich atrybutami.*

Jedna z najwcześniejszych i najprostszych definicji systemu [9] jako *zbioru zmiennych opisowych określonych przez obserwatora* prowadzi do trzech dalszych, bardziej szczegółowych podejść:

- utożsamiający system z obiektem,
- determinujący system jako obraz obiektu widziany przez obserwatora,
- definiujący system jako subiektywną reprezentację obiektu.

Definicja systemu według Ashby'ego [9] ogranicza system do zbioru zmiennych wybranych przez obserwatora, a właściwych dla „maszyny” rozumianej jako system łącznie z jego modelem. Dlatego też Ashby używa zróżnicowanych określeń do podanych terminów: obiekt nazywając *maszyną*, subiektywny obraz obiektu *systemem* oraz reprezentację obiektu *modelem*. Dla określenia systemu według tej definicji konieczny jest: obiekt, sposób postrzegania tego obiektu (może być różny dla różnych obserwatorów) oraz model reprezentujący obiekt. Takie podejście, w którym mogą być stworzone różne modele na podstawie jednego obiektu, w zależności od sposobu postrzegania

i wyboru zmiennych opisowych i ograniczeń jest dobrą podstawą modelowania matematycznego systemów rzeczywistych.

**Struktura** jest to pojęcie systemowe określające relacje między elementami systemu, niekiedy także utożsamiane z samym systemem [145, 289].

## Z.2. Pojęcia dotyczące eksploatacji i bezpieczeństwa systemów technicznych

Zasadniczą treść pracy dotyczy nauki o eksploatacji i bezpieczeństwie, gdzie znaczącą rolę odgrywa teoria niezawodności. Głównymi pojęciami pojawiającymi się w pracy, a dotyczącymi cyklu istnienia obiektu są:

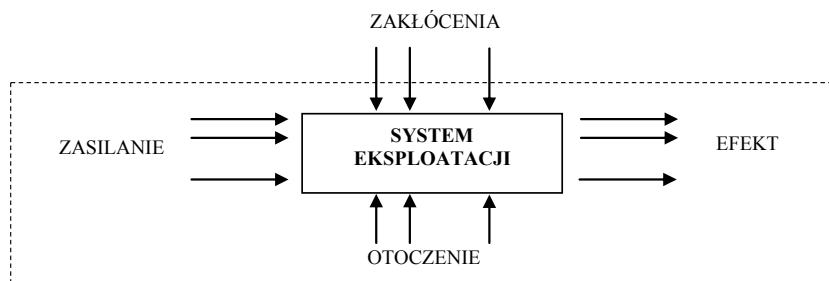
**Konstruowanie** (projektowanie szczegółowe [72]) jest dobieraniem cech konstrukcyjnych (kształtu, wymiaru, materiału) identyfikujących konstrukcję lub też stanowi dobór *układów struktur i innych stanów wytworu* [62].

**Projektowanie** jest procesem koncepcyjnym polegającym na określaniu sposobu zaspokojenia potrzeby (działania) [72, 112]. Projektowanie to dobieranie sposobu działania jakiegokolwiek układu. Tworzenie w szczególnych przypadkach systemu jako formalnej podstawy działania jakiegokolwiek układu [62]. Według [240, 281], projektowanie (tłum z niem. konstruowanie) jest działaniem koncepcyjnym, w którym dąży się do spełnienia postawionych żądań w sposób możliwie najlepszy w danej chwili. Jest to działalność inżynierska mająca styczność z prawie wszystkimi dziedzinami życia, gdzie inżynier posługuje się swoją wiedzą i prawami płynącymi z nauk przyrodniczych, która warunkuje materialną realizację założeń.

**Obiekt mechaniczny** w ujęciu systemowym traktuje się jako obiekt (system) złożony, w którym na niższych poziomach dekompozycji definiuje się podsystemy lub komponenty (układy, zespoły, podzespoły, elementy itd.) [145, 287]. Wzajemne relacje między komponentami tworzą relacje (struktury) odpowiadające kryterium klasyfikacji poziomu dekompozycji, np. struktura konstrukcyjna, funkcjonalna, niezawodności, bezpieczeństwa [191].

**Eksploatacja** jest fazą istnienia obiektu technicznego rozpoczynającą się z chwilą przejścia go przez użytkownika i trwającą aż do chwili kasacji [257]. Obejmuje ona *zespół wszystkich działań technicznych i organizacyjnych, mających na celu umożliwienie obiektowi wypełnianie wymaganych funkcji, włącznie z koniecznym dostosowaniem do zmian warunków zewnętrznych* [257]. Eksploatacja obiektu, w sensie działania, zachodzi w systemie eksploatacji i obejmuje użytkowanie i obsługiwanie obiektu, a opisywane jest przez proces eksploatacji. Z pojęciem systemu eksploatacji nierozdzielnie związane jest otoczenie i człowiek (eksploatator) tworzące tzw. układ działania człowiek–maszyna–otoczenie (C–M–O) [227, 292] lub układ antropotechniczny [239].

W systemowym modelu eksploatacji obiektów mechanicznych typu „czarna skrzynka” uwzględnia się wielkości wejściowe, wyjściowe oraz zakłócenia oddziałujące na efekt działania systemu (rys. 1), przy czym efekt może być rozpatrywany zarówno jako efekt pozytywny (praca użyteczna), jak i negatywny (produkty uboczne, straty).



Cybernetyczny model systemu eksploatacji

Nadrzędnym celem istnienia systemu eksploatacji jest spełnianie zamierzonej funkcji (zaspokajanie potrzeb) na najwyższym możliwym poziomie w odniesieniu do całkowitych kosztów „życia” systemu [31].

**Efektywność eksploataowania (systemu)** to stopień realizacji zadań operacyjnych przy danych nakładach lub przy danym stopniu ich realizacji [31, 236]. W ocenie efektywności eksploataowania uwzględnia się kryteria ekonomiczne, techniczne i organizacyjne. Celem działania inżynierii systemów technicznych, obejmującej fazy: projektowania, wytwarzania i eksploatacji, jest opracowanie racjonalnych zasad sterowania w obszarze systemu, aby uzyskać ekonomicznie uzasadnione korzyści, przy możliwie najniższym poziomie nakładów [240] i wymaganym poziomie bezpieczeństwa (akceptowalne ryzyko eksploatacji obiektu w danych warunkach otoczenia). Miarą efektywności eksploataowania jest iloraz skuteczności i całkowitych kosztów życia systemu [20, 21, 31].

**Skuteczność eksploatacyjna** (*operational effectiveness*) jest miarą tego, co system eksploatacji może wytworzyć. Skuteczność jest iloczynem: gotowości, nieuszkodzalności, obsługiwalności i sprawności działania. Sprawność działania określana jest jako iloraz uzyskanego efektu i efektu możliwego do uzyskania [20]. Wartość skuteczności zawiera się w przedziale [0, 1].

**LCC** (*Life Cycle Cost*) termin oznaczający całkowite koszty życia obiektu (systemu) obejmujące: koszt pozyskania obiektu (zakupu, instalacji, uruchomienia) i koszty utrzymania (koszty użytkowania, obsługiwanie i likwidacji) [20, 31].

**Zarządzanie** według Griffina to zestaw działań (planowanie, organizowanie, motywowanie, kontrola) skierowanych na zasoby organizacji (ludzkie, finansowe, rzeczowe, informacyjne) wykorzystywanych z zamiarem osiągnięcia celów organizacji [95].

**Zarządzanie eksploatacją** jest działaniem zespołu ludzkiego zorientowanego na sprawne i skuteczne uzyskiwanie pożądanych efektów systemu eksploatacji z wykorzystaniem zasobów ludzkich i technicznych, elementów decyzyjnych, realizacyjnych i bazy informacyjnej [178, 279].

**Niezawodność** (pojęcie) jest określana jako zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie

środków obsługi [257]. Niezawodność odpowiada angielskiemu pojęciu *dependability* [114].

**Charakterystyki niezawodności** są miarami oceny niezawodności występującymi w postaci statystycznych charakterystyk liczbowych i funkcyjnych. Charakterystyki te wartościują zmienne losowe opisujące uszkodzalność i naprawialność obiektów technicznych [152, 263]. Fizyczną postacią zmiennych jest czas, odległość (droga, przebieg), liczba cykli, ilość wykonanej pracy itp. Do najważniejszych charakterystyk należą wielkości statystyczne, takie jak: wartość oczekiwana, funkcja gęstości prawdopodobieństwa  $f(x)$ , dystrybuanta zmiennej losowej (dystrybuanta uszkodzeń)  $F(x)$ , funkcja niezawodności  $R(x)$ , funkcja intensywności uszkodzeń  $\lambda(x)$ , skumulowana funkcja intensywności uszkodzeń  $\Lambda(x)$  [18, 19, 31, 58, 233, 277].

**Struktura niezawodności** jest definiowana jako funkcja odwzorowująca stan niezawodnościowy elementów w stan obiektu (systemu). Zakłada się najczęściej, że elementy są binarne (dwuwartościowe) pod względem stanów niezawodności, tzn. mogą znajdować się w dwóch stanach: zdatności i niezdatności [33, 121, 228].

**Niezawodność strukturalna** jest metodologią wyznaczania prawdopodobieństwa niezdatności (stanu awarii) struktur konstrukcyjnych, w której wykorzystuje się probabilistyczne modelowanie właściwości materiału, działających obciążeń roboczych i oddziaływań otoczenia [121, 130, 280].

**Gotowość** jest właściwością obiektu oznaczającą możliwość spełnienia nałożonej na niego funkcji w określonym czasie, w określonych warunkach i przy zapewnieniu niezbędnych środków obsługi [257]. Miarą gotowości jest współczynnik gotowości technicznej.

**Nieuszkodzalność** jest właściwością obiektu oznaczającą jego zdolność do utrzymania stanu zdatności w danych warunkach i w określonym przedziale czasu nieprzerwanym uszkodzeniem. Miarą nieuszkodzalności jest funkcja niezawodności [257].

**Obsługiwalność** (naprawialność) jest zdolnością obiektu i systemu obsługiwanego do przywrócenia stanu zdatności w określonym czasie, w określonych warunkach [257].

**Bezpieczeństwo** jest pojęciem subiektywnie oceniającym ryzyko działania systemu, w ujęciu systemowym jest stanem systemu, w który występujące ryzyko akceptowalne.

**Zagrożenie** oznacza stan systemu z potencjalną możliwością zaistnienia strat [261].

**Ryzyko** jest określane jako kombinacja (najczęściej iloczynowa) możliwości zajścia zdarzenia niepożądanego, mierzonego częstością lub prawdopodobieństwem odniesionym do przedziału czasu i wielkości skutku, straty [261].

**Analiza ryzyka** to określenie zagrożeń, oszacowanie częstości lub prawdopodobieństwa ich występowania oraz oszacowanie wielkości skutków tych zagrożeń, a następnie obliczenie ryzyka [261].

**Ocena ryzyka** jest procesem analityczno-badawczym wchodzącym w skład zarządzania ryzykiem, obejmującym analizę ryzyka i wyznaczenie poziomu dopuszczalności ryzyka oraz podjęcie decyzji o warunkach jego akceptacji [261].

**Zarządzanie ryzykiem** jest integralną częścią działania przedsięwzięcia włączoną w procesy decyzyjne, prowadzone jest w sposób ciągły i oparty na dostępnej informa-



cji z uwzględnieniem jej niepewności. Zarządzanie ryzykiem opiera się na: wyznaczeniu celów w zakresie bezpieczeństwa, analizie i ocenie ryzyka, weryfikacji stanu bezpieczeństwa z wyznaczonymi celami, wprowadzenie środków bezpieczeństwa, jeśli konieczne jest obniżenie ryzyka oraz monitorowanie skuteczności działań i zapewnienia wymaganego poziomu ryzyka [124, 125].

### Z.3. Pojęcia dotyczące informacji

**Informacja** to zinterpretowane dane, podane w pewnym kontekście. Informacja ma charakter subiektywny, zależny od wiedzy odbiorcy [96]. Informacja powstaje jako efekt pewnego celowego działania zmniejszającego niepewność na temat rozważanego problemu decyzyjnego; jest wówczas miarą różnicy niepewności przed i po przeprowadzonym działaniu [6, 14, 145, 175].

**Wiedza** to zbiór zintegrowanych informacji, informacja w pewnym kontekście [14, 179]. Wiedza o projektowaniu składa się z wiedzy doświadczalnej, eksperckiej i naukowej będącej rezultatem dociekań myślowych [81].

**Dane** są zbiorem pewnych symboli i układów znaków reprezentujących poprzez symbole obiekty i encje na pewnym poziomie zaufania [3, 27]. Powiązane ze sobą dane tworzą fakty [14]. Dane są źródłem informacji, która z kolei jest podstawą podejmowania decyzji [96].

**Baza danych** to model wybranego aspektu rzeczywistości (obszar analizy) [27]. Dane w bazie danych są w pewnym przedziale niezmiennie (trwałe) i opisują w ten sposób zbiór prawdziwych faktów o rzeczywistości.

**System bazy danych** (system zarządzania bazą danych) jest zbiorem programów służących do gromadzenia, przetwarzania i wyszukiwania informacji z bazy danych [47].



## Literatura

- [1] Abernethy R.B., *Dr. E. H. Wallodi Weibull*. [www.barringer1.com/pdf/Weibull\\_bio\\_by\\_Dr.\\_Robert\\_B.\\_Abernethy.pdf](http://www.barringer1.com/pdf/Weibull_bio_by_Dr._Robert_B._Abernethy.pdf). Dostęp: 06.2011.
- [2] Akhmedjanov F.M., *Reliability Databases: State-of-the-Art and Perspectives*. Risø National Laboratory. Roskilde 2001.
- [3] Allen S., *Modelowanie danych*. Helion, Gliwice 2006.
- [4] *Analiza ryzyka w transporcie i przemyśle*, Navigator nr 6. Red. Młyńczak M., Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
- [5] *Analiza systemowa – podstawy i metodologia*. Red. Findeisen W., PWN, Warszawa 1985.
- [6] Andrews J.D., Moss T.R., *Reliability and Risk Assessment*. Professional Engineering Publishing Limited, London, Bury St Edmunds 2002.
- [7] Andrzejczak K., Młyńczak M., *Obiekt eksploatacji jako system o nieokreślonej a priori budowie (struktura statyczna vs. system rosnący)* W: *Niezawodność procesów i systemów technicznych*, XL Jubileuszowa Zimowa Szkoła Niezawodności, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2012.
- [8] Ashby W.R., *An introduction to cybernetics*, Chapman&Hall, Londyn 1956.
- [9] Augustynowicz J., Dudek D., Dudek K., Figiel A., Młyńczak M., Nowakowski T., Przyступа F.W., *Struktury patologiczne maszyn*. Szczyrk, Seria Monograficzna ITWL 2001.
- [10] Augustynowicz J., Dudek K., Figiel A., Prus L., *Monitorowanie stanu obciążenia konstrukcji nośnych koparek kołowych*. Continuous surface mining. 5th International symposium. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
- [11] Aven T., *Foundations of Risk Analysis. A Knowledge and Decision-Oriented Perspective*. John Wiley & Sons, Inc. West Sussex 2003.
- [12] Aven T., Vinnem J.E., *Risk Management with Applications from the Offshore Petroleum Industry*. Springer Verlag, London 2007.
- [13] Avontuur G.C., *Reliability Analysis in Mechanical Engineering Design*. Delft University Press, Delft, 2000.
- [14] Ayyub B.M., Klir G.J., *Uncertainty Modeling and Analysis in Engineering and the Sciences*. Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2006.
- [15] *Badania systemów eksploatacyjnych*. Red. Cygan Z., Zięba S., Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wydawnictwo PAN, Wrocław 1984.

- [16] Bamford D.R., Forrester P.L., *Essential guide to operations management: concepts and case notes*. John Wiley & Sons, Inc. Chichester 2010.
- [17] Banachowski L., Chałczyńska, Matejewski K., *Relacyjne bazy danych*. Wydawnictwo PJWSTK, Warszawa 2004.
- [18] Barlow R.E., *Engineering Reliability*. Society for Industrial and Applied Mathematics & American Statistical Association, Philadelphia 1998.
- [19] Barlow R.E., Proschan F., *Mathematical theory of reliability*. Society for. Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia 1966.
- [20] Barringer H.P., *Life Cycle Cost and Good Practices*. NPRA Maintenance Conference Proceedings. Barringer&Associates, Inc. San Antonio, Texas 1998.
- [21] Barringer H.P., Weber D.P., *Life Cycle Cost Tutorial*. Fifth International Conference on Process Plant Reliability. Gulf Publishing Company. Huston 1997.
- [22] Bartosiewicz J., *Niezawodność narzędzi skrawających*. WNT, Warszawa 1982.
- [23] Bedford T., Meilijson I., *A new approach to censored lifetime variables*. Reliability Engineering and System Safety 51 (1996), 181–187.
- [24] Beichelt F., *Problemy niezawodności i odnowy urządzeń technicznych*. WNT. Warszawa 1974.
- [25] Benjamin J.R., Cornell C.A., *Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów*. WNT, Warszawa 1977.
- [26] Bentley J. P., *Introduction to Reliability and Quality Engineering*. Addison-Wesley Longman Ltd., Edinburgh Gate, Harlow 1999.
- [27] Beynon-Davies P., *Systemy baz danych*. WNT, Warszawa 2003.
- [28] Bhote K.R., *World Class Quality*. AMACOM, New York 1991.
- [29] Biegus A., *Podstawy probabilistycznej analizy bezpieczeństwa konstrukcji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996.
- [30] Bina V., Bielak O., Hakl J., *Prediction of Material Properties Degradation for Integrity and Life-Time Assessment*. W: Proceedings of Symposium on Materials Ageing and Component Life Extension. EMAS, Mediolan 1995.
- [31] Birolini A., *Reliability Engineering. Theory and Practice*. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg 1999.
- [32] Blischke W, Murthy D.N.P., *Reliability. Modeling, Prediction, and Optimization*. John Wiley & Sons, Inc., New York 2000.
- [33] Bobrowski D., *Modele i metody matematyczne w teorii niezawodności*. WNT, Warszawa 1985.
- [34] Bojda K., Dziaduch I., Jodejko-Pietruczuk A., Kwaśniewski S., Młyńczak M., Nowakowski T., Restel F. *Opracowanie systemu wspomaganie zarządzaniem eksploatacją autobusów szynowych w systemie transportu regionalnego*. Raporty Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Seria SPR nr 101/2011, Wrocław 2011.
- [35] Boyer K.K., Pagell M., *Measurement issues in empirical research: improving measures of operations strategy and advanced manufacturing technology*. Journal of Operations Management 18 (2000), 361–374.

- [36] Brandowski A., *Bezpieczeństwo jako nauka. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*. Zeszyt 3 (91) 1992.
- [37] Bukowski L., Warszyński M., *Niezawodność maszyn i urządzeń hutniczych*. Wydawnictwo FORWARD, Kraków 1994.
- [38] Burns A., McDernid J., Dobson J., *On the Meaning of Safety and Security*. The Computer Journal, (1992), Vol. 35, No. 1.
- [39] *Case Studies in Reliability and Maintenance*. Red. Blischke W.R., Murthy P.D.N. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2003.
- [40] Cempel Cz., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN, Warszawa 1989.
- [41] Chmielecki A., *Rzeczy i wartości*. PWN, Warszawa 1999.
- [42] Chorafas D.N., *Procesy statystyczne i niezawodność urządzeń*. WNT, Warszawa 1960.
- [43] Chrószcz B., Hansel J., *Analiza i ocena ryzyka zawodowego*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2011.
- [44] Cichosz P., *Narzędzia skrawające*. WNT, Warszawa 2009.
- [45] Coad P., Yourdon E., *Analiza obiektowa*. Wydawnictwo Read Me, Warszawa 1994.
- [46] *Complex System Maintenance Handbook*. Eds. Kobbacy K.A.H., Murthy D.N.P., Springer Verlag, London 2008.
- [47] Connolly T.M., Begg C.E., *Systemy baz danych. Praktyczne metody projektowania, implementacji i zarządzania*. Wydawnictwo Read Me, Warszawa 2004.
- [48] Cook R.M., Bedford T., *Reliability Databases in Perspective*. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 51, No. 3, Sept. 2002, 294–310.
- [49] Cook R.M., *The design of reliability databases, part I: Review of standard design concepts*. Reliability Engineering and System Safety 51 (1996), 137–146.
- [50] Cook R.M., *The design of reliability databases, part II: competing risk and data compression*. Reliability Engineering and System Safety 51 (1996), 209–223.
- [51] Cox S., Tait R., *Safety, Reliability and Risk Management: an integrated approach*. Reed Educational and Professional Publishing Ltd., Oxford 1998.
- [52] Creswell, J. W., *Educational Research: Planning, Conducting, and Evaluating Quantitative and Qualitative Research*. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New York 2008.
- [53] CRGraph. *Fault Tree Analysis*. 2012. © CRGraph. www.crgraph.com. Dostęp: 03.2012.
- [54] CRGraph. Roninger C., *Design of Experiments & Statistics*. © Curt Ronniger 2012. www.crgraph.com. Dostęp: 03.2012.
- [55] CRGraph. Roninger C., *Reliability Analyses with Weibull*. © Curt Ronniger 2012. www.crgraph.com. Dostęp: 03.2012.
- [56] CRGraph. *System Analysis*. 2012. © CRGraph. www.crgraph.com. Dostęp: 03.2012.
- [57] Czajgucki J.Z., *Niezawodność spalinowych silowni okrętowych*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1984.
- [58] Deshpande J.V., Purohit S.G., *Life Time Data: Statistical Models and Methods*. World Scientific Publishing. Singapore 2005.
- [59] Dhillon B.S., *Engineering Maintainability: How to Design for Reliability and Easy Maintenance*. Elsevier Science & Technology Books 1999.

- [60] Dhillon B.S., *Human Reliability and Error in Transportation Systems*. Springer Verlag Ltd., London 2007.
- [61] Dhillon B.S., *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton 2006.
- [62] Dietrych J., *System i konstrukcja*. WNT, Warszawa 1985.
- [63] Dubi A., *Monte Carlo Applications in Systems Engineering*. John Wiley&Sons, Ltd. Chichester, 2000.
- [64] Dudek D., *Degradacja maszyn roboczych. Teoria czy sztuka?* W: Materiały konferencyjne Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane 1996.
- [65] Dudek D., Młyńczak M., *Atestacja maszyn górnictwa odkrywkowego w aspekcie bezpieczeństwa*. W: Materiały konferencyjne KONBiN'99. ITWL, Warszawa 1999.
- [66] Dudek D., *Zagadnienia zmęczeniowej degradacji maszyn*. W: Materiały konferencyjne Problemy Eksploatacji w Projektach Badawczych, Radom 1996.
- [67] Dudek K., Jankowska-Kuchta E., Młyńczak M., Nowakowski T., Pudło K., Samołyk J., *Założenia techniczno- ekonomiczne systemu sterowania jakością eksploatacyjną floty towarowej transportu śródlądowego: Etap II*. Raport Serii Sprawozdania nr 065/88. Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989.
- [68] Dudek K., Młyńczak M., Nowakowski T., Samołyk J., Słomka A., *Badania trwałości barek BP-500 w rzeczywistych warunkach eksploatacji: Cz. 1 metoda i wyniki badań*. Raport Serii Sprawozdania nr 046/84. Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1984.
- [69] Dyrektywa 2006/42/We Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn, zmieniająca dyrektywę 95/16/WE (przekształcenie).
- [70] Dziaduch I., Młyńczak M. *Database concept in early stage of operation*. W: Advances in safety, reliability and risk management. eds. Bérenguer C., Grall A., Soares G. Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011, Troyes 2011.
- [71] Dziaduch I., Młyńczak, Nowakowski T., Restel F., Werbińska-Wojciechowska S., *Study on maintainability measures of passenger transport system*. European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011, Helsinki 2012 (przyjęty do druku).
- [72] Dziama A., *Metodyka konstruowania maszyn*. PWN, Warszawa 1985.
- [73] Elms D.G., *Achieving structural safety: theoretical considerations*. Structural Safety 21 (1999), 311–333.
- [74] NIST/SEMATECH *e-Handbook of Statistical Methods*, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. Dostęp: 01.2012.
- [75] Evans J.R., Olsen D.L., *Introduction to simulation and risk analysis*. Prentice Hall, New Jersey 2002.
- [76] Findeisen W., Gutenbnaum J., *Modele w analizie systemowej. Analiza systemowa – podstawy i metodologia*. PWN, Warszawa 1985.
- [77] Fishman G.S., *Symulacja komputerowa*. PWE, Warszawa 1981.
- [78] Fragola J.R., *Human reliability analysis procedure*. Tutorial Notes. Materiały Międzynarodowej Konferencji ESREL'01 Safety&Reliability, Turyn 2001.
- [79] Fragola J.R., *Reliability and risk analysis data base development: an historical perspective*. Reliability Engineering and System Safety, No. 51 (1996), 125–136.

- [80] Garvey P.R., *Probability methods for cost uncertainty analysis: a systems engineering perspective*. Marcel Dekker Inc., New York, Basel, 2000.
- [81] Gasparski W. 1988. *Projektoznawstwo*. WNT, Warszawa 1988.
- [82] Gercbach L.B., Kordoński Ch.B., *Modele niezawodnościowe obiektów technicznych*. WNT, Warszawa 1968.
- [83] Gołąbek A., Kuśmidrowicz J., Młyńczak M., Nowakowski T., Skibicka B., *Badania eksploatacyjne samochodów Sanos A14, Kamaz 5320, Skoda Liaz, Fiat 190*. Raport Serii Sprawozdania nr 044/83. Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1983.
- [84] Gołąbek A., Kusz G., Młyńczak M., Nowakowski T., *System informatyczny oceny niezawodności eksploatacyjnej ładowarki Ł-220*. Prace Naukowe Centralnego Programu Badań Podstawowych 02.05, WAT, Warszawa 1988.
- [85] Gołąbek A., Młyńczak M., Nowakowski T., *Analiza niezawodności i trwałości maszyn urabiających o ruchu ciągłym użytkowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji*. W: Prace Naukowe Centralnego Programu Badań Podstawowych 02.05, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
- [86] Gołąbek A., Młyńczak M., Nowakowski T., *Informatyczny system oceny eksploatacyjnej niezawodności maszyn podstawowych w górnictwie odkrywkowym*. Górnictwo Odkrywkowe 1992, R. 33, nr 3/4.
- [87] Gołąbek A., Młyńczak M., Nowakowski T., *Model eksploatacyjny maszyny w świetle badań niezawodnościowych*. W: Krajowe Sympozjum Eksploatacji Urządzeń Technicznych. Sekcja Podstaw Eksploatacji KBM PAN, Radom, Kozubnik 1993.
- [88] Gołąbek A., Młyńczak M., Nowakowski T., *Ocena eksploatacyjnej niezawodności ładowarki Ł-220*. Przegląd Mechaniczny R. 49, nr 18 1990.
- [89] Gołąbek A., Młyńczak M., Nowakowski T., *Ocena parametrów eksploatacyjno-niezawodnościowych silnika SW-400/Ł220*. Silniki Spalinowe R. 30, nr 1/2 1990.
- [90] Gołąbek A., Młyńczak M., Nowakowski T., *Podniesienie poziomu niezawodności i gotowości eksploatacyjnej ładowarek*. Prace Naukowe Centralnego Programu Badań Podstawowych 02.05. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
- [91] Gołąbek A., Młyńczak M., Nowakowski T., *Problemy bezpieczeństwa w eksploatacji autobusów miejskich*. Materiały konferencyjne, Spała 1993.
- [92] Gołąbek A., *Procedury badań i oceny niezawodności maszyn*. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej nr 70, Seria Monografie nr 21. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1992.
- [93] Gordon G., *Symulacja systemów*. WNT, Warszawa 1974.
- [94] Government – Industry Data Exchange Program (GIDEP). [www.gidep.org/](http://www.gidep.org/). Dostęp: 06.2011.
- [95] Griffin R.W., *Podstawy zarządzania organizacjami*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
- [96] *Guidelines for Improving Plant Reliability through Data Collection and Analysis*. Center for Chemical Process Safety. American Institute of Chemical Engineers, New York 1998.
- [97] Gutenbaum J., *Modelowanie matematyczne systemów*. Omnitech Press, Warszawa 1992.

- [98] Haldar A., Reddy R.K., *A random-fuzzy analysis of existing structures*. Fuzzy Sets and Systems 48 (1992).
- [99] Hand D., Manilla H., Smyth P., *Principles of Data Mining*. A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 2001.
- [100] *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Red. Ben-Daya M., Duffua S.O., Raouf A., Knezevic J., Ait-Kadi D., Springer Verlag, London 2009.
- [101] *Handbook of Performability Engineering*. Red.: Misra K.B., Springer Verlag, London 2008.
- [102] *Handbook of Reliability Engineering*. Ed. Ushakov I.A., Harrison R.A., John Wiley & Sons Inc., New York 1994.
- [103] Hansel J., *Metodyka kształtowania bezpieczeństwa transportu pionowego w polskich zakładach górniczych*. Zeszyty Naukowo-Techniczne AGH KTL nr 40, Kraków 2007.
- [104] Hansen D.R., Mowen M.M., Guan L., *Cost Management. Accounting and Control*. South-Western Cengage Learning, Mason 2009.
- [105] Haugen E.B., *Probabilistic Mechanical Design*. John Willey & Sons Inc., New York 1980.
- [106] Hebda M., Janicki D., *Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji*. WKŁ. Warszawa 1977.
- [107] Hebda M., Mazur T., Pelc H., *Teoria eksploatacji pojazdów*. WKŁ, Warszawa 1978.
- [108] Hecht H., *Systems Reliability and Failure Prevention*. Artech House, Inc., Norwood 2004.
- [109] Heger A.S., White J.E., *Using influence diagrams for data worth analysis*. Reliability Engineering and System Safety 55 (1997), 195–202.
- [110] Helton J.C., *Alternative representations of epistemic uncertainty*. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 85 (2004).
- [111] Hokstad P., Frøvig A.T., *The modeling of degraded and critical failures for components with dormant failures*. Reliability Engineering and System Safety 51 (1996), 189–199.
- [112] Hubka V., Eder W.E., *Theory of Technical Systems, A Total Concept Theory for Engineering Design*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1988.
- [113] Iberall A.S., *Toward a General Science of Viable Systems*. McGraw-Hill, New York 1972.
- [114] IEC 60050–191. *Dependability and quality of service, Amendments 1 & 2. International Electrotechnical Vocabulary (IEV 191)*. Based on IEV on-line: <http://domino.iec.ch/iev>.
- [115] IEC 60300-3-11. *Dependability management – Part 3–11: Application guide – Reliability centred maintenance*.
- [116] IEC 60300-3-14 *Zarządzanie niezawodnością. Część 3–14: Przewodnik zastosowań. Obsługiwanie i wspomaganie obsługi*.
- [117] IEC 60300-3-9. *Dependability management – Part 3: Application guide – Section 9: Risk assessment of technological systems*.
- [118] IEC 60812. *Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*.
- [119] *IEEE Guide for Failure Investigation, Documentation, and Analysis for Power Transformers and Shunt Generators*. Chair of IEEE. 1991.



- [120] *Instrukcja bezpieczeństwa lotów lotnictwa Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej*. Decyzja nr 336/MON Ministra Obrony Narodowej z dnia 2 listopada 2004 r.
- [121] *Inżynieria niezawodności. Poradnik*. Red. Migdalski J., Akademia Techniczno-Rolnicza, Ośrodek Badania Jakości Wyrobów „ZETOM”. Bydgoszcz, Warszawa 1992.
- [122] Ireson W.G., Coombs C.R. Jr., Moss R.Y., *Handbook of Reliability Engineering and Management*. McGraw-Hill, New York 1996.
- [123] ISO 13824:2009 Ed. 1.0: *General principles on risk assessment of systems involving structures*.
- [124] ISO 31 000:2009 Ed. 1.0: *Risk Management – Principles and guidelines on implementation*.
- [125] ISO/IEC 31010:2009 Ed. 1.0: *Risk Management – Risk Assessment Techniques*.
- [126] ISO/IEC GUIDE 51:1999 Ed. 1.0 *Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards*.
- [127] ISO/IEC Guide 73:2002 Ed. 1.0 *Risk management – Vocabulary – Guidelines for use in standards*.
- [128] Jaźwiński J., Borgoń J., *Niezawodność eksploatacyjna i bezpieczeństwo lotów*. WKiŁ, Warszawa 1989.
- [129] Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K., *Bezpieczeństwo systemów*. PWN, Warszawa 1993.
- [130] JCSS, Joint Committee on Structural Safety. [www.jcss.ethz.ch](http://www.jcss.ethz.ch). Dostęp: 03.2011.
- [131] Jelcz PR 110U. *Zmiany do katalogu części zamiennych*. Jelczańskie Zakłady Samochodowe. Wydawnictwo Wspólna Sprawa, 1977.
- [132] Joan-Arinyo R., Hoffmann C.M., *Distributed maintenance of multiple product views*. Computer-Aided Design 32 (2000), 421–431.
- [133] Jodejko-Pietruczuk A., Młyńczak M., Zając M., *Assessment of economical lifetime of heavy-duty machines. Case study*. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, ESREL 2009. A.A. Balkema, Monachium, Praga 2009.
- [134] Johnson C., *Handbook of Incident and Accident Reporting*. Glasgow University Press, Glasgow 2003.
- [135] Jones J., Johnson E., *Database Modeling and Design in Information Systems*. CA ERwin Data Modeler. [www.ca.com/erwin/msdn](http://www.ca.com/erwin/msdn). Dostęp: 03.2012.
- [136] Jones J.A., Hayes J.A., *Use of a failure database for improvement of product reliability*. Reliability Engineering and System Safety. No. 55 (1997), 131–134.
- [137] Jones-Lee M., Aven T., *ALARP – What does it really mean?* Reliability Engineering and System Safety 96 (2011), 877–882.
- [138] Kamiński A, *Metoda, technika, procedura badawcza w pedagogice empirycznej*; Materiały: Metodologia pedagogiki społecznej. Red. Wroczyński R., Pilch T., Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk 1974.
- [139] Kardach K., Prus L., *Microprocessor controlled multipoint data acquisition system for investigation of mechanical constructions*. Mikroprocesory. Dydaktyka i zastosowania. VII Seminarium naukowe, Wrocław, 25–28 maja 1986, Wyd. WSI, Zielona Góra 1987.
- [140] Karpiński J., Firkowicz S., *Zasady profilaktyki obiektów technicznych*. PWN, Warszawa 1981.

- [141] Kierzkowski A., *Model procesu eksploatacji obiektu technicznego z ograniczeniami czasowymi*. Raport Serii PRE nr 2/2012. Rozprawa doktorska. Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2012.
- [142] Kiliński A., *Jakość*. WNT, Warszawa 1979.
- [143] Kindlarski E., *Jakość wyrobów*. PWN, Warszawa 1988.
- [144] Kletz T., *HAZOP and HAZAN. Identifying and Assessing Process Industry Hazards*. Institution of Chemical Engineers, Rugby 1992.
- [145] Klir G.J., *Uncertainty and Information. Foundations of Generalized Information Theory*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey 2006.
- [146] Kolman R., *Ilościowe określenie jakości*. PWE, Warszawa 1973.
- [147] Kołodziński E., *Metody symulacyjne badania systemów*. Wydawnictwo WAT, Warszawa 1984.
- [148] Kondratowicz L., *Modelowanie symulacyjne systemów*. WNT, Warszawa 1978.
- [149] Konieczny J., Olearczuk E., Żelazowski W., *Elementy nauki o eksploatacji*. WNT, Warszawa 1969.
- [150] Konieczny J., *Wstęp do teorii eksploatacji urządzeń*. WNT, Warszawa 1971.
- [151] Kopczyk J., Kwaśniak M., Prus L., *System pomiarowo-akwizycyjny z transmisją danych za pomocą łączności GSM*. Górnictwo Odkrywkowe. R. 45, nr 2/3. Wrocław 2003.
- [152] Kopociński B., *Zarys teorii odnowy i niezawodności*. PWN, Warszawa 1973.
- [153] Korzeń Z., Młyńczak M., Nowakowski T., *System informatyczny do monitorowania procesu eksploatacji maszyn dołowych w kopalniach rudy miedzi*. W: Efektywne prowadzenie wyrobisk w trudnych warunkach górniczo-geologicznych. Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna. Szczyrk. Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG. Gliwice, 2000.
- [154] Kossiakoff A., Sweet W.N., Seymour S.J., Biemer S.M., *Systems Engineering Principles and Practice*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2011.
- [155] Kowalski K., Młyńczak M., *Problematyka gotowości systemów uzbrojenia we wczesnej fazie eksploatacji*. Motorola, Lublin 2009.
- [156] Kozłowski Z., *Dyspozycyjność układu KTZ KWB Belchatów S.A. w różnych fazach eksploatacji złoża*. Węgiel Brunatny. Wydanie specjalne. Warszawa, 2000.
- [157] Krick E.V., *Wprowadzenie do techniki i projektowania technicznego*. WNT, Warszawa 1971.
- [158] Kudyba S., *Managing Data Mining Advice from Experts*. IT Solutions Series. CyberTech Publishing, Hershey PA 2004.
- [159] Kulczyk J., Młyńczak M., Nowakowski T., Tabaczek T., *Reliability analysis of propulsion system (Analiza niezawodności układu napędowego pchaczy rzecznych)*. W ramach europejskiego programu INBAT Task T47 Innovative Barge Trains for Effective Transport on Shallow Waters. Raport serii Sprawozdania – 015/03, IKiEM Politechnika Wrocławska, Wrocław 2003.
- [160] Kumamoto H., Henley E. J., *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists*. IEEE Press. New York 1996.
- [161] Kunreuther Howard C., Ley Eryl V., *The Risk Analysis Controversy*. Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York 1982.

- [162] Kurnar U.D., Crocker J., Chitra T., Saranga H., *Reliability and Six Sigma*. Springer Science+Business Media, Inc., New York 2006.
- [163] *Ładowarka Ł220. Katalog części zamiennych*. Fabryka Maszyn Budowlanych BUMAR-FADROMA. AGPOL, Wrocław 1986.
- [164] *Ładowarka ŁK1. Katalog części zamiennych*. Fabryka Maszyn Budowlanych BUMAR-FADROMA. AGPOL, Wrocław 1986.
- [165] Langseth H., Haugen K., Sandtorv H., *Analysis of OREDA data for maintenance optimization*. Reliability Engineering and System Safety, No. 60 (1998), 103–110.
- [166] Lannoy A., Procaccia H., *The EDF failure reporting system process. Presentation and prospects*. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 51 (1996).
- [167] *Learning from Catastrophes Strategies for Reaction and Response*. Red. Kunreuther H., Useem M., Pearson Education, Inc., New Jersey 2010.
- [168] Leszek W., Mazurkiewicz A., Trzos M., *Projektowanie eksperymentalnych systemów badawczych w budowie i eksploatacji maszyn*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1999.
- [169] *Life Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program*. National Institute of Standards and Technology Handbook 135, Washington 1986.
- [170] Ligęza A., *Konstruowanie Baz Danych Relacyjny Model Danych II*. Materiały szkoleniowe, Studia podyplomowe z zakresu wytwarzania oprogramowania oraz zarządzania projektami w firmach informatycznych. <http://home.agh.edu.pl> 2012.
- [171] Lisnianski A., Levitin G., *Multi-state System Reliability*. World Scientific Publishing Inc., New Jersey 2003.
- [172] *Lubrication and Maintenance of Industrial Machinery. Best Practices and Reliability*. Red. Gresham R.M., Totten G.E., CRC Press. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton 2009.
- [173] Łuczak A., Mazur T., *Fizyczne starzenie elementów maszyn*. WNT, Warszawa 1981.
- [174] *Maintenance Engineering Handbook*. ed. Mobley R.K., McGraw-Hill, New York 2008.
- [175] *Mały słownik cybernetyczny*. Red. Kempisty M., Wiedza Powszechna, Warszawa 1973.
- [176] *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*. Red. Lindqvist Bo.H., Doksum K.A. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore 2003.
- [177] Maturana H., Varela F., *Autopoiesis and Cognition*. Reidel, Boston 1979.
- [178] Mazur T., Małek A., *Zarządzanie eksploatacją systemów technicznych*. WNT, Warszawa 1979.
- [179] Mazurkiewicz A., *Transformacja wiedzy w budowie i eksploatacji maszyn*. ITE, Radom 2002.
- [180] McFadden F.R., Hoffer J.A., *Modern Database Management*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Redwood City, California 1994.
- [181] McLinn J., *A Short History of Reliability*. <http://theRIAC.org>. 06.2011.
- [182] McPherson J.W., *Reliability Physics and Engineering. Time-To-Failure Modeling*. Springer, New York 2010.
- [183] Meywerk M., *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2007.

- [184] MIL-HDBK-217F 1991. *Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment*. Washington, DC 20301.
- [185] MIL-STD-1629, *Procedures for Performing a Failure Modes Effects and Criticality Analysis*. US Department of Defense. Washington DC 20363-5100 1980.
- [186] MIL-STD-470A, *Designing and Developing Maintainable Products and Systems*. US Department of Defense. Washington DC. 20360 1997.
- [187] MIL-STD-472, *Maintainability Prediction*. US Department of Defense. Washington DC. 20360 1966.
- [188] MIL-STD-781D, *Military Standard Reliability Testing For Engineering Development, Qualification, and Production*. US Department of Defense. Washington, DC 20363-5100 1986.
- [189] MIL-STD-882B, *System Safety Program Requirements*. US Department of Defense. Washington DC 20363-5100 1984.
- [190] Młyńczak M., *Analiza kosztów eksploatacyjnych z uwzględnieniem niezawodności obiektu*. Materiały XXVI Szkoły Zimowej Niezawodności. Sekcja Podstaw Eksploatacji, Polska Akademia Nauk, Szczyrk 2007.
- [191] Młyńczak M., *Failure models of mechanical objects*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. 2010. vol. 45, z. 3.
- [192] Młyńczak M., *Komputerowa baza danych dla maszyn górnictwa odkrywkowego*. Trzecie Konwersatorium Bezpieczeństwo oraz Degradacja Maszyn. IKiEM Politechnika Wroclawska, Wrocław – Szklarska Poręba 1997.
- [193] Młyńczak M., *Kryteria oceny ryzyka w eksploatacji maszyn*. I Konwersatorium „Bezpieczeństwo oraz degradacja maszyn”, Wrocław 1995.
- [194] Młyńczak M., *Machine Safety in the Aspect of Degradation Theory*. SYSTEMS, Journal of Transdisciplinary Systems Science, (1998), Vol. 3, No. 2, 26–34.
- [195] Młyńczak M., *Maintenance modeling of degrading objects*. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, ESREL'99. A.A. Balkema, Monachium 1999.
- [196] Młyńczak M., *Metodyka analizy i oceny bezpieczeństwa niezawodności maszyn*. Raporty Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Seria SPR nr 6/1998. Wrocław 1998.
- [197] Młyńczak M., *Metodyka gromadzenia informacji w analizie niezawodności i bezpieczeństwa maszyn*. Drugie Konwersatorium Bezpieczeństwo oraz Degradacja Maszyn. IKiEM Politechnika Wrocławskiej, Wrocław – Szklarska Poręba 1996.
- [198] Młyńczak M., *Modelowanie eksploatacji maszyn w badaniach bezpieczeństwa*. Materiały konferencyjne Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych. Sekcja Podstaw Eksploatacji KBM PAN, Zakopane 1995.
- [199] Młyńczak M., *Modelowanie struktur maszyn w bazach danych*. Materiały XXVI Szkoły Zimowej Niezawodności. Sekcja Podstaw Eksploatacji, Polska Akademia Nauk, Szczyrk 1998.
- [200] Młyńczak M., Nowakowski T., *Analiza uszkodzalności koparek kołowych w polskim górnictwie odkrywkowym*. Węgiel Brunatny. Wyd. specjalne, (2000), 14–18.

- [201] Młyńczak M., Nowakowski T., *Eksplatacja, niezawodność, bezpieczeństwo maszyn. Metody i koncepcje wykorzystania wyników badań*. W: *Maszyny XXI wieku*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- [202] Młyńczak M., Nowakowski T., *Rank reliability assessment of the technical object at early design stage with limited operational data. Case Study*. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, ESREL'05, Gdynia 2005.
- [203] Młyńczak M., Nowakowski T., Vališ D., *Jak zarządzać ryzykiem?: podejście normatywne*. Problemy Eksploatacji, nr 1/2011.
- [204] Młyńczak M., Nowakowski T., Wiśniewski P., *Problemy wykorzystania systemów CAD/CAM w zadaniach inżynierii niezawodności*. Materiały XXVIII Zimowej Szkoły Niezawodności, PAN, Szczyrk, 2000.
- [205] Młyńczak M., *Ocena stopnia degradacji urządzeń technicznych z wykorzystaniem logiki rozmytej*. Materiały XXIX Szkoły Zimowej Niezawodności. Sekcja Podstaw Eksploatacji, Polska Akademia Nauk, Szczyrk 2001.
- [206] Młyńczak M., *Preventive Maintenance Simulation of Continuous Operation Process with Random Stops*. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, ESREL'01, Turyn 2001.
- [207] Młyńczak M. *Problemy analizy uszkodzeń w badaniach eksploatacyjnych*. Górnictwo Odkrywkowe, R. 49, nr 3/4, 2007.
- [208] Młyńczak M., *Reliability and Safety Assessment of Multistate Object Using Simulation*. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, ESREL'98, A.A. Balkema. Trondheim 1998.
- [209] Młyńczak M., *Reliability and Safety Criteria in Mechanical Object Modeling*. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, ESREL'02 and  $\mu$ 13, Lion 2002.
- [210] Młyńczak M., *Safety Analysis in Operation and Design of Means of Transport*. Archives of Transport PAN, nr 1–2/97, 41–50 (1997), Warszawa.
- [211] Młyńczak M., *Safety Analysis in Operation and Design of Open Pit Machines*. Advances in Safety and Reliability. Proceedings of the ESREL'97, International Conference on Safety and Reliability. Elsevier Science, Pergamon, Lisbona 1997.
- [212] Młyńczak M., *Structures of a Technical Object- Basis of its Exploitations Evaluation*. SYSTEMS, Journal of Transdisciplinary Systems Science, (2001), Vol. 6, No. 1–2, 170–176.
- [213] Młyńczak M., *Symulacyjne badania niezawodności na przykładzie autobusu miejskiego Jelcz PR110U*. Praca doktorska. Raport Serii Preprinty nr 071/80. Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
- [214] Młyńczak M., Wiewiórko B., *Złożone systemy maszynowe w analizie niezawodności bezpieczeństwa*. Konferencja Przeglądowa Programów Badawczych KBN. Radom 1996.
- [215] Młyńczak M., *Zmienność struktur maszyn w długotrwałej eksploatacji*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, PAN, KBM, ITE Radom 2003.
- [216] Młyńczak M.; *Symulacja struktury niezawodności w procesie eksploatacji*. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Badania symulacyjne w technice samochodowej”. PAN, Politechnika Lubelska, Lublin 1993.

- [217] Modarres M., Cheon S.W., *Function-centered modeling of engineering systems using the goal tree-success tree technique and functional primitives*. Reliability Engineering and System Safety, 64 (1999), 181–200.
- [218] Modarres M., Kaminsky M., Kritzov V., *Reliability Engineering and Risk Analysis. A Practical Guide*. Marcel Dekker, Inc., New York 1999.
- [219] *Modelowanie i symulacja systemów eksploatacji maszyn*. Red. Cygan Z., Zięba S., PWN, Warszawa 1987.
- [220] Moubray J., *RCM- an Introduction*. 1 International Society of Automotive Engineers: JA1011- Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM). Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE Publications, 2000.
- [221] Murthy D.N.P., Rausand M., Østerås T., *Product reliability: specification and performance*. Springer series in reliability engineering, London 2008.
- [222] Murthy D.N.P., Xie M., Jiang R., *Weibull models*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken 2004.
- [223] Mykowiecki T., *dBase, Foxbase – bazy danych*. WNT, Warszawa 1992.
- [224] Nagabhushana S., *Data Warehousing. OLAP and Data Mining*. New Age International (P) Limited, Publisher. New Delhi 2006.
- [225] Nakagava T., *Advanced Reliability Models and Maintenance Policies*. Springer Verlag, London 2008.
- [226] Nelson W., *Applied Data Life Analysis*. John Willey & Sons, New York 1982.
- [227] *Niezawodność autobusów*. Praca zbiorowa pod red. A. Gołąbek, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993.
- [228] *Niezawodność i eksploatacja systemów*. Red. Zamojski W. Skrypt Politechniki Wrocławskiej. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1981.
- [229] Niziński S., Pelc H., *Diagnostyka urządzeń mechanicznych*. WNT, Warszawa 1980.
- [230] Niziński S., Wierzbicki S., *Model kosztów eksploatacji obiektów technicznych*. Materiały IX Kongresu Eksploatacji Urządzeń technicznych. Sekcja Podstaw Eksploatacji KBM PAN, Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu. Wydawnictwo ITE, Radom 2001.
- [231] Nowakowski T., *Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych*. Monografia habilitacyjna. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [232] Nowakowski T., *Wpływ warunków użytkowania na niezawodność pojazdu na przykładzie autobusu miejskiego Jelcz PR110U*. Praca doktorska. Raport Serii Preprinty nr 047 (647)/80. Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
- [233] O'Connor P.D.T., *Practical Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, Inc. A Wiley-Interscience Publication. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore 1985.
- [234] *Ogólna teoria systemów*. Red. G.J. Klir. WNT, Warszawa 1976.
- [235] Okręgliński W., Łopuszyński B. 1980. *Użytkowanie urządzeń mechanicznych*. WNT, Warszawa 1980.
- [236] Olearczuk E., *Zarys teorii użytkowania urządzeń technicznych*. WNT, Warszawa 1972.
- [237] Oprzędkiewicz J., *Niezawodność maszyn*. Skrypty uczelniane Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1981.

- [238] Oprzędkiewicz J., *Podstawy niezawodności obrabiarek*. WNT, Warszawa 1989.
- [239] Oziemski S., *Efektywność eksploatacji maszyn*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Wydawnictwo ITE w Radomiu, Radom 1999.
- [240] Pahl G, Beitz W., *Nauka konstruowania*. WNT, Warszawa 1984.
- [241] Perkowski P., *Technika symulacji cyfrowej*. WNT, Warszawa 1980.
- [242] Pesonen L.T.T., *Implementation of design to profit in a complex and dynamic business context*, University of Oulu, Finland, Oulu 2001.
- [243] Peters O.H., Meyna A., *Handbuch der Sicherheitstechnik*. Carl Hanser Verlag, Muenchen, Vien 1995.
- [244] Piasecki S., *Elementy teorii niezawodności i eksploatacji obiektów o elementach wielostanowych*. Instytut Badań systemowych PAN, Warszawa 1995.
- [245] Pieter J., *Ogólna metodologia pracy naukowej*. Ossolineum, Wrocław 1967.
- [246] *Planowanie i podejmowanie decyzji w przedsiębiorstwie*. Red. Multan E. W: Zarządzanie w przedsiębiorstwie. Red. Kardas J.S., Wójcik-Augustyniak M., Difin, Warszawa 2008.
- [247] Płoski Z., *Słownik Encyklopedyczny – Informatyka*. Wydawnictwa Europa, Wrocław 1999.
- [248] Pluta W., *Wielowymiarowa analiza porównawcza w modelowaniu ekonometrycznym*. PWN, Warszawa 1986.
- [249] *Podręcznik użytkownika Life Data- Weibull 7+*. Reliasoft, www.weibull.com. Dostęp: 03.2010.
- [250] *Podstawy eksploatacji obiektów technicznych*. Red. Figurski J., MCNEMT, Radom 1990.
- [251] *Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn*. Red. Woropay M., Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Bydgoszcz, Radom 1996.
- [252] Polska Norma PN-77/N-04005. *Wskaźniki niezawodności. Nazwy, określenia, symbole*.
- [253] Polska Norma PN-77/N-04010. *Niezawodność w technice – Wybór wskaźników niezawodności*.
- [254] Polska Norma PN-80/N-30000. *Jakość wyrobów. Terminologia ogólna*.
- [255] Polska Norma PN-83/N-04041/00. *Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Wytyczne ogólne opracowywania programu zapewnienia niezawodności obiektów technicznych*.
- [256] Polska Norma PN-85/N-04041/04. *Struktury niezawodnościowe systemów technicznych*.
- [257] Polska Norma PN-93/N-050191. *Słownik terminologiczny elektryki. Niezawodność, jakość usługi*.
- [258] Polska Norma PN-EN 60300-2. *Zarządzanie niezawodnością. Elementy i zadania programu niezawodności*.
- [259] Polska Norma PN-EN 60300-3-1. *Zarządzanie niezawodnością. Techniki analizy niezawodności. Przewodnik metodologiczny*.
- [260] Polska Norma PN-EN 60300-3-5. *Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań. Część 3–5. Warunki badań nieuszkodzalności i zasady badań statystycznych*.
- [261] Polska Norma PN-EN 60300-3-9. *Analiza ryzyka w systemach technicznych*.
- [262] *Popularna encyklopedia powszechna*. Oficyna Wydawnicza FOGRA, Kraków 1999.

- [263] *Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne*. Red. Migdalski J., Wydawnictwo WEMA, Warszawa 1982.
- [264] Pörn K., *The two-stage Bayesian method used for the T-Book application*. Reliability Engineering and System Safety 51 (1996), 169–179.
- [265] Pritchard C.L., *Risk Management. Concepts and Guidance*. ESI International, Arlington 2001.
- [266] *Problemy badawcze w eksploatacji wybranych obiektów technicznych*. Red. Szybka J., Lenkiewicz W., Monografie Zespołu Systemów Eksploatacji PAN KBM SPE. Wydawnictwo ITEE, PNTTE. Warszawa 2010.
- [267] Przystupa F.W., *Diagnozer w systemie technicznym. Od ontologii i aksjologii do praktyki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
- [268] Przystupa F.W., Młyńczak, M., Nowakowski, T., *Struktura diagnostyczna obiektu rozległego na przykładzie przenośników taśmowych*. Materiały VI Konferencji O&O, Bezpieczeństwo i Niezawodność, Szczecin 2002, 261–268.
- [269] Qureshi Z.H., *A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Critical Socio-technical Systems*. Command, Control, Communications and Intelligence Division. Defence Science and Technology Organisation, Edinburgh, South Australia 2008.
- [270] Rackwitz R., *The Philosophy Behind the Life Quality Index and Empirical Verification*. Basic Documents on Risk Assessment in Engineering. Document #4. Joint Committee of Structural Safety, 2008.
- [271] Radkowski S., *Podstawy bezpiecznej techniki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [272] Rasmussen J., *Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*. Elsevier Science, Amsterdam 1986.
- [273] Rausand M., Øien K., *The basic concepts of failure analysis*. Reliability Engineering & System Safety, Vol. 53, Issue 1, (1996).
- [274] *Reliability and Safety Analysis under Fuzziness*. Red. Onisawa T., Kacprzyk J., Physica-Verlag, Heidelberg 1995.
- [275] *Reliability Data Sources*. Red. Marvin Rausand. Norwegian University of Science and Technology (NTNU). [www.ntnu.edu/ross/info/data](http://www.ntnu.edu/ross/info/data). Dostęp: 06.2011.
- [276] *Reliability Engineers Toolkit*. Rome Airforce Development Center (RADC) 1993. [www.quanterion.com](http://www.quanterion.com). Dostęp: 03.2012.
- [277] Rinne H., *The Weibull Distribution. A Handbook*. Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group. Boca Raton 2009.
- [278] *Risks in Technological Systems*. Red. Göran Grimvall G., Holmgren A.J., Jacobsson P., Thedéen T., Springer Verlag London Limited, Londyn 2010
- [279] Robbins S.P., De Cenzo D.A., *Podstawy zarządzania*. PWE, Warszawa 2002.
- [280] Rosowsky D.V., *Structural Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press LLC 1999.
- [281] Roth K.-H., *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1–3*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1994.
- [282] Rothbart H.A., Brown, Jr. T.H., *Mechanical Design Handbook*. McGraw-Hill, New York 2006.



- [283] *Rozporządzenia ministra transportu z dnia 19 marca 2007r. w sprawie systemu zarządzania bezpieczeństwem*. Dziennik Ustaw 2007 nr 60, poz.407.
- [284] Rumble Jr. J.R., Smith F.J., *Database Systems in Science and Engineering*. Adam Hilger, IOP Publishing Ltd. Bristol, Philadelphia, New York 1990.
- [285] Russell R., Taylor B.W. III, *Operations Management – 5th Ed*. John Wiley & Sons, Inc., University of Tennessee at Chattanooga 2006.
- [286] Ruta R., Mazurkiewicz A., *Modelowanie symulacyjne systemów eksploatacji*. MCNEMT, Radom 1991.
- [287] Sadowski W., *Podstawy ogólnej teorii systemów*. PWN, Warszawa 1978.
- [288] Sandtorv H.A., Hokstad P., Thompson D.W., *Practical experiences with a data collection project: the OREDA project*. Reliability Engineering and System Safety No. 51, 1996.
- [289] Skyttner L., *General Systems Theory. Problems, Perspectives, Practice*. World Scientific Publishing Co. Singapore 2005.
- [290] Slack N., Chambers S., Johnston R., *Operations Management (4th Edition)*, Harlow: Pearson Education 2004.
- [291] Smalko Z., *Podstawy eksploatacji technicznej pojazdów*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [292] Smalko Z., *Podstawy projektowania niezawodnych maszyn i urządzeń mechanicznych*. WNT, Warszawa 1972. Wyd. 2, elektroniczne 2005.
- [293] Smalko Z., *Studium terminologiczne inżynierii bezpieczeństwa transportu*. Navigator nr 21. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
- [294] Smith D.J., *Reliability, Maintainability and Risk*. Elsevier Ltd., Amsterdam 2005.
- [295] Sołowiew A.D., *Analityczne metody w teorii niezawodności*. WNT, Warszawa 1983.
- [296] Sørensen J.D., *Basic Reliability Theory*. Draft material, Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg 2003.
- [297] Spurgin A.J., *Human Reliability Assessment Theory and Practice*. Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton 2010.
- [298] Stapelberg R.F., *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*. Springer Verlag, London 2009.
- [299] Štorga M., Pavković N., Marjanović D., *Computer aided product structure design* Proceedings of International Design Conference – Design 2000, Dubrovnik 2000.
- [300] Streicher H., Rackwitz R., *Structural optimization- a one level approach*. W: Conference proceedings “Reliability-Based Design and Optimization”. Center of Excellence for Advanced Materials and Structures. IPPT, PAN, Warszawa 2002.
- [301] *Structural Engineering Handbook*. Red. Chen Wai-Fah. Boca Raton, CRC Press LLC, 1999.
- [302] Studenski R., *Kierowanie firmą bez wypadków i chorób zawodowych*. Wydawnictwo Tarbonus, Tarnobrzeg, 2000.
- [303] Suchodolski S., *Pojęcie i miary bezpieczeństwa w piśmiennictwie światowym. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*. PAN, KBM, ITE Radom 1995.
- [304] *System Safety Handbook*. American Society of Safety Engineers. www.asse.org. Dostęp: 03.2012.

- [305] Szybka J., *Prognozowanie niezawodności urządzeń mechanicznych funkcjonujących w układach z rezerwą*. Rozprawy monograficzne nr 34. Wydawnictwo AGH, Kraków 1966.
- [306] Szpytko J., Smoczek J., *Adaptacyjny system sterowania środkami transportu klasy WSUT*. Logistyka nr 6 2008.
- [307] Teorey T.J., *Database Modeling and Design*. Lecture notes. University of Michigan, 2000.
- [308] *Teoria systemów*. Red. Stanicki T., skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1975.
- [309] *The Fast Guide to OEE™*. Vorne Industries Inc., Itasca, IL USA. [www.vorne.com](http://www.vorne.com), [www.oee.com](http://www.oee.com). Dostęp: 03.2012.
- [310] *The Reliability of Mechanical Systems*. Red. Davidson J. Mechanical Engineering Publications Limited for The Institution of Mechanical Engineers, London 1994.
- [311] Thomsen E., *OLAP solutions. Building Multidimensional Information Systems*. John Wiley & Sons, Inc., New York 2002.
- [312] Todinov M.T., *Risk-Based Reliability Analysis and Generic Principles for Risk Reduction*. Elsevier Science & Technology Books, 2006.
- [313] Tumer I.Y., Stone R.B., *Mapping function to failure mode during component development*. Research in Engineering Design, 14 (2003), 25–33.
- [314] Turney P.B.B., *Activity-Based Costing an Emerging Foundation for Performance Management*. Cost Technology, Inc. [www.sas.com/resources/whitepaper/wp\\_5073.pdf](http://www.sas.com/resources/whitepaper/wp_5073.pdf). Dostęp: 11.2011.
- [315] Tylicki H., Żółtowski B., *Rozpoznawanie stanu maszyn*. Wydawnictwo Naukowe ITE – PIB, Radom, Bydgoszcz 2010.
- [316] Tyszer J., *Symulacja cyfrowa*. WNT, Warszawa 1978.
- [317] Ullman J.D., Widom J., *Podstawowy wykład z systemów baz danych*. WNT, Warszawa 2000.
- [318] van Beek A., *Advanced Engineering Design Lifetime Performance and Reliability*. TU Delft 2006.
- [319] Villemeur A., *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment*. John Wiley & Sons, Inc. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore 1992.
- [320] Wallen A. *Activity-Based Costing*. US Air Force. [www.dau.mil/conferences/presentations/2002/briefings/S2T6-ABC\\_AndrewWallen.pdf](http://www.dau.mil/conferences/presentations/2002/briefings/S2T6-ABC_AndrewWallen.pdf). Dostęp: 11.2011.
- [321] Wasson C.S., *System Analysis, Design and Development*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken 2006.
- [322] Ważyńska-Fiok K., Jaźwiński J., *Niezawodność systemów technicznych*. PWN, Warszawa 1990.
- [323] Werbinska S., Nowakowski T., *On Problems of Multicomponent System Maintenance Modeling*. International Journal of Automation and Computing 6(4) November 2009.
- [324] Wixson J.R., *Function Analysis and Decomposition using Function Analysis System Technique*. Proceedings of SAVE (Society of American Value Engineers) International Conference 1999.
- [325] Woropay M., Knopik L., Landowski B., *Modelowanie procesów eksploatacji w systemie transportowym*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. ITE, Radom 2001.

- [326] Zieja M. *Analiza systemów informatycznych służących do oceny bezpieczeństwa lotów statków powietrznych*. W: Materiały konferencyjne KONBiN'2008. ITWL, Warszawa 2008.
- [327] Zio E., *An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis*. World Scientific Publishing Co. Re. Ltd. Singapore 2007.
- [328] Zio E., *Reliability engineering: Old problems and new challenges*. Reliability Engineering and System Safety 94 (2009), 125–141.
- [329] Żółtowski B., Niziński S., *Informatyczne systemy zarządzania eksploatacją obiektów technicznych*. MARKAR – BŻ. Olsztyn, Bydgoszcz 2001.
- [330] Żółtowski B., Niziński S., *Modelowanie procesów eksploatacji maszyn*. MARKAR – BŻ. Białe – Błota 2002.
- [331] Żółtowski B., Niziński S., *Zarządzanie eksploatacją obiektów technicznych za pomocą rachunku kosztów*. MARKAR – BŻ. Zielonka 2002.
- [332] Żółtowski B., *Podstawy diagnostyki maszyn*. Wydawnictwa Uczelniane ATR. Bydgoszcz 1997.
- [333] Żur T., *Przenośniki taśmowe w górnictwie*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1979.
- [334] Żurek J., *Modelowanie nadążnych systemów bezpieczeństwa*. Wydawnictwa Naukowe ITE, Radom 2010.