

Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej



100100377471

**TOMASZ
NOWAKOWSKI**

**NIEZAWODNOŚĆ
SYSTEMÓW
LOGISTYCZNYCH**



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Tomasz Nowakowski

**NIEZAWODNOŚĆ SYSTEMÓW
LOGISTYCZNYCH**



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2011

Recenzenci
Dionizy DUDEK
Zbigniew SMALKO

Opracowanie redakcyjne
Alina KACZAK

Korekta
Katarzyna SOSNOWSKA
Agnieszka ŚCIEPURO

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 2011

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
www: oficyna.pwr.wroc.pl; oficwyd@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-594-4

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 477/2011.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp.....	5
2. Rola logistyki we współczesnej gospodarce.....	8
2.1. Polityka logistyczna Unii Europejskiej.....	11
2.2. Polityka logistyczna Polski.....	22
2.3. Cele funkcjonowania logistyki.....	24
2.4. Przykłady najlepszych rozwiązań logistycznych.....	29
3. System logistyczny.....	36
3.1. Pojęcie systemu.....	36
3.1.1. Definicja systemu.....	38
3.1.2. Definicja procesu.....	43
3.2. Logistyka.....	45
3.2.1. Pojęcie logistyka.....	45
3.2.2. Definicja systemu logistycznego.....	47
3.2.3. Klasyfikacja systemów logistycznych.....	48
3.2.3. Struktura systemów logistycznych.....	58
3.2.4. Procesy logistyczne.....	61
3.2.5. Systemy wsparcia logistycznego.....	66
3.2.6. Przykład – stan infrastruktury logistycznej w Polsce.....	67
3.3. Modele systemów logistycznych.....	69
3.3.1. Model elementu systemu.....	69
3.3.2. Model systemu.....	72
3.3.3. Przykład – model systemu logistycznego Polski.....	75
3.4. Miary oceny systemów logistycznych.....	78
4. Koncepcje niezawodności systemu.....	89
4.1. Podstawowe definicje.....	89
4.2. Miary niezawodności.....	97
4.3. Przykład oceny gotowości systemu logistycznego.....	99
5. Modele niezawodności elementu technicznego.....	102
5.1. Model niezawodności elementu nieodnawialnego.....	102
5.2. Model niezawodności elementu odnawialnego.....	106
5.2.1. Model procesu odnowy elementu z pomijalnym czasem odnowy.....	107
5.2.2. Model procesu odnowy elementu z niepomijalnym czasem odnowy.....	111
6. Modele niezawodności elementu logistycznego.....	115
6.1. Model niezawodności elementu nieodnawialnego.....	115
6.1.1. Przykład oceny niezawodności procesu zaopatrzenia.....	122
6.1.2. Przykład oszacowania wskaźnika OTIF.....	125
6.1.3. Przykład niezawodnościowej oceny procesu magazynowania.....	128
6.2. Modele niezawodności elementu odnawialnego.....	133
6.2.1. Niezawodność elementu z pomijalnym czasem odnowy.....	133
6.2.2. Niezawodność elementu z niepomijalnym czasem odnowy.....	137
6.2.3. Funkcja gotowości nadsystemu z rezerwą czasową.....	141
6.2.4. Przykład procedur odnowy elementu logistycznego.....	144

7. Modele niezawodności systemu technicznego.....	146
7.1. Proces Markowa.....	148
7.2. Procesy semimarkowskie.....	151
8. Modele niezawodności systemu logistycznego.....	156
8.1. Wielofazowy model niezawodności.....	157
8.2. Przykład analizy modelu fazowego niezawodności systemu.....	166
8.3. Przykład modelu niezawodności systemu transportu intermodalnego.....	171
8.3.1. Trójfazowy model niezawodności systemu transportu intermodalnego.....	171
8.3.2. Pięciofazowy model niezawodności systemu transportu intermodalnego (proces Markowa).....	177
8.3.3. Pięciofazowy model niezawodności systemu transportu intermodalnego (proces semi-Markowa).....	183
8.3.4. Porównanie modeli.....	189
9. Podsumowanie.....	192
Literatura.....	202

1. WSTĘP

Nauka o niezawodności obiektów technicznych rozwija się już od ponad pięćdziesięciu lat. Od przełomu lat 50. i 60. XX wieku dopracowano się zarówno znaczących modeli teoretycznych, jak i zastosowań przemysłowych. Ciągłe pojawiają się nowe problemy praktyczne, wymagające poszukiwań w obszarze zagadnień teoretycznych. Ta aktywność przejawia się w setkach czy nawet tysiącach artykułów naukowych prezentowanych corocznie na konferencjach naukowych i publikowanych w czasopiśmie o szeroko rozumianych zagadnieniach niezawodności. Przykładem takiej aktywności na terenie Europy mogą być konferencje ESREL (*European Safety and Reliability Conference*) gromadzące 400–500 uczestników ze wszystkich krajów europejskich i innych kontynentów. W Polsce każdego roku odbywa się parę konferencji tematycznych, a największą tradycję ma Zimowa Szkoła Niezawodności PAN, która w ciągu 40 lat istnienia stworzyła liczące się środowisko naukowe.

Na początku XXI wieku dokonano analizy stanu nauki o niezawodności [227]. Do przyszłościowych kierunków rozwoju tej dziedziny, obok „klasycznych” zagadnień sterowania jakością i niezawodnością w produkcji masowej oraz problemów modelowania struktury lub utrzymania obiektów zaliczono:

- analizę efektywności i zdolności do poprawnego funkcjonowania obiektów związaną z możliwością występowania uszkodzeń częściowych, nie prowadzących do przejścia obiektu w stan niezdatności, a tylko do ograniczenia jego wydajności,
- modelowanie odporności obiektu na nieprzewidywalne oddziaływania (*survivability*) wynikające np. z błędów wewnętrznych systemu, wpływu otoczenia lub wrogich działań człowieka (terroryzm); przeciwny zakres analizy prezentują badania podatności na uszkodzenia (*vulnerability*),
- problemy modelowania, badania i zarządzania bezpieczeństwem w aspekcie występowania skutków uszkodzeń obiektu dla człowieka i otoczenia naturalnego (*safety*) oraz zabezpieczenia przed nieupoważnionym dostępem do oddziaływania na obiekt (*security*),
- niezawodność oprogramowania (*software reliability*) ze względu na problemy ze zdefiniowaniem podstawowych dla „klasycznej” teorii niezawodności założeń doty-

czących: stochastycznej natury uszkodzeń, zależności uszkodzeń od czasu i niezależności występowania uszkodzeń.

Nowe wyzwania wiążą się z analizą i oceną niezawodności, np.: jednostkowych (unikatowych) obiektów lub systemów o wyjątkowo dużej nieuszkodzalności, systemów o zasięgu globalnym, sieci informacyjnych lub komunikacyjnych, systemów rozwijających się, systemów dostawy części wymiennych, systemów z rezerwą czasową, szacowania przyszłych kosztów eksploatacji i wyznaczania okresu gwarancji, modelowania systemów o ciągłej strukturze niezawodności i systemów wielostanowych, prowadzenia badań przyspieszonych niezawodności czy syntezy danych z badań eksploatacyjnych.

Niektóre z wymienionych zagadnień (m.in. problemy rezerwowania czasowego, modelowania systemów wsparcia logistycznego, oceny efektywności systemu) były rozważane w trakcie prowadzonych przez autora prac naukowo-badawczych, a niniejsza publikacja stanowi podsumowanie części zrealizowanych projektów ukierunkowanych na badania, ocenę i modelowanie niezawodności systemów logistycznych.

Zagadnienie niezawodności systemu logistycznego wymaga m.in. zmiany podejścia do sposobu definiowania systemu. Dotychczas w badaniach niezawodności systemów technicznych dominowało podejście w sensie rzeczowym – system techniczny jest tworzony przez zbiór elementów technicznych przeznaczonych do wykonania określonego zadania. Na przykład, system transportowy jest zbudowany ze zbioru technicznych środków transportu; w przypadku mobilnych środków transportu – wykonujących pracę użytkową i przewozową [209]. Zadania stojące przed systemem logistycznym są jednak bardziej złożone. Ocena jakości i niezawodności wykonania zadania logistycznego jest określona poziomem spełnienia kilku kryteriów, w tym kryterium zadowolenia klienta. Wobec tego bardziej adekwatne do analizowanego problemu wydaje się podejście w sensie czynnościowym. System logistyczny stanowi zespół czynności związanych z celowym przemieszczaniem i rozmieszczeniem w czasie i przestrzeni ładunków i związanych z nimi informacji. Ocena stopnia poprawności wykonania poszczególnych czynności pozwala wówczas na ocenę jakości i niezawodności także całego systemu logistycznego.

Praca jest podzielona na 7 części merytorycznych. W rozdziale 2 przedstawiono rolę logistyki we współczesnej gospodarce, komentując aktualną politykę transportowo-logistyczną Unii Europejskiej i Polski oraz podkreślając oczekiwany przez przedsiębiorców wzrost znaczenia niezawodności procesów logistycznych w przyszłej działalności gospodarczej. W rozdziale 3 skupiono się na omówieniu pojęcia systemu logistycznego, odnosząc się do definicji systemu i systemu technicznego oraz przedstawiając, znane z literatury zagadnienia, sposoby modelowania systemów logistycznych i miarę oceny funkcjonowania tej klasy systemów. W rozdziale 4 zaprezentowano różne sposoby rozumienia pojęcia niezawodności systemu logistycznego, wskazano na różnice w definiowaniu zadań logistyki biznesowej i wojskowej oraz podkreślono znaczenie logistyki jako systemu wspierającego funkcjonowanie

systemu operacyjnego. W rozdziałach od 5 do 8 omówiono modele niezawodności: elementu technicznego odnawialnego i nieodnawialnego, elementu logistycznego realizującego elementarne zadanie logistyczne, systemu technicznego zbudowanego z elementów nieodnawialnych (struktury niezawodności) i elementów odnawialnych (model Markowa i model semi-Markowa) oraz systemu logistycznego z użyciem modeli niezawodności systemów wielofazowych. Prezentowane modele, dotyczące elementu i systemu logistycznego, uzupełniono o przykłady oceny niezawodności rzeczywistych obiektów logistycznych.

2. ROLA LOGISTYKI WE WSPÓŁCZESNEJ GOSPODARCE

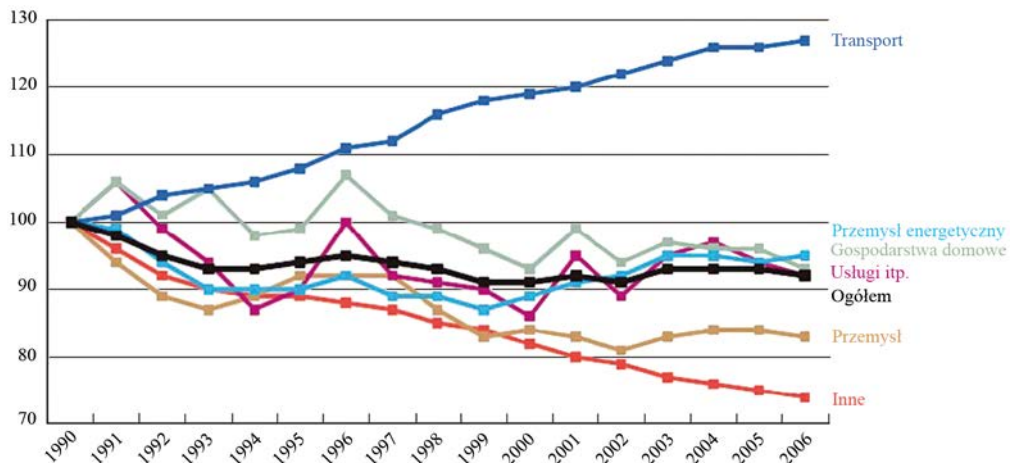
Ocenia się [33], że udział branży logistycznej w światowym PKB wynosi około 14% (5,4 biliona euro w 2006 r.). Roczne wydatki na realizację zadań logistycznych w Europie i Ameryce Północnej kształtują się na poziomie około 1 biliona euro w każdym z tych regionów. Koszty logistyki (w tym m.in. transportu i magazynowania) stanowią średnio 10–15% końcowego kosztu gotowego produktu.

Od początku XXI wieku dynamika wzrostu sektora logistycznego przekracza średni wskaźnik wzrostu gospodarki państw członkowskich UE [35]. Jednocześnie obserwuje się dużą konkurencję w europejskim sektorze logistycznym. Można to wyjaśnić [35] małą koncentracją niezależnych przedsiębiorstw logistycznych w Europie – udział 20 największych przedsiębiorstw w rynku wynosi zaledwie 33%. Jednocześnie środki logistyczne są niezbędne do utrzymania i zwiększenia europejskiej konkurencyjności i dobrobytu, zgodnie z odnowioną strategią lizbońską na rzecz wzrostu gospodarczego i zatrudnienia [34].

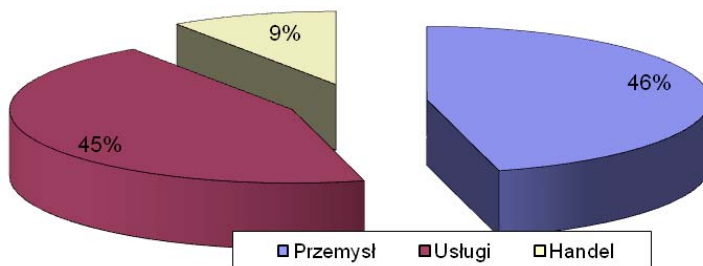
Integralnym elementem logistycznego łańcucha dostaw jest transport. Na sektor ten przypada około 7% PKB oraz ponad 5% całkowitego zatrudnienia w UE. Transport wymaga takich elementów, jak: infrastruktura, pojazdy, wyposażenie, inteligentne systemy transportowe oraz procedury operacyjne, umożliwiające sprawną współpracę podczas efektywnego przemieszczania ludzi i towarów [35]. Zwiększenie liczby operacji transportowych budzi niepokój w związku z jego wpływem na środowisko. Według danych Europejskiej Agencji Środowiska transport jest odpowiedzialny za blisko czwartą część (23,8%) całkowitej emisji gazów cieplarnianych i nieco ponad czwartą część (27,9%) całkowitej emisji CO₂ w UE-27 w 2006 roku [35]. W 97% transport jest uzależniony od paliwa kopalnianego, tak więc starania o ograniczenie zmian klimatycznych są związane z wysiłkiem zmierzającym do poprawienia bezpieczeństwa dostaw energii. W porównaniu z danymi z roku 1990 (rys. 2.1) tylko w sektorze transportu obserwuje się ciągły wzrost emisji CO₂ – średnio o około 1,4% rocznie. Ta sytuacja była podstawą do sformułowania w 2010 roku polityki UE dotyczącej przyszłości logistyki.

Opublikowane niedawno bardzo obszerne badania światowego rynku logistycznego [216] ujawniły kilka nowych kierunków. Co prawda, badania zostały zrealizowane

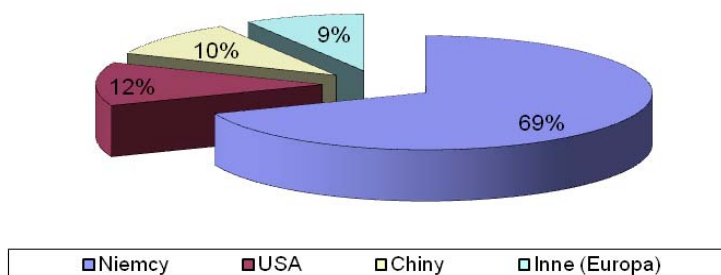
przed wystąpieniem ostatniego kryzysu w gospodarce światowej, ale bieżąca analiza sytuacji, np. [187], wskazuje na aktualność uzyskanych wówczas wyników.



Rys. 2.1. Emisja gazów cieplarnianych przez poszczególne sektory gospodarki UE-27 (1990 = 100%) [35]



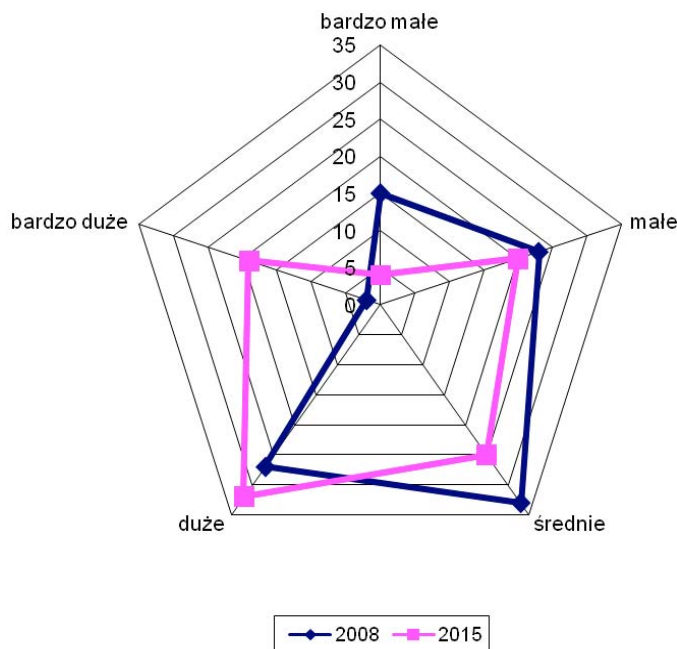
Rys. 2.2. Struktura badanych przedsiębiorstw według branż
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [216]



Rys. 2.3. Struktura badanych przedsiębiorstw według rejonów geograficznych
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [216]

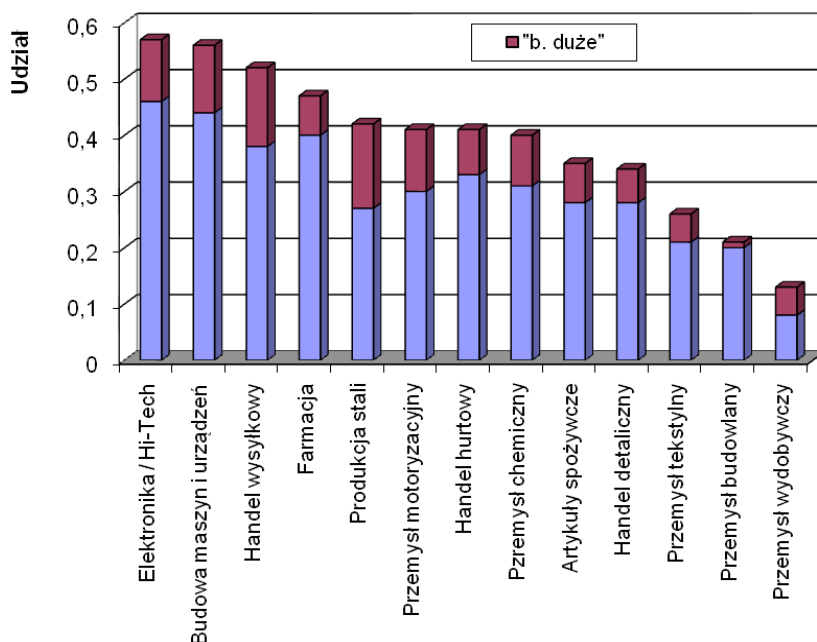
Badania [216] przeprowadzono wśród ponad 1300 przedsiębiorstw (handlowych, przemysłowych, transportowych) w Europie (głównie Niemcy), Chinach i Stanach Zjednoczonych – rys. 2.2 i 2.3. Udział przedsiębiorstw usługowych i przemysłowych w badanej próbie jest podobny – około 45%. W rozkładzie terytorialnym dominują natomiast firmy niemieckie – 69%.

W ocenie respondentów znaczenie procesów logistycznych dla efektywnego funkcjonowania firmy będzie w najbliższych latach rosło – rys. 2.4. Zmiana dotyczy opinii o bardzo małym znaczeniu logistyki – liczba takich odpowiedzi zmalała z około 15% do około 5% oraz ocen dotyczących bardzo dużego znaczenia logistyki – wzrost z około 2% do około 20% respondentów.



Rys. 2.4. Znaczenie logistyki (% wybranych odpowiedzi)
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [216]

Analizując [216] perspektywę wzrostu znaczenia poprawnej realizacji procesów logistycznych w różnych branżach, uzyskano odpowiedzi o dużym i bardzo dużym znaczeniu przede wszystkim w przemyśle elektronicznym i przemyśle budowy maszyn – rys. 2.5. Dość oczywista opinia dotyczy wzrostu znaczenia poprawnego funkcjonowania systemów logistycznych w handlu wysyłkowym i stosunkowo małego zainteresowania problemem w przemyśle wydobywczym. Taki charakter odpowiedzi wskazuje na poprawność stosowanej metody badań i wiarygodność użytych opinii.



Rys. 2.5. Branże o dużym i bardzo dużym wpływie na rozwój logistyki

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [216]

O przyszłym rozwoju tak znaczących dla gospodarki krajowej i globalnej dziedziną jaką jest logistyka, decyduje w dużym stopniu odpowiednia polityka transportowa lub – ujmując problem szerzej – polityka logistyczna Unii Europejskiej i Polski.

2.1. POLITYKA LOGISTYCZNA UNII EUROPEJSKIEJ

Europejska polityka transportowa, a obecnie także polityka logistyczna, należy do pięciu najważniejszych obszarów działalności społeczno-gospodarczej Unii Europejskiej [127]. Pojęcie polityki transportowej oznacza działalność państwa i jego organów – w tym przypadku Unii Europejskiej i jej komisji transportu i energetyki – mającą na celu zapewnienie ilościowej i przestrzennej dostępności usług transportowych o możliwie najlepszej strukturze, dla dostępnych zasobów inwestycyjnych i eksploatacyjnych [219]. Cele i założenia polityki transportowej Unii są przede wszystkim uwarunkowane zadaniami wynikającymi z procesu integracji krajów członkowskich oraz potrzebą dostosowania europejskiego systemu transportowego do warunków funkcjonowania w ramach wspólnego rynku.

Do najważniejszych dokumentów określających kierunki polityki transportowej Unii na przełomie XX i XXI wieku należą [127]:

- Zielona Księga „Ku sprawiedliwemu i efektywnemu stanowieniu cen w transporcie”, (CEC, 1995),
- Biała Księga „Sprawiedliwe opłaty za użytkowanie infrastruktury”, (CEC, 1998),
- Biała Księga „Europejska polityka transportowa 2010; czas na decyzje”, (CEC, 2001),
- Dyrektywa o opłatach za infrastrukturę kolejową, (CEC 2001/14),
- Keep Europe Moving – Recenzja Białej Księgi 2001, (CEC, 2006).

Biała Księga [70] zawiera program działania obejmujący szesnaście propozycji, które miały być zrealizowane w ramach wspólnotowej polityki transportowej. Sprecyzowano środki działania do roku 2010 wraz z zasadami oceny postępów w poszczególnych przedziałach czasu; oceny czy cele określone przez odpowiednie wielkości liczbowe zostały osiągnięte i czy inne działania dostosowawcze są niezbędne. Szczegółowe propozycje podzielono na cztery części dotyczące [32]:

- I. Zrównoważenia gałęzi transportu.
- II. Usunięcia wąskich gardeł infrastruktury transportowej.
- III. Umiejscowienia wymagań użytkownika w centrum polityki transportowej.
- IV. Opanowania globalizacji transportu.

Część I programu działań koncentruje się na [32]:

- uruchomieniu rzeczywistej konkurencji w obszarze transportu przez:
 - wzmocnienie jakości w sektorze drogowym, w tym:
 - organizacja restrukturyzacji,
 - rozwój przepisów prawnych,
 - wzmocnienie kontroli i sankcji,
 - ożywienie kolei przez:
 - integrację transportu kolejowego na rynku wewnętrznym,
 - optymalizację wykorzystania infrastruktury,
 - modernizację usług,
 - monitorowanie wzrostu ruchu powietrznego:
 - walka z zatłoczeniem nieba,
 - analiza przepustowości i wykorzystania portów powietrznych,
 - pogodzenie wzrostu transportu powietrznego z ochroną środowiska;
- powiązaniu wykorzystania środków transportu przez:
 - zapewnienie połączenia morze–żegluga śródlądowa–kolej:
 - rozwój autostrad morskich,
 - oferowanie innowacyjnych usług,
 - pomoc „na starcie” operatorom intermodalnym (program Marco Polo II),
 - tworzenie sprzyjających warunków technicznych:
 - sprzyjanie wyłanianiu integratorów ładunku,
 - standaryzacja kontenerów i nadwozi ruchomych.

Część II programu działania dotyczy [32]:

- odblokowania wielkich sieci transportowych przez:

- budowę korytarzy multimodalnych nadających priorytet przewozom towarowym,
- budowę szybkich sieci połączeń pasażerskich,
- poprawę warunków ruchu,
- realizację dużych projektów infrastrukturalnych obejmujących:
 - dokończenie dróg alpejskich,
 - zapewnienie przejazdu przez Pireneje,
 - wprowadzenie nowych projektów priorytetowych,
 - podniesienie bezpieczeństwa ruchu w tunelach;
- rozwiązanie problemów finansowania projektów związanych z:
 - ograniczonymi budżetami publicznymi,
 - zapewnieniem współdziałania inwestorów prywatnych,
 - uruchomieniem współfinansowania projektów.

Część III programu skupia się na problemie uczynienia z użytkownika systemu transportowego podmiotu działania i proponuje [32]:

- zmniejszenie niebezpieczeństwa na drogach w celu:
 - ograniczenia rocznej liczby osób zabitych (40 000 w krajach „starej 15”) w wypadkach drogowych o połowę, przez:
 - harmonizację kar,
 - stosowanie nowych technologii do poprawy bezpieczeństwa drogowego;
- ponoszenie przez użytkowników rzeczywistych kosztów transportu:
 - stosowanie progresywnej taryfikacji za korzystanie z infrastruktury,
 - struktura cen powinna odzwierciedlać koszty zewnętrzne,
 - ujednoczenie przepisów w krajach członkowskich,
 - konieczność wprowadzenia ram wspólnotowych,
 - konieczność wprowadzenia harmonizacji opodatkowania paliw;
- wprowadzenie transportu przyjaznego dla pasażera:
 - intermodalność dla pasażerów,
 - rozwój zintegrowanych biletów,
 - rozszerzony zakres obsługi bagaży,
 - zapewnienie kontynuacji podróży,
 - rozszerzenie praw i obowiązków użytkowników:
 - wzmocnienie praw użytkowników,
 - doprecyzowanie obowiązków użytkowników,
 - wzrost jakości usług transportowych;
- racjonalizację transportu miejskiego:
 - dywersyfikacja energii dla transportu przez:
 - stworzenie nowych ram prawnych dla paliw substytucyjnych,
 - stymulowanie podaży poprzez eksperymenty,
 - promocje dobrej praktyki.

Część IV Białej Księgi dotyczy problemów z opanowaniem globalizacji transportu i zajmuje się [32]:

- zmianami związanymi z rozszerzeniem Unii o nowych członków (w tym Polskę):
 - wyzwania infrastrukturalne,
 - szansa na rozwój sieci kolejowej,
 - nowe zagadnienia związane z bezpieczeństwem morskim;
- umocnieniem się rozszerzonej Unii na scenie światowej:
 - jednolitą reprezentacją Unii w organizacjach międzynarodowych,
 - nadaniu transportowi powietrznemu wymiaru zewnętrznego,
 - realizacji programu nawigacji satelitarnej Galileo.

Zagadnienia niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportowego wymagają bardziej szczegółowego odniesienia się do programów podniesienia jakości poszczególnych gałęzi transportu.

Potrzeba ożywienia kolei [32] wiąże się ze strategicznym znaczeniem transportu kolejowego. Ożywienie tej gałęzi transportu wymaga wzmocnienia konkurencji pomiędzy przedsiębiorstwami kolejowymi. Powstanie nowych przedsiębiorstw kolejowych może przyczynić się do wzmocnienia konkurencyjności w tym sektorze. Biorąc pod uwagę aspekty socjalne i warunki pracy, wzmocnieniu konkurencji powinny towarzyszyć środki zabezpieczające restrukturyzację przedsiębiorstw. Głównym celem do osiągnięcia jest otwarcie rynku dla międzynarodowego transportu towarów oraz kabotażu na rynkach krajowych. Dąży się także do otwarcia transportu międzynarodowego pasażerów. Procesom powinien towarzyszyć harmonijny rozwój interoperacyjności i bezpieczeństwa w ruchu kolejowym. Komisja zaproponowała pakiet środków, które powinny umożliwić odzyskanie, w szczególności dla przewozów towarowych, wiarygodności transportu; przede wszystkim w stosunku do regularności i punktualności operatorów. Podkreślono potrzebę stopniowego włączania sieci linii kolejowych przeznaczonej wyłącznie do przewozów towarowych, co powinno prowadzić do zwiększenia znaczenia przewozów towarowych dla przedsiębiorstw w stosunku do przewozów pasażerskich.

Wzmocnienie jakości transportu drogowego [32] dotyczy jego zdolności do przewożenia towarów po całej Europie przy bezkonkurencyjnej elastyczności i po stosunkowo niskiej cenie. Sektor ten odgrywa dominującą rolę w systemie transportowym, ale jest bardziej wrażliwy pod względem ekonomicznym niż pozostałe gałęzie. W sektorze drogowym różnice między cenami usług transportowych są nieznaczne ze względu na rozdrobnienie przedsiębiorstw i duże możliwości wywierania przez usługobiorców presji na ceny. Niektóre przedsiębiorstwa transportu drogowego są również skłonne do stosowania praktyk dumpingu cenowego i przekraczania innych przepisów socjalnych i bezpieczeństwa, aby zrównoważyć sobie gorszą sytuację rynkową. Komisja zaproponowała wprowadzenie przepisów umożliwiających harmonizację określonych klauzul zawieranych w umowach w celu ochrony przewoźników wobec załadowców, tak aby mogli oni zmieniać swoje taryfy w przypadku nagłego zwiększenia ceny paliwa. Zmieniono również

środki zmierzające do modernizacji funkcjonowania transportu drogowego w zakresie przepisów socjalnych i prawa pracy. Konieczna stała się harmonizacja i wzmocnienie procedur kontroli w celu wyeliminowania praktyk zakłócających konkurencję.

Promowanie transportu morskiego i żeglugi śródlądowej [32] wynika ze zdolności tych dwóch gałęzi transportu do przejścia towarów z zakorkowanej infrastruktury drogowej i niedoinwestowanej infrastruktury kolejowej. Ożywienie żeglugi morskiej bliskiego zasięgu miało być przeprowadzone przez stworzenie „autostrad morskich” w ramach systemu transportowej sieci transeuropejskiej. Założono uruchomienie lepszego połączenia portów z siecią kolejową i siecią dróg wodnych śródlądowych oraz zwiększenie jakości usług portowych. Niektóre połączenia morskie (szczególnie te, które pozwalają na obchodzenie wąskich gardeł, występujące m.in. w Alpach i Pirenejach) mają tworzyć część sieci transeuropejskiej, tak jak drogi lub linie kolejowe. Unia Europejska powinna rozwinąć przepisy wzmacniające bezpieczeństwo morskie. Komisja, w porozumieniu z Międzynarodową Organizacją Morską i Międzynarodową Organizacją Pracy, miała zaproponować scalenie przepisów dotyczących minimów socjalnych podlegających kontroli przez inspekcję na statku i rozwoju skutecznego europejskiego systemu zarządzania ruchem morskim. Jednocześnie, w celu wspierania zwiększenia liczby statków pod banderami wspólnotowymi, Komisja miała przedstawić propozycję dyrektywy dotyczącej „podatku tonażowego” na wzór legislacji, jaką rozwijają niektóre państwa członkowskie. Dla żeglugi śródlądowej zaproponowano wzmocnienie jej pozycji przez ustanowienie odgałęzień dróg wodnych śródlądowych i instalację urządzeń do przeładunku, tak aby umożliwić wykonywanie usług przez cały rok. Pełna harmonizacja przepisów technicznych, dotyczących statków, certyfikatów kierowników statków i warunków socjalnych składu załóg statków, ma zdynamizować rozwój tego sektora.

Skoordynowania transportu lotniczego z wymaganiami ochrony środowiska naturalnego [32] oczekiwano po wprowadzeniu w 2004 r. pakietu konkretnych propozycji stanowiących przepisy wspólnotowe dotyczące ruchu lotniczego i stworzenia skutecznej współpracy, zarówno z władzami wojskowymi, jak i z Eurocontrol. Reorganizacji europejskiego ruchu powietrznego miała towarzyszyć polityka dążąca do tego, aby nieunikniony rozwój wydajności portów lotniczych, związany przede wszystkim z rozszerzeniem, bezpośrednio podlegał nowym przepisom dotyczącym zmniejszenia hałasu i zanieczyszczenia powodowanego przez samoloty.

Znaczącego wzrostu udziału transportu kombinowanego [32] poszukiwano w działaniach podjętych w celu lepszej integracji gałęzi, oferujących znaczący potencjał wydajności transportu w ramach połączeń transportowych odpowiednio zarządzanych, gdzie wszystkie świadczenia są zintegrowane. Środki harmonizacji technicznej i interoperacyjności między systemami stanowiły priorytet, zwłaszcza dla transportu kontenerów. Nowe programy pomocowe (np. [115], [116]) „Marco Polo I” i „Marco Polo II”, nakierowane na projekty innowacyjne, miały doprowadzić do rozwoju transportu kombinowanego i uzyskania rzeczywistej konkurencyjności i dużej efektywności ekonomicznej.

Budowa transportowych sieci transeuropejskich [32] jest związana z problemem kongestii występującym na wielu głównych trasach komunikacyjnych. Zgodnie z wnioskami Rady Europejskiej z Göteborga Komisja zaproponowała skoncentrowanie się na usunięciu wąskich gardeł w zakresie transportu kolejowego i udostępnieniu priorytetowych dróg w celu stworzenia możliwości przejścia potoków ładunków związanych z rozszerzeniem Unii – przede wszystkim w regionach przygranicznych – oraz zwiększenia dostępności regionów peryferyjnych. Aby polepszyć dostęp do sieci transeuropejskiej, priorytetem realizowanym w ramach funduszy strukturalnych pozostał rozwój sieci drugorzędnej. W tym kontekście stwierdzono, że lista czternastu dużych priorytetowych projektów zaakceptowanych przez Radę Europejską w Essen i przyjętych do realizacji w decyzji z 1996 r. powinna zostać zmieniona. Dodano w kolejnych transzach szesnaście nowych projektów. Spośród trzydziestu projektów priorytetowych do 2009 roku zakończono pięć projektów (m.in. most drogowo-kolejowy między Malme a Kopenhagą oraz kolej dużej prędkości między Paryżem a Londynem). W celu zagwarantowania pomyślnego rozwoju sieci transeuropejskich złożono propozycję jednoczesnej zmiany przepisów finansowych dotyczących przyznawania pomocy finansowej, tak aby pozwolić na maksymalny udział Wspólnoty w transgranicznych projektach kolejowych pokonujących bariery naturalne, takie jak projekt Lyon–Turyn. Biorąc pod uwagę niski poziom finansowania z budżetów krajowych i ograniczenia partnerstwa publiczno-prywatnego, uznano za niezbędne innowacyjne rozwiązania oparte na wspomaganium finansowania ze strony dochodów z opłat za wykorzystanie infrastruktury.

Aby wzmocnić bezpieczeństwo drogowe [32], należy w sposób ilościowy ukierunkować zmniejszenie liczby ofiar o 50%. Państwa członkowskie nie wyrażają chęci do działań na poziomie wspólnotowym, jeśli chodzi o użytkowanie pasów bezpieczeństwa przez dzieci i w autokarach oraz do przyjęcia maksymalnego dopuszczalnego poziomu alkoholu we krwi. Komisja zamierzała już od 2005 r. nadać priorytet przykładom dobrej praktyki, z zachowaniem możliwości podjęcia inicjatywy prawodawczej, jeśli liczba wypadków się nie zmniejszy. Zdawano sobie sprawę, że liczba ofiar śmiertelnych jest szczególnie duża w krajach kandydujących do Unii. Komisja miała podjąć dwie inicjatywy ograniczone do sieci transeuropejskich:

- ujednoclić oznaczenia miejsc szczególnie niebezpiecznych,
- ujednoclić dla międzynarodowego zarobkowego transportu przepisy odnoszące się do kontroli i sankcji dotyczących przekraczania dozwolonej prędkości i dopuszczalnego poziomu alkoholu we krwi kierowców.

Przyjęcie polityki dotyczącej efektywnych opłat w transporcie [32] jest związane z faktem, że gałęzie transportu nie ponoszą na ogół żadnych kosztów. Sytuacja znacznie różni się w poszczególnych państwach i różnych rodzajach transportu. Pociąga to zakłócenia w funkcjonowaniu rynku wewnętrznego i zakłóca konkurencję w ramach systemu transportowego. W rezultacie nie istnieje realny sposób umożliwiający skłonienie do użytkowania gałęzi transportu mniej zanieczyszczających środowisko naturalne lub sieci mniej zatłoczonych.

Biała Księga proponuje następujące działania:

- harmonizację opodatkowania paliwa dla transportu zarobkowego, przede wszystkim transportu drogowego;
- zbliżenie przepisów dotyczących opłat za użytkowanie infrastruktury; uwzględnienie kosztów zewnętrznych, co powinno zachęcić do użytkowania środków transportu mających mniejszy negatywny wpływ na środowisko i umożliwić inwestycje, z dochodów w ten sposób uzyskanych, w nową infrastrukturę.

Taki rodzaj reformy wymaga równego traktowania poszczególnych operatorów i poszczególnych gałęzi transportu. Cena za użytkowanie infrastruktury powinna zmieniać się według tej samej zasady w zależności od kategorii użytkowanej infrastruktury, okresu dnia, odległości, rozmiaru i ciężaru pojazdu i innego czynnika, który ma wpływ na zatłoczenie, degradację infrastruktury lub środowiska.

Uznanie praw i obowiązków użytkowników [32] systemu transportowego wiąże się z prawem obywateli europejskich do dostępu do usług transportu o wysokiej jakości, zawierających zintegrowane świadczenia po przystępnych cenach. Uważa się, że zmniejszenie ceny za transport nie musi oznaczać rezygnacji z najbardziej elementarnego prawa. Przykładem jest karta prawa pasażerów transportu lotniczego, która np. zapewnia informację, rekompensatę w przypadku odmowy zabrania na pokład z powodu nadrezerwacji, odszkodowanie w razie wypadku. Stwierdzono, że ten sposób postępowania powinien być rozciągnięty na inne rodzaje transportu.

Wprowadzenie badań i technologii do usług transportowych [32] wymagało dużych inwestycji w zakresie badania i rozwoju technologii – ponad 1 miliard euro w latach 1997–2000 zainwestowanych w dziedziny tak zróżnicowane, jak transport kombinowany, czyste pojazdy lub zastosowanie telematyki w transporcie. Stworzona Europejska Przestrzeń Badawcza realizuje kolejne Ramowe Programy Badawcze, m.in. badania zmierzające do uzyskania efektu bardziej czystego i bezpiecznego transportu drogowego i morskiego, jak również do integracji inteligentnych systemów we wszystkich gałęziach, dających możliwość skutecznego zarządzania infrastrukturą. Plan działania e-Europa proponuje podjęcie przez państwa członkowskie i Komisję takich działań, jak rozszerzenie nowoczesnych usług informatycznych i kontroli na sieciach transeuropejskich i w miastach oraz wprowadzenie aktywnych systemów bezpieczeństwa w pojazdach. Przedstawiono propozycję dyrektywy harmonizującej środki płatnicze dla określonej infrastruktury, zwłaszcza opłat za przejazd po autostradach i dyrektywę dotyczącą norm bezpieczeństwa w tunelach. W zakresie transportu lotniczego priorytet został położony na zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko emisji i hałasu pochodzącego z silników, jak również na polepszenie bezpieczeństwa i zużycia paliwa przez samoloty.

Sterowanie globalizacją [32] jest związane z trudnościami wspólnotowej polityki w zakresie transportu. Problem polega na wyważeniu aktywności, z jednej strony w wydawaniu norm międzynarodowych na polu utworzonych organizacji, z drugiej – w koordynacji przepisów krajowych często chroniących rynek wewnętrzny. Unia Europejska powinna chronić przed katastrofami morskimi oraz znosić niedostosowane

przepisy dotyczące walki z hałasem z silników samolotowych oraz odszkodowania dla pasażerów w razie wypadku. W ramach negocjacji prowadzonych w Światowej Organizacji Handlu, Unia Europejska kontynuowała działania zmierzające do otwarcia głównych światowych rynków transportowych, strzegąc jakości usług transportowych i bezpieczeństwa użytkowników. Komisja planowała złożenie propozycji wzmocnienia miejsca Wspólnoty na forum organizacji międzynarodowych, takich jak Międzynarodowa Organizacja Morska, Międzynarodowa Organizacja Lotnictwa Cywilnego oraz Komisja Dunajska, w celu zabezpieczenia – na poziomie światowym – interesów europejskich. Uznano, że jest wiele środków i instrumentów politycznych niezbędnych do wprowadzenia procesu prowadzącego do systemu zrównoważonego transportu oraz że potrzebny jest czas, aby osiągnąć cel finalny, a środki zalecane w Białej Księdze stanowią tylko pierwszy etap, który wyznacza strategię działania w długim okresie.

W czerwcu 2006 r. przeprowadzono ocenę realizacji celów polityki transportowej sformułowanych w Białej Księdze z 2001 r. Wyniki omówiono w dokumencie pt.: „Europa w ruchu: polityka transportowa służąca zrównoważonej mobilności” [33]. Podkreślono, że mobilność stanowi niezbędny czynnik dobrobytu Europy i swobody przemieszczania się jej obywateli. Stwierdzono, że nadal należy zmniejszyć negatywne skutki mobilności związane z zużyciem energii i pogarszaniem się jakości środowiska i wobec tego obok działań przewidzianych w Białej Księdze z 2001 r. niezbędne będą dodatkowe działania, takie jak, m.in.: inteligentne systemy transportowe, dzięki którym mobilność stanie się bardziej wydajna i przyjazna dla środowiska; debatę na temat zmian charakteru mobilności na obszarach miejskich; plan działań mający na celu rozwój szlaków żeglugi śródlądowej oraz ambitny program wprowadzenia napędu ekologicznego w pojazdach samochodowych.

Instrumenty przewidziane w Białej Księdze z 2001 r. zostały dostosowane do nowych warunków związanych z rozszerzeniem UE, wzrostem cen paliwa, zobowiązaniami z Kioto oraz globalizacją [33]. W celu optymalizacji działania każdej formy transportu oraz ich połączenia, europejska polityka zrównoważonej mobilności wymaga zastosowania narzędzi politycznych. Komisja przyjęła w 2007 r. plan działań dotyczący logistyki, który zapewnił lepsze współdziałanie transportu drogowego, morskiego, kolejowego i rzeczno-żeglownego oraz zintegrowała różne formy transportu w łańcuchy logistyczne. Takie działania przyczyniły się do wzrostu konkurencyjności przemysłu, a także zmniejszyły stopień oddziaływania transportu towarów na środowisko.

Przegląd [33] kładzie wzmocniony nacisk na inteligentne systemy transportowe. Zwrócono uwagę, że nie ma powodu, dla którego statki, samochody ciężarowe i pociągi nie miałyby korzystać z równie skomplikowanych systemów komunikacji i nawigacji, takich jak samoloty. Zarządzanie przepływem ruchu i zdolnością przewozową w czasie rzeczywistym, a także wykorzystanie systemów śledzenia powinno pozwolić na obniżenie kosztów, poprawę jakości środowiska oraz wzrost bezpieczeństwa. Kluczową rolę w promowaniu nowych technologii ma odgrywać program Galileo.

Dokument [33] wskazuje również na konieczność podjęcia bardziej ambitnych działań dotyczących zmiany charakteru mobilności na obszarach miejskich Europy. Komisja chce odegrać rolę katalizatora, zachęcając decydentów do zajęcia się kwestiami natężenia ruchu, zanieczyszczenia i wypadków przez podjęcie innowacyjnych działań. Część debaty stanowi wyraźne określenie, jaki szczebel rządowy jest odpowiedzialny za nowe działania.

W podsumowaniu stwierdzono [33], że osiągnięcia ostatnich lat są pozytywne, ale niezbędne jest wprowadzenie kolejnych instrumentów. Kierunek polityczny nakreślony w Białej Księdze zostanie doprecyzowany na podstawie publicznych konsultacji ze wszystkimi zainteresowanymi stronami oraz badań dotyczących przyszłości transportu.

Jednym z nowych pojęć wprowadzonych przez Komisję w 2006 r. jest komodalność (*comodality*) [228]. Komodalność oznacza wydajne wykorzystanie form transportu działających odrębnie lub zintegrowanych multimodalnie w ramach europejskiego systemu transportowego w celu optymalnego i zrównoważonego wykorzystania zasobów. To pojęcie wprowadza nowe podejście do europejskiej polityki transportowej, w którym nie przeciwstawia się jednej gałęzi transportu drugiej (np. transportu drogowego innym alternatywom), a poszukuje się optymalnych warunków eksploatacji dla poszczególnych gałęzi transportu i współdziałania.

Po analizie skutków realizacji polityki transportowej Unii w latach 2001–2010 stwierdzono [35], że istnieje rosnąca potrzeba przyjęcia przez Unię Europejską spójnego podejścia do logistyki, co zapewni możliwość wzmocnionej współpracy i koordynacji między różnymi płaszczyznami polityki transportowej i powinno stać się najistotniejszym czynnikiem branym pod uwagę w podejmowaniu decyzji. Proponowany plan działań na rzecz logistyki transportu towarowego [166] należy do całej serii inicjatyw jednocześnie rozpoczętych przez Komisję Europejską w celu poprawy wydajności transportu towarowego w Europie i zmniejszenia obciążenia, jakie stanowi dla środowiska naturalnego. Przedstawiono w nim krótko- i średnioterminowe działania, np. [35], które pomogą Europie sprostać obecnym i przyszłym wyzwaniom oraz zapewnią jej konkurencyjny i zgodny z zasadami zrównoważonego rozwoju system transportu towarowego. Konieczne jest skuteczne włączenie w łańcuch logistyczny krajów trzecich, a zwłaszcza krajów sąsiadujących z Unią.

Strategia Europa 2020, omówiona w [215], w części dotyczącej transportu kładzie nacisk na dwa obszary:

- „dekarbonizacja”:
 - działania, takie jak: wczesne tworzenie infrastruktury sieci mobilności elektrycznej, inteligentne zarządzanie ruchem, lepsza logistyka, opracowanie europejskiej inicjatywy ekologicznych samochodów;
 - wizja zmian strukturalnych i technologicznych;
- rozwój infrastruktury:
 - wykorzystanie instrumentów finansowych UE,
 - przyśpieszenie rozładowania największych przeciążeń,

- unowocześnienie europejskich sieci transportowych,
- opracowanie inteligentnych, wzajemnie połączonych infrastrukturalnych i energetycznych.

Główne obszary planu działań na rzecz logistyki LAN [215] dotyczą:

- E-Freight i inteligentnych systemów transportu,
- zrównoważonej jakości i wydajności,
- uproszczenia łańcuchów transportowych,
- „zielonych” korytarzy transportu towarowego,
- logistyki miejskiego transportu towarowego,
- wymiarów pojazdów i norm ładunkowych.

W zakresie działań mających na celu podniesienie jakości i wydajności procesów logistycznych proponuje się [35] kontynuację podjętych wcześniej przedsięwzięć, takich jak ciągła eliminacja „wąskich gardeł” czy propagowanie sprawdzonych rozwiązań.

W zakresie eliminacji „wąskich gardeł” [35] wezwano zainteresowane strony do wskazania operacyjnych, infrastrukturalnych i administracyjnych „wąskich gardeł”, w wyniku czego powstało zestawienie liczące prawie 500 pozycji. Zestawienie pozwoliło po raz pierwszy na pełną identyfikację konkretnych przeszkód utrudniających funkcjonowanie logistyki transportu towarowego w Europie. Przedstawiciele sektora i władz publicznych zgłosili chęć służenia w charakterze punktów kontaktowych dla podmiotów z branży logistycznej, a także służenia pomocą w zbadaniu i zaproponowaniu rozwiązań dla zgłoszonych wąskich gardeł.

Propagowanie sprawdzonych rozwiązań jest związane z wykorzystywaniem w niewystarczającym stopniu multimodalnego transportu towarowego. Powodem tej sytuacji [35] może być brak wiedzy na temat korzyści płynących z wykorzystania alternatywnych form transportu, integracji istniejącej pomiędzy różnymi formami transportu lub na temat dodatkowych kosztów przeładunków. Proponuje się poszukiwania rozwiązania tych problemów przez szeroko zakrojoną inicjatywę, mającą na celu dzielenie się sprawdzonymi rozwiązaniami i zapewnienie praktycznego wsparcia z wykorzystaniem do tego celu sieci jednostek badawczych z obszaru logistyki i odpowiednich organizacji promocyjnych.

Nowymi elementami polityki transportowej UE są koncepcje wsparcia szkolenia pracowników w sektorze logistyki, działań na rzecz podnoszenia jakości świadczonych usług logistycznych oraz poszukiwania metod oceny i analizy poprawności funkcjonowania procesów logistycznych i transportowych.

Potrzeba szkolenia pracowników w sektorze logistyki transportu towarowego wynika z obserwowanego niedoboru wykwalifikowanych pracowników w tym obszarze. Proponuje się [35], w ścisłej współpracy z partnerami społecznymi, zbadanie sposobów podniesienia atrakcyjności zawodów logistycznych i zwiększenia mobilności pracowników z różnych państw. Do złagodzenia tych problemów można wykorzystać instrumenty polityki spójności (Europejski Fundusz Społeczny i Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego), kierując środki na interwencje w zakresie

szkoleń (na działania i infrastrukturę). Obecna ocena tego problemu wskazuje, że szkolenia oferowane przez szkoły wyższe i inne instytucje w Europie są bardzo zróżnicowane. Niezbędne będzie podejmowanie wysiłków w celu ukierunkowania i doskonalenia kwalifikacji personelu logistycznego, zwłaszcza przez pogłębianie kompetencji w dziedzinie transportu oraz wspieranie uczenia się przez całe życie. Pozytywny wpływ na spójność i jakość szkoleń organizowanych w Europie miałyby dobrowolny europejski certyfikat dla logistyków transportu towarowego. Mógłby on także obejmować wszystkie poziomy umiejętności, w stosownych przypadkach uwzględniać zróżnicowane wymagania poszczególnych sektorów lub stanowić podstawę dla dodatkowych, specjalistycznych szkoleń organizowanych przez samą branżę. Do ułatwienia mobilności przyczynić się może system wzajemnego uznawania uprawnień z zakresu logistyki transportu towarowego i powiązanych obszarów (np. magazynowania). Wymaga to uwzględnienia istniejących standardów szkoleniowych, np. Europejskiego Towarzystwa Logistycznego ELA.

W planie działań na rzecz logistyki transportu towarowego [35] podkreślono, że wskaźniki wydajności łańcuchów logistycznych transportu towarowego stanowią przydatne narzędzie podnoszenia jakości świadczonych usług oraz mogą służyć do mierzenia oddziaływania systemu logistycznego na środowisko naturalne i społeczeństwo. Istnieją już wskaźniki dotyczące kolejowego transportu kombinowanego, transportu lotniczego i żeglugi morskiej bliskiego zasięgu. Brakuje jednak jeszcze wspólnego systemu wskaźników wydajności dla różnych form transportu, czy też logistyki transportu towarowego. Stwierdzono, że celem działania w tym zakresie będzie stworzenie, w porozumieniu z zainteresowanymi stronami, podstawowego zbioru ogólnych wskaźników, które najlepiej będą się nadawać do pomiaru i rejestracji wydajności (np. zrównoważenia, efektywności itp.) łańcuchów logistycznych transportu towarowego, aby zachęcić do przejścia na wydajniejsze i czystsze formy transportu oraz ogólnie poprawić wydajność logistyczną. Wówczas Komisja zdecyduje o ujęciu tych wskaźników w formie kodeksu sprawdzonych rozwiązań lub zalecenia.

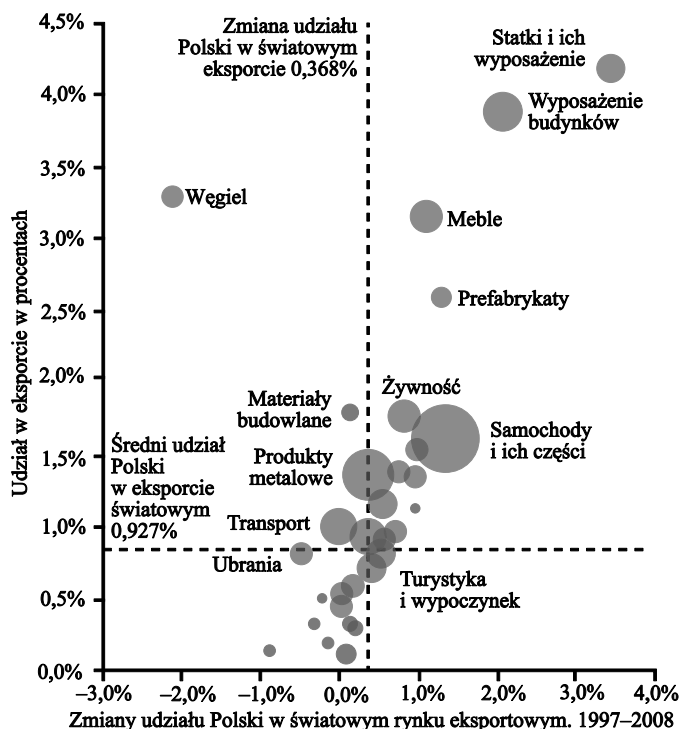
Opracowane modele i metody oceny funkcjonowania systemów logistycznych (wskaźniki) pozwolą na wykorzystanie ogromnej liczby danych statystycznych gromadzonych przez Komisję. Mimo dysponowania tak znaczną liczbą danych statystycznych, nie dają one wiarygodnego obrazu rynku logistycznego w Europie [35]. Należy zatem opracować odpowiednie wskaźniki i inne narzędzia służące pomiarom, aby ocenić sytuację i zmiany, jakim podlega ona w czasie. Jednocześnie należy utrzymać jak najmniejsze obciążenie administracyjne państw członkowskich i przedsiębiorstw.

Podkreślono [215], że Komisja oczekuje na intensyfikację współpracy z uniwersytetami i jednostkami naukowo-badawczymi działającymi w obszarze transportu i logistyki.

2.2. POLITYKA LOGISTYCZNA POLSKI

Obecnie nie ma w pełni sformułowanej polityki logistycznej dla Polski. Istnieją natomiast dokumenty precyzujące politykę transportową państwa [127]. Podobna sytuacja występuje w najnowszym opracowaniu Zespołu Doradców Strategicznych Prezesa Rady Ministrów pt. „Polska 2030. Priorytety rozwojowe kraju” [19].

Stan sektora transportu w Polsce dobrze ilustruje rysunek 2.6. Z porównania udziału transportu w eksporcie i zmian udziału Polski w światowym rynku eksportowym w latach 1997–2006 widać, że transport lokuje się około wartości średnich – nie jest oczekiwaną w raporcie lokomotywą rozwoju gospodarki kraju.



Rys. 2.6. Polskie klastry eksportowe 1997–2006 [19]

Raport precyzuje 10 wyzwań warunkujących dalszy rozwój kraju. Do tak nazwanych zadań należy odpowiedni potencjał infrastruktury. Podkreślono, że we współczesnej gospodarce cechą charakterystyczną jest niesłychana synergia czterech kanałów: trzech rodzajów transportu towarów, usług i osób (dróg, kolei, połączeń lotniczych) oraz infrastruktury teleinformatycznej.

Odpowiedni rozwój infrastruktury ma na celu zwiększenie dostępności transportowej i telekomunikacyjnej Polski w relacjach globalnych oraz centrów rozwojowych w Polsce w relacjach z regionami o charakterze peryferyjnym. Rozwój sektora telekomunikacji i nowoczesnych technologii, a zwłaszcza upowszechnienie dostępu do szerokopasmowego Internetu, powinien służyć eliminacji zagrożenia wykluczeniem cyfrowym.

Wytyczne, dotyczące planowania polityki transportowej i infrastrukturalnej, powinny uwzględniać m.in. następujące przesłanki i założenia [19]:

- Prymat rozwiązań wynikających z przyjętej koncepcji rozwoju przestrzennego kraju oraz modelu rozwojowego, zakładającego zwiększenie dostępności transportowej różnych regionów Polski. Chodzi o przyjęcie zasady spójności w realizowanych celach rozwojowych kraju – a uzyskiwana tym sposobem dostępność transportowa i teleinformatyczna jest kluczowym czynnikiem wspierającym procesy modernizacyjne.

- Zapewnienie zgodności planów inwestycji infrastrukturalnych z polityką spójności regionalnej. Można wówczas mówić o realnym wzmacnianiu potencjału rozwojowego określonych miejsc i regionów (zarówno peryferii, jak i centrów) w sposób dopasowany do realiów ekonomicznych, kulturowych czy środowiskowych danych obszarów. Założenia takie są szczególnie ważne w wypadku programu rozwoju obszarów wiejskich w Polsce.

- Spójność planów inwestycji infrastrukturalnych wymaga synergicznej realizacji przedsięwzięć w czterech gałęziach komunikacyjnych: transporcie drogowym i kolejowym, w sieci połączeń lotniczych oraz w infrastrukturze teleinformatycznej. Wzięto pod uwagę także rolę transportu wodnego, szczególnie morskiego, w zapewnianiu bezpieczeństwa energetycznego kraju (gaz w postaci LPG) i wzrostu kontenerowej wymiany handlowej przez porty bałtyckie. Łączy się z tym potrzeba komplementarności różnorodnych tworzonych połączeń, na przykład tworzenia warunków dla multimodalności transportu. Podkreślono znaczenie jakości usługi dla klienta, efektywności ekonomicznej rozwiązań oraz wspomniane uwzględnienie specyfiki obszaru.

- Uznano, że tempo inwestycji infrastrukturalnych powinno być dostosowane do potrzeb wynikających z tempa wzrostu gospodarczego. Nawet w fazie odrabiania opóźnień tempo to powinno być szybsze od prognozowanego rozwoju i związanych z nim potrzeb transportowo-komunikacyjnych.

- Założono, że niezbędne jest zapewnienie warunków do rozłożonego w czasie i efektywnego rozwoju polskiej infrastruktury transportowej (drogi, koleje, połączenia lotnicze), którego celem będzie uzyskanie, w trzech etapach, pełnej dostępności transportowej – opłacalnej w stosunku do ponoszonych nakładów i zakładającej realne stopy zwrotu z inwestycji – z nasyconiem infrastrukturalnym odpowiednio dopasowanym do potrzeb zmieniającej się gospodarki i rosnących aspiracji społecznych. Proponowane trzy fazy rozwoju:

- etap pierwszy do 2012/2013 r., w którym inwestycje skupią się głównie na infrastrukturze drogowej, korzystając z już dostępnych środków unijnych (oraz ze środków krajowych, np. z długoterminowych obligacji infrastrukturalnych), oraz na rozwoju teleinformatyki – także ze środków UE i ze środków krajowych publicznych lub prywatnych;

- etap drugi do 2020 r. w nowym okresie programowania UE inwestuje uzupełniająco w drogi, ale głównie w rozwój kolei z pozyskanych środków europejskich oraz w multimodalną komunikację w obrębie szerokiego pasma suburbiów (ok. 60–70 km od aglomeracji) – a także z pomocą środków prywatnych w rozwój infrastruktury lotniczej;

- etap trzeci do 2030 r. inwestuje – ze środków, których źródła trzeba dopiero zidentyfikować – w dalsze zwiększanie dostępności transportowej oraz nowe inwestycje w obszarze infrastruktury teleinformatycznej.

- Długoterminowy plan inwestycyjny będzie zależeć od skali możliwości sfinansowania projektów ze źródeł zewnętrznych (środki UE) dostępnych dla przedsiębiorców (firmy działające na rynku – prywatnie lub w sektorze publicznym) oraz ściśle publicznych (środki samorządowe, budżet państwa, obligacje infrastrukturalne). Trzeba to uczynić w sposób pozwalający efektywnie wdrożyć takie procesy, jak:

- modernizacja kolei, czyli poprawa jakości jej funkcjonowania (w szczególności szybsze przejazdy);

- rozwój kolei i zapewnienie połączeń tam, gdzie dziś odczuwa się deficyt; (szczególnie istotne są połączenia sprzyjające edukacji i mobilności zawodowej);

- budowa do lat 20. szybkiej kolei po rozważeniu efektywności ekonomicznej tego przedsięwzięcia;

- budowa autostrad i dróg ekspresowych jako sieci podstawowej dla sprawnego przyływu potoków samochodowych wewnątrz kraju i w ruchu tranzytowym;

- budowa dróg lokalnych i poprawa ich jakości;

- rozbudowa portów lotniczych i głębsza dostępność połączeń lotniczych;

- zwiększenie efektywności w żegludze śródlądowej;

- zapewnienie funkcjonalności i połączeń multimodalnych polskich portów morskich, nastawionych na nowe zadania związane z rozwojem transportu kontenerowego oraz nowych funkcji w handlu źródłami energii;

- rozbudowa sieci teleinformatycznej (w celu zlikwidowania wykluczenia cyfrowego) i jednoczesna jej modernizacja; szczególnie istotne jest nadążanie, a nawet wyprzedzanie zmian technologicznych w tym obszarze – by uniknąć przyszłych form wykluczenia.

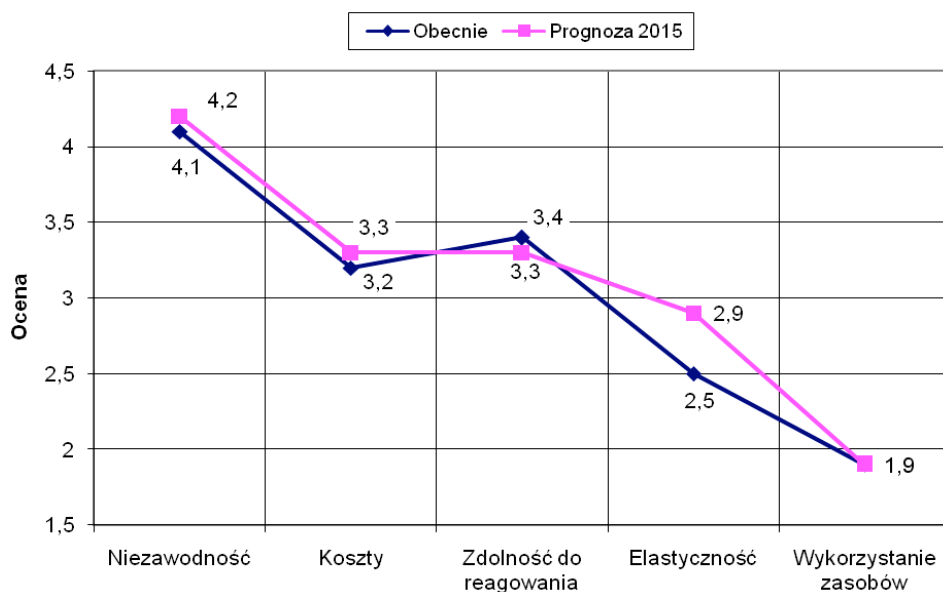
2.3. CELE FUNKCJONOWANIA LOGISTYKI

W tak zdefiniowanym przez Komisję Europejską i Rząd Polski otoczeniu formalnoprawnym poszczególne przedsiębiorstwa branży logistycznej formułują własne lokalne cele funkcjonowania logistyki.

W przeprowadzonej analizie i prognozie aktywności logistycznej przedsiębiorstw [216] wskazano, że niezależnie od obszaru działalności firmy, za najważniejszą właściwość procesu logistycznego uznano jego niezawodność (rys. 2.7–2.9). Takie preferencje są ważne

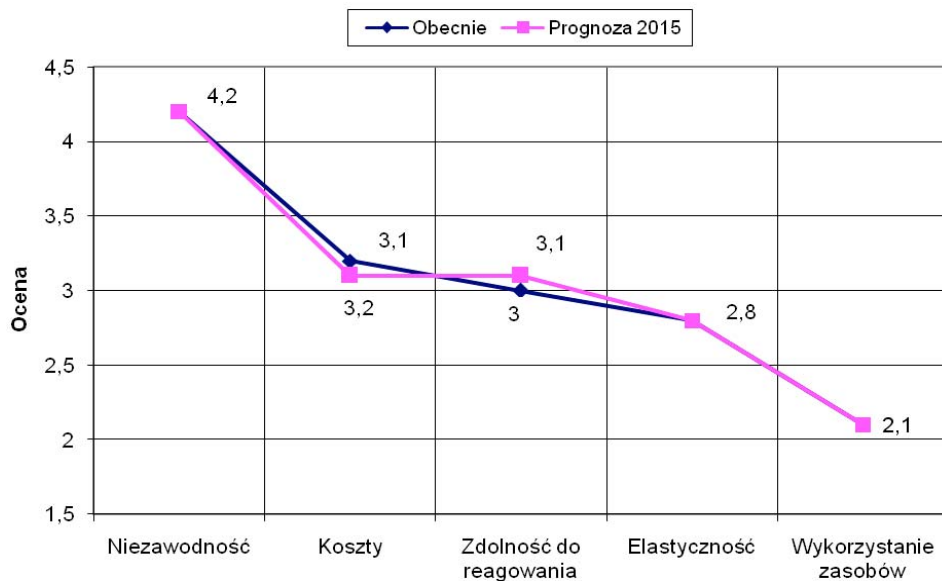
zarówno obecnie, jak i w perspektywie 2015 roku. W skali od 1 (małe znaczenie) do 5 (duże znaczenie) respondenci ocenili ważność niezawodności procesu od 3,9 do 4,2. Biorąc pod uwagę różne gałęzie przemysłu – niezawodność jest obecnie uważana za najważniejszą w przemyśle chemicznym (4,3), następnie w przemyśle motoryzacyjnym – 4,1, przemyśle budowy maszyn – 3,8 i przemyśle elektrotechnicznym – 3,6. W przyszłości dla 2015 roku prognozuje się pewną zmianę preferencji: przemysł elektrotechniczny – 4,0, przemysł chemiczny – 3,9, przemysł budowy maszyn – 3,8 i przemysł motoryzacyjny – 3,6.

Mniejsze znaczenie przywiązują się do kosztów (od 3,1 do 3,3), zdolności do reagowania na zmiany (od 2,9 do 3,4), elastyczności (od 2,5 do 3,2) czy zdolności do wykorzystywania zasobów (od 1,9 do 2,3). W zakresie tych właściwości procesu logistycznego zaobserwowano większe zróżnicowanie pomiędzy poszczególnymi gałęziami przemysłu.

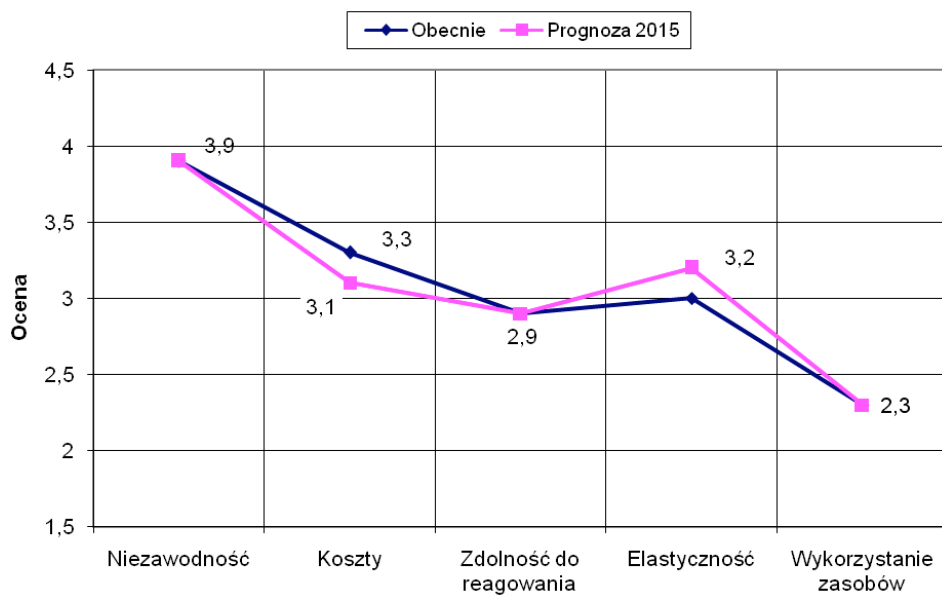


Rys. 2.7. Główne cele logistyki – handel
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [217]

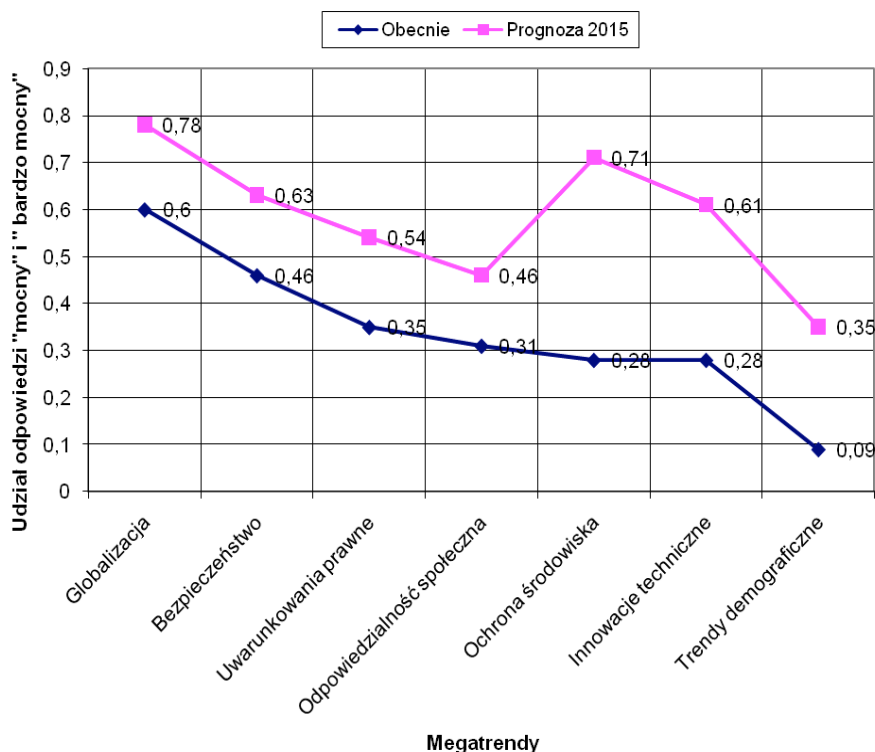
Obecnie koszty, elastyczność i zdolność do wykorzystania zasobów są najważniejsze dla przemysłu motoryzacyjnego (oceny odpowiednio: 3,2, 2,8 i 2,1). Natomiast zdolność do reagowania jest preferowana w przemyśle budowy maszyn – ocena 3,5 wobec średniej oceny 3,0. W przyszłości można spodziewać się pewnej zmiany preferencji: znaczenie kosztów dominuje w przemyśle elektrotechnicznym (2,9), ocena zdolności do reagowania wzrasta i nadal jest największa dla przemysłu budowy maszyn (3,7), a elastyczność i zdolność do wykorzystania zasobów pozostaje najwyżej ceniowana w przemyśle motoryzacyjnym (odpowiednio 3,1 i 2,6).



Rys. 2.8. Główne cele logistyki – przemysł
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie [217]

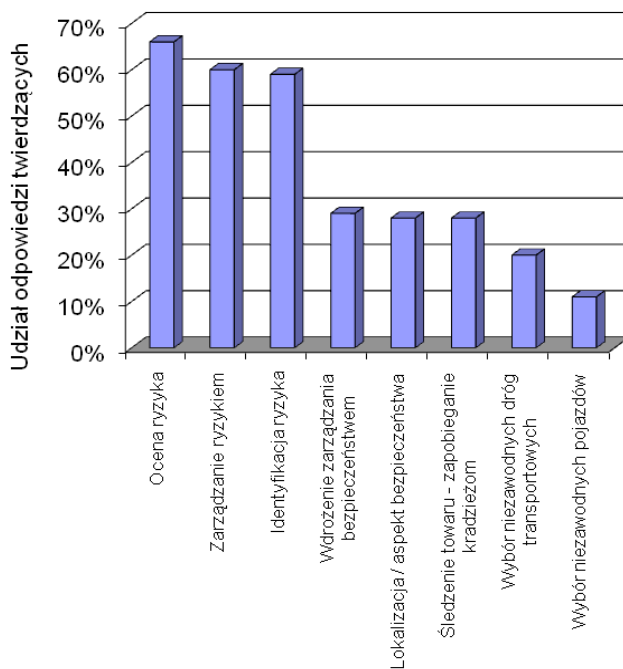


Rys. 2.9. Główne cele logistyki – usługi
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie [217]



Rys. 2.10. Ocena wpływu megatrendów na rozwój systemów logistycznych
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie [217]

Realizacja tak sformułowanych celów przez systemy logistyczne jest zależna od obserwowanych głównych trendów (megatrendów) w gospodarce światowej. Należą do niej takie zjawiska, jak [187]: wzrost kosztów logistycznych i wyższe poziomy zapasów, globalizacja uważana za jeden z najbardziej wpływowych czynników warunkujących dobrobyt w skali ogólnoswiatowej, konsolidacja i regionalizacja łańcucha dostaw, elastyczność zarządzania łańcuchem dostaw i zwiększenie wymogów w zakresie bezpieczeństwa i ograniczenia ryzyka. W badaniach [217] przez megatrendy rozumiano kierunki społecznego oraz technologicznego rozwoju coraz bardziej globalnego społeczeństwa. Wśród megatrendów wpływających na logistykę wymieniono, poza globalizacją i bezpieczeństwem, także uwarunkowania (zgodności) formalnoprawne i polityczne, zagadnienie odpowiedzialności społecznej, ochronę środowiska i zasobów naturalnych, nowości technologiczne i trendy demograficzne. Rozkład opinii w przedsiębiorstwach przemysłowych pokazano na rysunku 2.10. Przedstawiono udział odpowiedzi określających wpływ danego trendu jako silny i bardzo silny. Wartości są uśrednione dla wszystkich badanych branż przemysłowych.

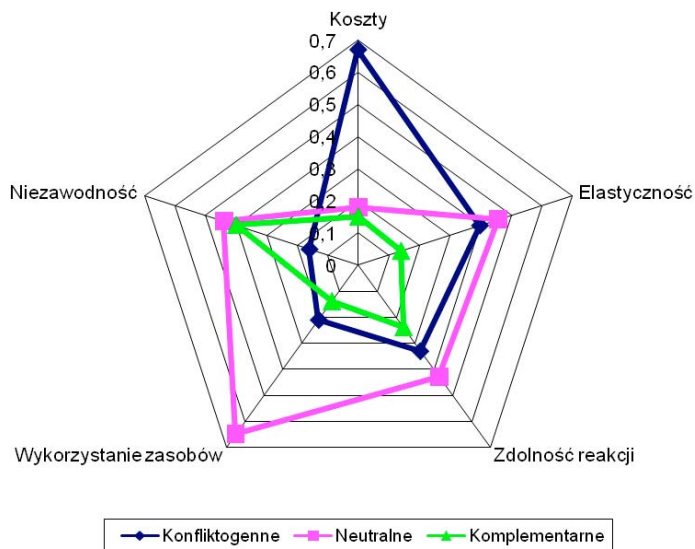


Rys. 2.11. Metody podnoszenia niezawodności i bezpieczeństwa systemu logistycznego
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [217]

Widoczny jest, poza problemem ochrony środowiska i rozwojem technologicznym, prawie proporcjonalny wzrost znaczenia poszczególnych trendów. Na drugim miejscu obecnie (46% odpowiedzi), a trzecim w przyszłości (63%) lokują się problemy bezpieczeństwa. W tym specyficznym przypadku bezpieczeństwo [187] obejmuje problemy występowania zagrożeń mających szkodliwy wpływ na prawidłowe funkcjonowanie systemu logistycznego, takich jak zorganizowana przestępczość lub działalność terrorystyczna. Natomiast ryzyko ma znaczenie szersze i oznacza możliwości wystąpienia zdarzeń niepożądanych, wynikających także z realizacji zamówień, rynku sprzedaży lub działalności samej firmy. W dalszej części tego opracowania tak definiowane zdarzenia będą raczej odnosiły się do właściwości systemu logistycznego nazywanej niezawodnością.

Rozważając metody i narzędzia do podnoszenia niezawodności i bezpieczeństwa systemu logistycznego, na pierwszych miejscach znalazły się procedury dotyczące identyfikacji, oceny i zarządzania ryzykiem w łańcuchu dostaw – rys. 2.11.

Warto także zwrócić uwagę na kierunek wpływu działań dla zapewnienia bezpieczeństwa na cele stawiane logistyce. Rozróżniono działania prowadzące do powstania konfliktu (konfliktogenne), działania neutralne i działania komplementarne lub dopełniające rozwój systemów logistycznych. Wyniki oceny zebrane w przedsiębiorstwach przemysłowych pokazano na rysunku 2.12.



Rys. 2.12. Relacje pomiędzy bezpieczeństwem a celami funkcjonowania systemu logistycznego
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [217]

Za najbardziej konfliktogenne uważają przedsiębiorcy działania w zakresie ograniczenia kosztów logistycznych, najbardziej neutralne są problemy wykorzystania zasobów naturalnych, a za najbardziej komplementarne uznano działania podnoszące niezawodność funkcjonowania systemu.

2.4. PRZYKŁADY NAJLEPSZYCH ROZWIĄZAŃ LOGISTYCZNYCH

Punktem odniesienia do oceny funkcjonujących systemów logistycznych mogą być rozwiązania nagradzane za najlepsze rozwiązania logistyczne w poszczególnych krajach europejskich, a w szczególności nagrodą Europejskiego Towarzystwa Logistycznego ELA (*European Logistics Assotiation*) – European Award for Logistics Excellence przyznawaną od 13 lat. Nagradzane jest przedsiębiorstwo wykazujące się nieprzeciętnymi osiągnięciami w logistyce i zarządzaniu łańcuchami logistycznymi.

Europejskie Towarzystwo Logistyczne zrzesza 30 organizacji narodowych z obszaru środkowej i zachodniej Europy. Członkami jest blisko 50 000 doświadczonych logistyków. Celem działania ELA jest stworzenie platformy wymiany informacji i doświadczeń, zarówno przez indywidualnych pracowników, jak i przez przedsiębiorstwa z branży logistycznej [46].

Tabela 2.1. Zestawienie projektów w konkursie o nagrodę European Award for Logistics Excellence

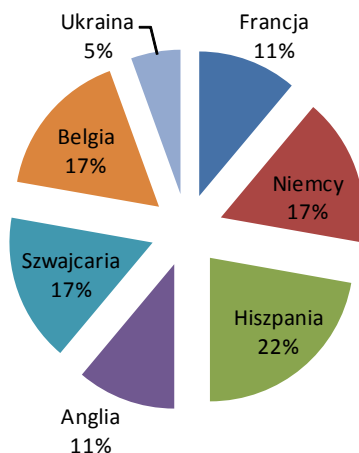
Lp.	Rok	Organizacja			Projekt	
		Kraj	Nazwa	Sektor	Tytuł	Cel
1	2009	Francja	SANOFI WINTHROP INDUSTRIE	Zdrowie	TIRAMISU	Redukcja kosztów transportu oraz wpływ na środowisko (CO ₂)
2		Francja	SYSTEME U Ouest	Dystrybucja	Reclaiming recyclable materials from Systeme U stores	Odzyskiwanie materiałów nadających się do recyklingu z magazynów SYSTÈME U
3		Niemcy	Daimler AG, Mercedes-Benz Werk Untertürkheim, Transportlogistik	Logistyka transportu	Sustainable Outbound logistics for Worldwide Mobility	Centralizacja globalnej logistyki dystrybucji w fabryce Mercedes-Benz Unterturkheim
4		Hiszpania	MANN+HUM-MEL IBERICA, S.A.	Przemysł motoryzacyjny	„The Success of Planned Flexibility”	Przeprojektowanie i przeniesienie fabryki do PLAZA Saragossa
5		Hiszpania	VISIONLAB	Sprzedaż detaliczna; soczewki optyczne	Modernization of Logistics chain: New Distribution Center	Poprawa i adaptacja logistyki VISIONLAB do potrzeb rynku
6		Anglia	EDF Energy Networks	Sieci energoelektryczne	Supply Chain Integration and demand fulfilment	Rozpoznać do 2010 najbardziej użyteczny (efektywny ekonomicznie) łańcuch zaopatrzenia i obsługiwanie dla wsparcia programu inwestycji kapitałowych i użytkowania sieci elektrycznej
7		Szwajcaria	Global Supply Chain Finance Ltd. (GSCF)	Usługi finansowe	Supply Chain Finance Solution	Dostarczyć dostawcom i kupującym innowacyjne rozwiązania finansowe o wysokim poziomie przejrzystości i zaawansowanych mechanizmach kontroli ryzyka
8		Belgia	Q-Food/X-stra	Przemysł spożywczy/mięsny	Customer Oriented supply chain planning in the Food Industry	Wdrożenie koncepcji myślenia systemowego („łańcuchem dostaw”) ukierunkowanego na obsługę klienta. Wykorzystanie podstawowych metod do ustabilizowania organizacji i wsparcia bardzo silnego wzrostu na masowym, konkurencyjnym rynku

cd. tab. 2.1

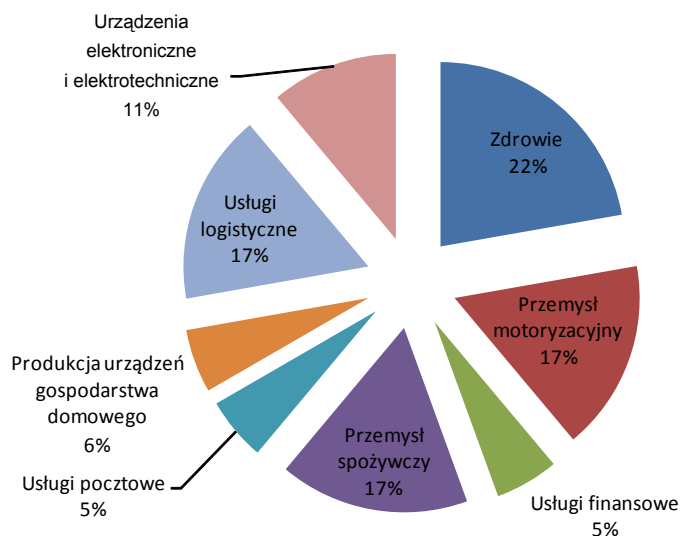
9	2009	Belgia	Saflex – Solutia Europe	Produkcja przekładek zabezpieczających do szkła laminowanego	Integrated global supply chain asset strategy	Przeznycić się do rozwoju i wdrożenia strategii inwestowania aktywów (łącznie z planem inwestycyjnym) w sytuacji bankructwa
10	2010	Szwajcaria	Kantonsspital St. Gallen	Służba zdrowia	Logistics 2010	Usprawnić logistykę szpitalną
11		Szwajcaria	Swiss Post	Usługi pocztowe/listy	REMA – Reengineering Mailprocessing	Przeprowadzić „reengineering” procesów biznesowych w celu obniżenia kosztów operacyjnych (nowe procesy, nowe przepływy logistyczne, nowe centra obsługi listów)
12		Niemcy	AUDI AG	Produkcja samochodów	Customer orientation by means of integrated logistics at Audi	Poprawa zorientowania na klienta i niezawodności dostawy
13		Niemcy	Mars Deutschland	Szybko rotujące produkty konsumpcyjne	Mars AGENDA 2017	„Kształtowanie naszej przyszłości przez kooperację”. Opracowanie platformy informacyjnej pozwalającej na współpracę przedsiębiorstw współpracujących w łańcuchu logistycznym produktów szybko rotujących
14		Hiszpania	FUNDACION HOSPITAL CALAHORRA	Szpital/służba zdrowia	INNOVATION AND EXCELLENCE IN THE MANAGEMENT OF THE SUPPLY CHAIN	Usprawnienie logistyki na 3 poziomach organizacji przez zastosowanie Lean Management, wzrost ekonomicznej efektywności wykorzystywanych zasobów, poprawa osiągnięć procesu i wzrost zewnętrznej i wewnętrznej satysfakcji klientów
15		Hiszpania	GRUPO LECHE PASCUAL	Napoje i żywność	APOLO	Optymalizacja logistyki. Automatyzacja procesów magazynowania, za- i rozładunku

cd. tab. 2.1

16	2010	Anglia	Electrolux Major Appliances	Produkcja/urządzenia gospodarstwa domowego	Supply Chain Integration (UK Vendor Management Inventory)	Zwiększyć sprzedaż partnerów przez podniesienie kosztownej efektywności całego łańcucha logistycznego. Zoptimalizować zapasy m.in. przez poprawienie dokładności prognozowania. Zwiększyć elastyczność i „zwinność” całego łańcucha logistycznego zgodnie ze zmiennym rynkiem i fluktuacjami zapotrzebowania. Poprawić jakość serwisu u partnerów i końcowych klientów
17		Ukraina	Raben Ukraine	Usługi logistyczne	Implementation of cross-docking technology on the Ukrainian market	Uzyskać maksymalny zysk dla klientów i rynku z zastosowaniem technologii cross-docking
18		Belgia	Tbp electronics Belgium NV	Produkcja urządzeń elektronicznych	Journey to a low cost and agile supply chain	„Jak przeżyć w kraju o wysokich kosztach za pomocą zintegrowanego łańcucha logistycznego ukierunkowanego na klienta”



Rys. 2.13. Kraje zgłaszające wnioski o nagrodę ELA w latach 2009 i 2010



Rys. 2.14. Obszary funkcjonowania zgłoszonych przedsiębiorstw

Charakterystykę 18 zgłoszonych do nagrody ELA w latach 2009 i 2010 projektów logistycznych zestawiono w tabeli 2.1. Projekty pochodzą z 7 krajów; najwięcej z Hiszpanii, Belgii, Niemiec i Szwajcarii – rys. 2.13. Zakresy funkcjonowania zgłoszonych przedsiębiorstw zgrupowano w 8 obszarach – rys. 2.14.

Tradycyjny zakres zainteresowania nowoczesnymi rozwiązaniami logistycznymi – przemysł motoryzacyjny, podobnie jak i firmy świadczące szeroko rozumiane usługi logistyczne znalazły się na drugim miejscu. Najwięcej projektów lokuje się w obszarze służby

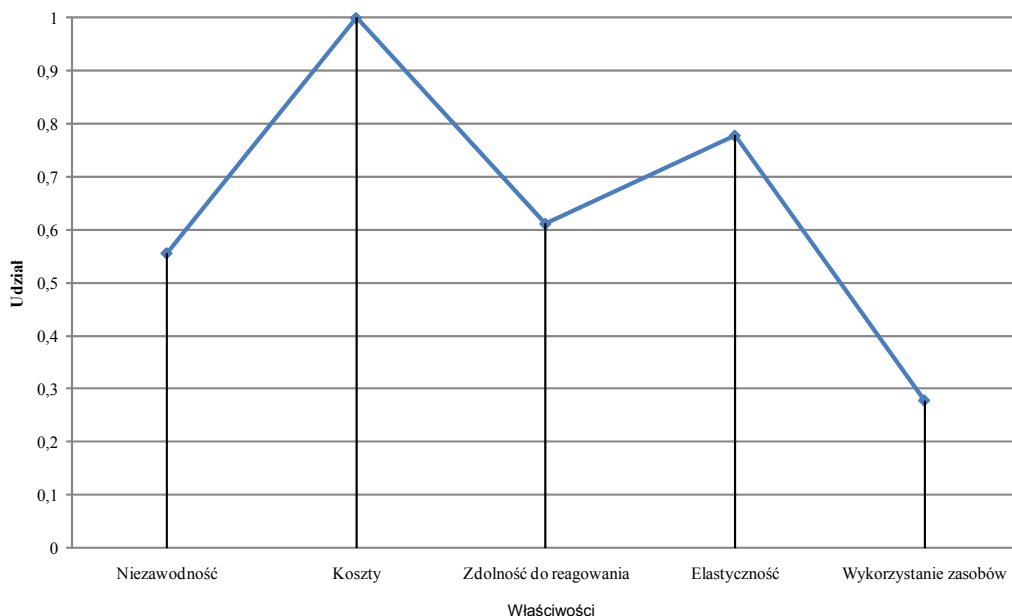
zdrowia; obserwuje się duże zainteresowanie przenoszeniem rozwiązań logistycznych do szpitali – logistyką szpitalną. Rośnie również znaczenie logistyki w przemyśle spożywczym; logistyki tzw. dóbr szybko rotujących. W tym obszarze znalazł się także zwycięzca European Award for Logistics Excellence w 2010 roku – firma Mars Deutschland.

Analiza projektów w zakresie preferowanych właściwości systemów logistycznych, analogicznie do badań omówionych w punkcie 2.3 została zestawiona w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Analiza projektów w konkursie o nagrodę European Award for Logistics Excellence

Lp.	Rok	Organizacja		Właściwości				
		Kraj	Nazwa	Niezawodność	Koszty	Zdolność do reagowania	Elastyczność	Wykorzystanie zasobów
1	2009	Francja	SANOFI WINTHROP INDUSTRIE	N	T	N	N	T
2		Francja	SYSTEME U Ouest	N	T	N	N	T
3		Niemcy	Daimler AG, Mercedes-Benz Werk Untertürkheim, Transportlogistik	T	T	T	T	T
4		Hiszpania	MANN+HUMMEL IBERICA,S.A.	N	T	N	T	N
5		Hiszpania	VISIONLAB	T	T	T	T	N
6		Anglia	EDF Energy Networks	T	T	N	N	N
7		Szwajcaria	Global Supply Chain Finance Ltd. (GSCF)	T	T	T	T	N
8		Belgia	Q-Food/X-stra	N	T	T	T	N
9		Belgia	Saflex – Solutia Europe	N	T	T	T	N
10	2010	Szwajcaria	Kantonsspital St.Gallen	T	T	N	T	N
11		Szwajcaria	Swiss Post	T	T	T	T	T
12		Niemcy	AUDI AG	T	T	T	T	N
13		Niemcy	Mars Deutschland	N	T	T	T	N
14		Hiszpania	FUNDACION HOSPITAL CALAHORRA	N	T	T	T	T
15		Hiszpania	GRUPO LECHE PASCUAL	T	T	N	T	N
16		Anglia	Electrolux Major Appliances	T	T	T	T	N
17		Ukraina	Raben Ukraine	N	T	N	N	N
18		Belgia	tbp electronics Belgium NV	T	T	T	T	N

Wyniki analizy pokazano na rysunku 2.15. Ranga poszczególnych właściwości systemów jest nieco inna niż np. pokazana na rysunkach 2.7–2.9.



Rys. 2.15. Właściwości systemów logistycznych zgłoszonych do nagrody ELA w latach 2009 i 2010

We wszystkich projektach najważniejszym celem było zmniejszenie kosztów logistycznych. W następnej kolejności zwracano uwagę na elastyczność łańcucha logistycznego i zdolność do reagowania na zmiany zachodzące w otoczeniu systemu. Nieco ponad 50% projektów jest ukierunkowanych na podniesienie niezawodności działania systemu, przy czym różnie rozumie się samo pojęcie niezawodności. W projekcie 12 – niezawodność dostaw jest stawiana jako jeden z głównych celów do osiągnięcia, a wymagania ilościowe sformułowano jako 100% niezawodności dostawy przy minimalnym czasie dostawy. Natomiast z przedstawionych danych wynika, że osiągnięte rezultaty są na poziomie około 80%, przy czym nie jest przedstawiona metoda pomiaru tych wyników.

Ogólnie można stwierdzić, że w analizowanych projektach jest podkreślana potrzeba podnoszenia niezawodności systemu logistycznego. Niezawodność jest rozumiana najczęściej jako stopień zaspokojenia potrzeb klienta. Potrzeba więc bardziej precyzyjnego zdefiniowania takich ugruntowanych w naukach systemowych pojęć, jak: niezawodność, jakość, bezpieczeństwo czy ryzyko. Wymaga to także opracowania nowych lub modyfikacji istniejących modeli niezawodności elementów systemu logistycznego i systemu logistycznego jako całości oraz przeprowadzenia analizy możliwości korzystania z tych modeli do opisu istniejących rzeczywistych rozwiązań. Brakuje też sprecyzowanych sposobów pomiaru niezawodności, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia porównywanie wyników poszczególnych badań pomiędzy sobą.

3. SYSTEM LOGISTYCZNY

3.1. POJĘCIE SYSTEMU

Popularność pojęcia systemu stanowi jedno z najbardziej znaczących zjawisk dla współczesnych przemian w nauce i technice. Zastosowanie ujęcia systemowego wiąże się we współczesnych czasach z załamaniem wzorca nauki kształtującego się od kilku wieków [121]. Wzorzec ten (nazywany redukcjonistycznym) wywodzi się w filozofii od Kartezjusza, a w fizyce od Galileusza. XX-wieczne rozumienie nauki bazuje na prawach Izaaka Newtona. Podstawową zasadą redukcyjnego podejścia do rzeczywistości jest podział badanego obiektu lub problemu na części składowe i przez kolejne uproszczenia (redukowanie złożoności zagadnienia) zbadanie właściwości jego oddzielnych części, żeby przez syntezę wyników badań wnioskować o zachowaniu się całości [121]. Ten sposób ujęcia rzeczywistości odnosił wielkie sukcesy w badaniach obiektów prostych o małej złożoności (o małej liczbie elementów i ich wzajemnych połączeń) i dziś też jest do takich zagadnień stosowany. Podejście redukcjonistyczne często nazywa się także mechanistycznym – wyobrażano sobie funkcjonowanie świata tak jak działanie mechanicznego zegara.

W XX wieku pojawiły się m.in. w fizyce odkrycia i koncepcje, które nie mieszczą się w newtonowskim pojmowaniu świata fizycznego (między innymi teorie Einsteina). Podejście systemowe pojawiło się jako próba przełamania trudności wynikających z redukcjonistycznego wzorca nauki [9].

Problem podejścia systemowego można najkrócej określić jako sprzeczność zachodząca pomiędzy ludzkim poznaniem całości i części, ogółu i szczegółu. Ilustruje to sformułowanie, że: „całość to więcej niż suma części”. Uważa się, że sposób poznania otaczającej nas rzeczywistości od ogółu do szczegółu jest porządkiem logicznym właściwym dla wykładania zdobytej prawdy, natomiast metoda zdobywania wiedzy o świecie od szczegółu do ogółu jest kierunkiem właściwym dla umysłu człowieka [28].

Sposób poznania świata zależy od skali zjawisk, z którymi mamy do czynienia. Istnieje skala makro odbierana za pomocą naszych zmysłów, „gołym” okiem, uchem, powonieniem. Poznajemy całość, a dopiero potem na drodze pewnej refleksji potrafi-

my wyodrębnić części składowe i ich wzajemne powiązania. Znajomość całości jest wcześniejsza niż znajomość części tworzących tę całość.

Podejście systemowe stanowi współczesną próbę rozwiązania dylematu części i całości. Naczelną zasadą teorii systemów jest całościowe, czyli holistyczne ujmowanie tej rzeczywistości, w przeciwieństwie do ujęcia redukcjonistycznego. Można w niej wyróżnić trzy podstawowe nurty badawcze [47]:

- Nurt filozoficzno-metodyczny, za inicjatora którego uważa się pracującego w USA austriackiego biologa Ludwika von Bertalanffy'ego, który w latach 30. XX wieku zaproponował pojęcie systemu ogólnego, a w latach 50. lansował program naukowy, który nazwano ogólną teorią systemów. Propozycje teoretyczne Bertalanffy'ego związane były z jego studiami biologicznymi. Później spostrzeżono, że pojęcie systemu stosować można i warto nie tylko do zjawisk biologicznych. Okazało się, że pewne właściwości systemu nie zależą od dziedziny rzeczywistości, w ramach której je wykryto, ale są charakterystyczne także dla zupełnie innych systemów (np. także dla systemów technicznych).

Ludwig von Bertalanffy upatruje główne zadania ogólnej teorii systemów w [9]:

- ogólnej tendencji w kierunku integracji nauk przyrodniczych i społecznych,
- próbie stworzenia ścisłej teorii w pozafizycznych dziedzinach nauki – lecz nie na wzór fizyki,
- rozwijaniu unifikujących zasad przecinających wertykalnie całokształt poszczególnych nauk, zmierzając w ten sposób do jedności nauki,
- dążeniu do integracji prac naukowych, nauczania i wychowania.

Istnienie teorii systemów umożliwia przenoszenie wyników badań naukowych z jednej dziedziny do innej, w której takie modele nie istnieją. Sprzyja tworzeniu modeli teoretycznych w tych dziedzinach; ułatwia także porozumiewanie się specjalistów różnych dziedzin [47]. Przedstawiciele tego kierunku traktują teorię systemów jako metateorię, która ze względu na swój uniwersalny charakter tworzy podwaliny pod budowę „jednolitej nauki”. Niewątpliwą zasługą ogólnej teorii systemów jest rozpowszechnienie się systemowego sposobu postrzegania rzeczywistości, a także rozpowszechnienie i jednolite rozumienie pewnych pojęć ogólnych, co sprzyja porozumiewaniu się w badaniach interdyscyplinarnych.

- Nurt aksjomatyczno-formalny. Polega na tworzeniu aksjomatycznej teorii systemów, w której z możliwie małej liczby pojęć i twierdzeń podstawowych, dotyczących w szczególności pojęcia systemu, wynikają twierdzenia pochodne. Próbę tworzenia takiej teorii podjął Mesarović, stosując w tym celu teorię zbiorów i definiując system jako zbiór relacji między obserwowanymi cechami systemu. Mesarović zakłada [142], że teoria systemów zajmuje się objaśnianiem zjawisk lub struktur pojęciowych w kategoriach przetwarzania informacji i procesu podejmowania decyzji. W teorii tej istotny jest sposób przekazywania informacji oraz osiągania celów postawionych systemowi. Do opisu badanego systemu teoria proponuje wykorzystanie metody formalizacji, w której wyróżnia się dwa etapy:

◦ najpierw należy sformułować werbalną definicję systemu, zgodną z intuicyjnym znaczeniem tegoż systemu w odpowiednich dziedzinach zastosowań,

◦ następnie należy tak przyjęte pojęcie systemu zdefiniować aksjomatycznie za pomocą minimalnej struktury matematycznej.

Zaletą takiego podejścia jest możliwość badania bardzo złożonych systemów jako wzajemnie połączonych podsystemów. Znaczenie tego nurtu ogranicza się do zagadnień definicyjno-klasyfikacyjnych [47].

- Nurt analityczno-systemowy. Polega na teoretycznym uogólnianiu wyników badań systemowych (analizy systemowej), dotyczących tworzenia i użytkowania modeli matematycznych różnorodnych złożonych systemów. Zachowanie systemu zależy od odpowiednich oddziaływań sterujących (decyzyjnych). Teoria systemów w tym aspekcie bazuje na różnorodnym modelowaniu matematycznym, np. badaniach operacyjnych, teorii sterowania i optymalizacji, teorii gier. Teoria systemów przyczyniła się do powstania i rozwoju określonych kierunków w wymienionych dziedzinach, m.in. [47]:

- zagadnienie podejmowania decyzji przyczyniło się do rozwoju teorii optymalizacji wektorowej (polioptymalizacji),

- modelownie systemów, w których występuje struktura organizacyjna – do powstania i rozwoju teorii układów hierarchicznych,

- potrzeba modelowania zjawisk, w których występują pojęcia nieostre, spowodowała stworzenie teorii zbiorów rozmytych,

- modelowanie procesów, które charakteryzują skokowe zmiany, przyczyniło się do powstania teorii katastrof.

Należy podkreślić, że podejście systemowe charakteryzuje przejście [28]:

- od części do całości, z uwzględnieniem roli części w całości,
- od struktury systemu do procesów w nim zachodzących,
- od nauki obiektywnej (absolutnej) do epistemicznej, tzn. zależnej od układu odniesienia,
- od koncepcji nauki jako „budowli” do koncepcji „sieci” jako metafory naukowej,
- od wiedzy pewnej do przybliżonej, będącej kolejnym etapem aproksymacji rzeczywistości,

- od liniowego modelu poznania i wdrożeń: nauki podstawowe – nauki stosowane – prace rozwojowe – nowe technologie (procesowe i produktowe), do sieciowego modelu interakcji każdego szczebla z każdym,

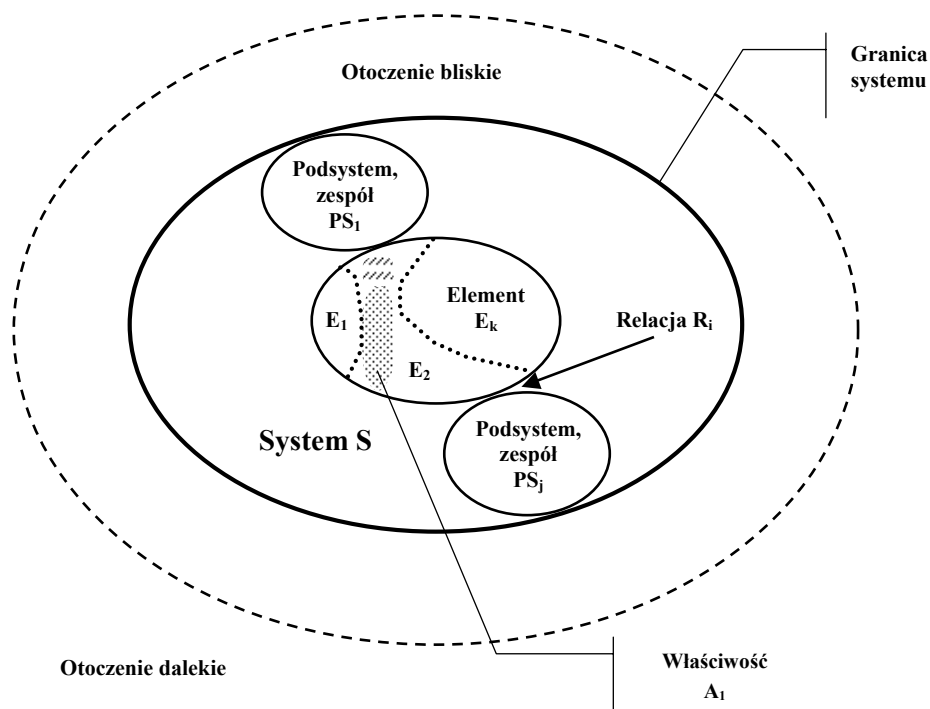
- od prawdy absolutnej do stwierdzeń kontekstowych.

3.1.1. DEFINICJA SYSTEMU

Słowo system pochodzi z języka greckiego i jest używane w kilku znaczeniach [47]. Przez pojęcie system rozumie się np.:

- skoordynowany wewnętrznie układ elementów, który ma określoną strukturę działania (np. system produkcyjny złożony z różnych obrabiarek),

- zbiór sposobów działania, wykonywania skomplikowanych czynności (np. system projektowania elementów pojazdu),
 - zbiór zasad organizacji, ogół norm, reguł i standardów obowiązujących w danej dziedzinie (np. system finansowy przedsiębiorstwa),
 - całościowy i uporządkowany zespół zadań powiązanych ze sobą określonymi, logicznymi stosunkami (systemem w tym znaczeniu jest nazywana każda teoria metodologicznie poprawna i dotycząca dostatecznie obszernego fragmentu rzeczywistości).
- Można zatem system rozumieć [28] jako pewną całość wchodzącą w skład większych całości i utworzoną z części (mniejszych całości) powiązanych w sposób nadający jej pewną strukturę, a wyodrębnionej z rzeczywistości ze względu na pewne funkcje realizowane przez te całości. Wspomniane wyodrębnienie systemu – równoznaczne z jego identyfikacją – polega na uwzględnieniu w jego analizie tych i tylko tych składników oraz tych i tylko tych powiązań, które ze względu na cel (rację istnienia, budowy) danego systemu są analizowane.



Rys. 3.1. Schemat pojęcia system
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie [229]

Schemat ilustrujący pojęcie systemu pokazano na rysunku 3.1. W systemie S (całości) wyróżniono podsystemy (mniejsze całości) S₁, S₂, ..., S_j. Każdy z podsystemów S_j może

zostać podzielony na kolejne składniki (części), aż w końcu zdefiniujemy elementy E_k . Element jest składnikiem systemu, który nie podlega dalszemu podziałowi na części składowe. Między podsystemami i elementami występują pewne powiązania nazwane tutaj relacjami R_i . Wszystko, co pozostaje poza analizowanym systemem (wyodrębnionym z rzeczywistości), znajduje się w otoczeniu systemu. W zależności od położenia elementów w systemie można wyróżnić elementy wewnętrzne systemu oraz elementy graniczne systemu. Elementy graniczne, które mają sprzężenie z elementami niebędącymi elementami analizowanego systemu (elementy otoczenia, elementy graniczne innego systemu) są to elementy wejściowe i elementy wyjściowe systemu (wejścia i wyjścia).

Upraszczając tę definicję, można przyjąć, że system jest określony przez zbiór elementów z pewnymi właściwościami i relacjami, stanowiący jedną celową całość. Jeżeli zbiór elementów \mathbf{E} systemu \mathbf{S} ma właściwości (cechy, atrybuty) \mathbf{A} powiązane relacjami \mathbf{R} , to matematycznie możemy system zapisać jako [28]:

$$\mathbf{S} = (\mathbf{E}, \mathbf{A}, \mathbf{R}), \quad \mathbf{E} = [E_1, \dots, E_n]_b, \quad \mathbf{A} = [A_1, \dots, A_{m \times n}]_b, \quad \mathbf{R} = [R_1, \dots, R_{r \times n - 1}] \quad (3.1)$$

Zgodnie z wzorem (3.1) system jest zbudowany z n elementów, które mogą mieć $m \times n$ właściwości i być powiązane $r \times n - 1$ relacjami.

Znane są [193] inne formalne postaci opisu systemu. Zgodnie z teoriomnogościową definicją Wintgena [244] stosuje się prostszy opis systemu \mathbf{S} :

$$\mathbf{S} = (\mathbf{A}, \mathbf{R}) \quad (3.2)$$

gdzie: $\mathbf{A} = [A_i; i = 1, \dots, I]$ – zbiór elementów, $\mathbf{R} = [R_j; j = 1, \dots, J]$ – zbiór relacji systemotwórczych między elementami.

Dla niektórych zastosowań pożyteczne może być wykorzystanie definicji [193], według której system jest opisany trójką:

$$\mathbf{S} = (\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{R}) \quad (3.3)$$

gdzie: \mathbf{X} – zbiór wejść, \mathbf{Y} – zbiór wyjść, \mathbf{R} – zbiór relacji między \mathbf{X} i \mathbf{Y} .

Zapis (3.3) nazywany jest w literaturze [142] metodą opisu przez „wejście–wyjście” jako uściślenie opisu formalnego Mesarivica – opis terminalny, przyczynowy. Drugim proponowanym podejściem jest metoda opisu przez „dążenie do celu” – opis teleologiczny podejmowania decyzji.

Wówczas przyjmuje się, że [142]:

\mathbf{X} – zbiór wejść,

\mathbf{Y} – zbiór wyjść,

\mathbf{M} – obiekt decyzyjny,

\mathbf{V} – obiekt wartościowania,

oraz:

$\mathbf{P}: \mathbf{X} \times \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Y}$ – funkcja wyniku (procesu),

$\mathbf{G}: \mathbf{M} \times \mathbf{Y} \rightarrow \mathbf{V}$ – funkcja charakterystyki (procesu) lub funkcja celu.

Stąd system $\mathbf{S} \subset \mathbf{X} \times \mathbf{Y}$ można określić następująco:

para $(x, y) \in \mathbf{S}$, dla $x \in \mathbf{X}$ i $y \in \mathbf{Y} \Leftrightarrow$ gdy istnieje $m_x \in \mathbf{M}$, taka że dla każdego $m \in \mathbf{M}$

$$G(m_x, P(x, m_x)) \leq G(m, P(x, m))$$

oraz

$$y = P(x, m_x)$$

czyli:

dla każdego wejścia $x \in \mathbf{X}$, wyjście $y \in \mathbf{Y}$ przyporządkowuje się w taki sposób, aby odpowiednia funkcja G charakterystyki procesu osiągała wartość minimalną, spełniając jednocześnie ograniczenia określone przez funkcje wyniku P . Celem działania systemu S jest minimalizacja funkcji celu G .

W inżynierii systemów system jest traktowany jako realizator działań zinstrumentalizowanych [193]. System jest wówczas definiowany jako:

$$\mathbf{S} = (\mathbf{M}, \mathbf{A}, \mathbf{C}, \mathbf{G}, \mathbf{F}) \quad (3.4)$$

gdzie: $\mathbf{M} = [\mathbf{M}_i; i = 1, \dots, I]$ – zbiór operatorów, $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_k; k = 1, \dots, K]$ – zbiór obiektów technicznych, $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_n; n = 1, \dots, N]$ – zbiór elementów otoczenia, $\mathbf{G} = [\mathbf{G}_l; l = 1, \dots, L]$ – zbiór zadań, $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_j; j = 1, \dots, J]$ – zbiór technologii.

Przez operatora (użytkownika, obsługującego) rozumie się [193] osobę posługującą się urządzeniami (obiektami technicznymi) jako instrumentami działania. Obiekty techniczne są niezbędne do wykonania danego działania. Zadanie jest najczęściej rozumiane jako ciąg czynności (zabiegów) do wykonania w określonym porządku ustalonym według czasu, sposobu realizacji, rodzaju obiektu technicznego lub innych kryteriów. Sekwencja zadań powiązanych relacjami składa się na technologię – pewną procedurę osiągnięcia stanu będącego celem działania.

Najważniejsze w opisie systemu jest badanie powiązań między elementami (komponentami) systemu. W tych relacjach zawiera się istota identyfikacji struktury i funkcjonowania analizowanego systemu.

Zbiór relacji występujących pomiędzy elementami, niezbędnych do realizacji przez system określonych celów, nazywa się strukturą systemu. Formalnie strukturę można zapisać jako [193]:

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}_j; j = 1, \dots, J] \quad (3.5)$$

gdzie: \mathbf{R}_j – relacja systemotwórcza.

Relacje mogą mieć charakter materialny, energetyczny, informacyjny lub czasowy. Sprzężenia mogą być jedno- lub wieloparametrowe. Różne relacje między elementami mogą tworzyć różne struktury. O rodzaju struktury decydują przede wszystkim:

- liczba elementów,
- liczba powiązań między elementami,
- stopień zróżnicowania elementów,
- rodzaje powiązań.

Można wyróżnić wiele struktur systemu. W aspekcie niezawodności systemu znane są struktury: szeregową, równoległą, mieszana, mostkowa, progowa lub złożona.

System oprócz struktury jest charakteryzowany [193] przez jego zachowanie i właściwości. Zachowanie systemu oznacza sposób reakcji systemu na bodźce. Właściwościami systemu nazywa się funkcję określoną na zbiorze stanów systemu, ujawniającą podobieństwo w przejściach systemu pomiędzy stanami. Stan systemu jest określony przez zbiór wartości zmiennych opisujących system w sensie ilościowym i jakościowym.

Elementy otoczenia pozostają z elementami systemu w relacjach o różnym znaczeniu dla analizowanego zagadnienia. Ta część otoczenia, której wpływu nie można pominąć nazywa się otoczeniem bliskim. Natomiast część otoczenia, którego wpływ na system i jego zachowanie można pominąć nazywa się otoczeniem dalekim. O zakwalifikowaniu do otoczenia bliskiego lub dalekiego nie decyduje dosłowna odległość geometryczna, a siła związku z realizowaną przez system funkcją celu.

Identyfikacja (opis) systemu wymaga wobec tego określenia [239]:

- celu działania systemu:
 - główny cel, misja,
 - drugorzędne cele, których nie można pominąć,
 - poziom istotności, ważności tych funkcji;
- struktury systemu:
 - komponenty systemu (podsystemy, zespoły, elementy), ich rola i charakterystyki (właściwości, atrybuty),
 - relacje, powiązania między komponentami i pomiędzy własnościami,
 - lokalizacja komponentów;
- otoczenia systemu:
 - inne rozważane systemy,
 - warunki funkcjonowania systemu.

Podsumowując, każdy analizowany system można opisać kilkoma właściwościami, przy czym do najważniejszych cech systemu należy [78]:

- **Kompleksowość** – system stanowi pewną całość, mającą ściśle określone właściwości i sposób zachowania. Występowanie tej cechy nie zależy od wielkości i złożoności systemu oraz od odrębności jego cech fizycznych i funkcji komponentów.

- **Dekomponowalność** – zdolność do podziału (dekompozycji) systemu na mniejsze wzajemnie powiązane części składowe: podsystemy, układy i elementy. Wyróżnione w trakcie podziału składniki mogą być rozważane oddzielnie (jako podsystem), przy czym pozostałe komponenty analizowanego systemu stanowią wówczas otoczenie tego składnika. Działaniem odwrotnym do dekompozycji jest agregacja komponentów w jeden system.

- **Odosobnienie** – możliwość wyodrębnienia obiektu z otoczenia i rozpatrywania go jako tzw. system zamknięty. Właściwość ta określa, że nie istnieją takie elementy systemu, które byłyby zarazem elementami otoczenia i odwrotnie. Z tą cechą łączą się szczególnie reguły ścisłości, niezmienności, zupełności i rozłączności. Reguła ścisłości wymaga, aby jednoznacznie określić, które elementy należą do systemu, a które do

otoczenia. Reguła niezmienności nie pozwala w trakcie prowadzonej analizy na zmianę przynależności komponentów systemu (do systemu lub do otoczenia). Zupełność oznacza, że wszystkie komponenty systemu mają określoną przynależność. Rozłączność powoduje, że żaden komponent systemu nie może należeć jednocześnie do więcej niż jednego podsystemu.

- Identyfikowalność – możliwość wyodrębnienia każdego z jego odwzorowanych elementów. Oznacza to, że istnieje zdolność do rozróżniania, klasyfikowania i charakteryzowania poszczególnych komponentów systemu.

- Różnorodność – każdy element systemu może charakteryzować się unikatowym sposobem działania i stanem różnym od stanów i sposobów działania pozostałych elementów. Wpływa to na sposób działania i stan całego systemu.

- Nieokreśloność – nie można określić jednoznacznie wszystkich właściwości komponentów i relacji pomiędzy nimi. Analiza systemu wymaga więc przeprowadzenia analizy niepewności i wrażliwości. Z niepewności wiedzy wynika potrzeba stosowania w modelowaniu np. teorii prawdopodobieństwa, teorii zbiorów rozmytych, metod przedziałowych itp.

- Adaptacyjność – właściwość umożliwiająca reagowanie w sposób pożądaný (osiągnięcie realizowanego celu) na zmiany stanów systemu i zmiany stanów otoczenia.

- Współzależność – cecha zależna od liczby i znaczenia relacji między elementami systemu, których zmiana stanu wywoła reakcję pozostałych elementów.

Do wymienianych przez wielu autorów [np.: 193, 97] właściwości systemu należy także niezawodność, rozumiana ogólnie jako zdolność do wykazywania w pewnym procesie pożądanego i uprzednio określonego zachowania.

3.1.2. DEFINICJA PROCESU

Osiągnięcie przez system zamierzonych celów wymaga realizacji kilku skoordynowanych działań, realizacji pewnego procesu. Termin proces jest definiowany na kilka sposobów, m.in. jako [193]:

- zjawisko odnoszące się do fragmentu rzeczywistości i oznaczające transformację stanu tego fragmentu rzeczywistości,

- sekwencje elementarnych zmian stanu fragmentu rzeczywistości zachodzących w czasie,

- przebieg następujących po sobie powiązanych przyczynowo zmian, stanowiących stadia, fazy, etapy zmiany rzeczywistości,

- przebieg, rozwijanie się, przeobrażanie się czegoś.

Termin proces w najbardziej ogólnym ujęciu można zdefiniować [193] jako sekwencje wzajemnie powiązanych stanów rzeczywistości występujących po sobie w czasie:

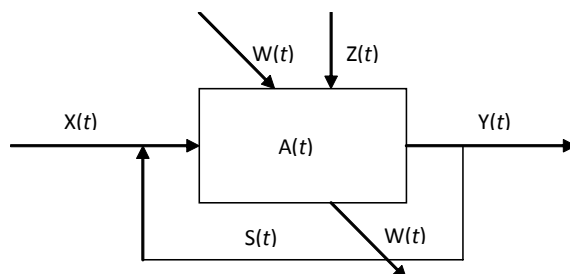
$$P(t_i) = (S(t_i), R(t_i)) \quad (3.6)$$

$$S(t_i) = \{S_l(t_i); l = 1, \dots, L\} \quad t_p < t_i < t_k$$

gdzie: $S(t_i)$ – stan systemu w chwili t_i , $S_l(t_i)$ – wartość chwilowa zmiennej S_l , $R(t_i)$ – relacja między $S(t_i)$ a $S(t_{i-1})$, przy czym stan systemu jest określony przez zbiór wartości opisujących system ilościowo lub jakościowo.

Analizowane dalej systemy techniczne mają za zadanie realizację określonych procesów technologicznych ukierunkowanych często na wyprodukowanie zamówionego wyrobu. Kształtowanie wyrobu – realizacja procesu roboczego wymaga (np. [110]) dostarczania surowców, półwyrobów lub komponentów składowych, odbioru gotowych produktów, usuwania odpadów, kompensowania destrukcyjnych oddziaływań otoczenia oraz unieszkodliwiania produktów odpadowych. W trakcie realizacji procesu technologicznego występują więc następujące procesy (rys. 3.2):

- robocze $A(t)$,
- zakłócające $Z(t)$,
- wspomagające $W(t)$,
- sterujące $S(t)$.



Rys. 3.2. Elementy procesu technologicznego
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [193]

Przez procesy zakłócające rozumie się [193] te procesy generowane przez otoczenie systemu realizującego proces technologiczny, których destrukcyjne oddziaływanie uniemożliwia realizację procesu technologicznego lub zakłóca jego przebieg w stopniu niemożliwym do przyjęcia. Aby ograniczyć destrukcyjne oddziaływanie otoczenia, należy znać naturę i siłę oddziaływania tych procesów oraz stopień wrażliwości systemu na wymuszenie zewnętrzne.

Procesy wspomagające wpływają na efektywność, a nawet możliwość realizacji procesów roboczych. Należą do nich m.in. procesy:

- pozyskania surowca, półwyrobu, komponentów składowych,
- przechowywania materiałów,
- przygotowania materiałów,
- zasilania energetycznego,
- zasilania informacyjnego,

- przygotowania obsługi,
- odbioru lub dostawy produktu,
- konfekcjonowania, pakowania produktu,
- uzdatniania produktów odpadowych,
- unieszkodliwiania odpadów,
- zapobiegania destrukcyjnym skutkom procesów zakłócających.

Liczba i stopień występowania procesów wspomagających zależy od specyfiki procesów technologicznych i obszaru funkcjonowania analizowanego systemu. Do typowych systemów realizujących zadania wspomagające podstawowe procesy operacyjne i robocze należą systemy logistyczne.

W tym aspekcie [142] wartościowe jest przypomnienie pracy [262], w której wprowadzono podział wszystkich możliwych systemów na dwie kategorie:

- systemy konfiguracyjne – porządkujące, relacyjne, statyczne,
- systemy działaniowe – operacyjne, przetwarzające, procesowe, dynamiczne.

Podkreślono, że celem każdego działania jest wywołanie pewnej zmiany w danym fragmencie rzeczywistości. W pracy [262] wprowadzono pojęcie systemów specjalnych (właściwie *podsystemów*), wśród których wyróżniony został *system logistyczny L*. Ze względu na łatwość analizy i syntezy systemów działaniowych, zwłaszcza technicznych, wyróżnia się cztery rodzaje systemów specjalnych:

- system procesowy *P*, który zapewnia zdolność systemu do funkcjonowania, czyli realizacji, osiągania przez cały system (nadsystem) swoich celów,
- system sterowania *C*, który służy do kierowania i koordynacji działalności pozostałych systemów do realizacji celów całego systemu,
- system informacyjny *J*, służący do organizacji przetwarzania i dystrybucji strumieni informacji, zarówno wewnątrz systemu (nadsystemu), jak i na zewnątrz systemu,
- **system logistyczny *L***, służący do utrzymywania i zaopatrywania pozostałych systemów specjalnych (i siebie samego), aby działanie całego systemu przebiegało prawidłowo.

Jednocześnie, wobec dużej różnorodności definicji pojęcia system, uważa się [262] za efektywne podejście analityczne – rozważenie pojęcia systemu na drodze pragmatycznej; metodologicznej rekonstrukcji osobliwości traktowania obiektów jako systemów przez systemowo zorientowanych analityków.

3.2. LOGISTYKA

3.2.1. POJĘCIE LOGISTYKA

W literaturze zagadnienia można znaleźć wiele różnych definicji logistyki w zależności od celu danej publikacji, wykształcenia głównych odbiorców omawianej

wiedzy (wykształcenia techniczne, ekonomiczne, humanistyczne) oraz zainteresowań i doświadczeń praktycznych autora.

W pracy [100] wyróżniono 3 definicje:

- Logistyka to zintegrowany system przepływu materiałów (surowców, półproduktów i wyrobów gotowych) oraz sprzężonych z nimi przepływów informacyjnych w celu optymalnego tworzenia i transformacji dóbr fizycznych.

- Logistyka to pewna koncepcja, filozofia zarządzania realnymi procesami przepływu dóbr fizycznych i informacji, oparta na zintegrowanym, systemowym ujmowaniu tych procesów.

- Logistyka to interdyscyplinarna dziedzina wiedzy technicznej, ekonomicznej i informatycznej badająca uwarunkowania, prawidłowości i zjawiska związane z przepływem dóbr fizycznych i informacji w gospodarce, a także w poszczególnych jej ogniwach.

W USA rozpowszechniona jest definicja sformułowana przez *Council of Logistics Management* [8]: Logistyka jest terminem opisującym proces planowania, realizacji i kontroli sprawnego i efektywnego ekonomicznie przepływu surowców, materiałów do produkcji, wyrobów gotowych oraz odpowiedniej informacji, z punktu pochodzenia do punktu konsumpcji w celu zaspokojenia wymagań klienta.

W Europie swoją definicję podało *European Logistics Association* [46]: Logistyka jest pojęciem obejmującym organizację, planowanie, kontrolę i realizację przepływów towarowych od ich wytworzenia i nabycia, przez produkcję i dystrybucję, aż do finalnego odbiorcy, której celem jest zaspokojenie wymagań rynku co do minimalnych kosztów i minimalnego zaangażowania kapitału.

Najnowsze podsumowanie dyskusji dotyczącej sposobów definiowania logistyki można znaleźć w pracy [92]. Biorąc pod uwagę takie cechy, jak przedmiot, metoda i cele logistyki przedstawiono następującą definicję: Logistyka jako dziedzina wiedzy naukowej bada zjawiska i procesy determinujące przepływ dóbr i związanych z nimi informacji oraz dostarcza odpowiednich metod i instrumentów kształtowania tego przepływu w systemach logistycznych zgodnie z ustalonymi celami.

Niezależnie od różnych analizowanych definicji, w pojęciu logistyka pojawiają się następujące wspólne elementy:

- zagadnienie zarządzania (planowania, organizowania, realizacji, kontroli) przepływem surowców, materiałów, półproduktów od miejsca zaopatrzenia, przez produkcję, po dostawę do konsumenta,

- problem zwrotnego przepływu odpadów, zużytych lub uszkodzonych elementów, opakowań do miejsca ich ponownego użycia lub utylizacji (kasacji),

- integracja przepływów materiałowych z przepływem informacji,

- minimalizowanie kosztów działalności logistycznej,

- zapewnienie wystarczającego poziomu obsługi klienta.

Trzeba pamiętać, że logistyka funkcjonuje na styku:

- techniki – infrastruktura techniczna procesów:

- transportowych,

- magazynowych,
- manipulacyjnych,
- opakowaniowych;
- informatyki – infrastruktura informatyczna procesów:
 - sprzętowych,
 - oprogramowania,
 - środków komunikacji;
- zarządzania – infrastruktura biznesowa procesów:
 - strategii i metod skutecznego i efektywnego zarządzania przepływem materiałowym; integrując przepływ materiałów i informacji w celu wzrostu produktywności przedsiębiorstw oraz ich konkurencyjności na rynku [100].

3.2.2. DEFINICJA SYSTEMU LOGISTYCZNEGO

Nawiązując do pojęcia systemu, system logistyczny można opisać przez zbiór elementów (podsystemów, zespołów) logistycznych mających odpowiednie właściwości, między którymi istnieją określone zależności. Scharakteryzowanie systemu logistycznego wymaga więc zdefiniowania i zgromadzenia następujących danych [149]:

- cel: ukierunkowany na działalność wszystkich podsystemów,
- wyjście: wynikające z przyjętego celu; postać rezultatów działania systemu (produkty lub usługi),
 - wejścia: decydujące o zasilaniu systemu (materiały, energia, informacje, ludzie),
 - proces transformacji (przetworzenia wejścia na wyjście): określany sekwencją podstawowych czynności przetwarzania,
 - otoczenie bliskie i dalekie: tworzone przez odbiorców, dostawców, przepisy formalno-prawne, itp.,
 - obiekty i infrastruktura: na które składają się, m.in.: maszyny, budynki, środki i infrastruktura transportowa, infrastruktura informatyczna,
 - zasoby ludzkie: liczba i struktura zatrudnionych, ich kwalifikacje, status materialny.

System logistyczny można zdefiniować jako celowo zorganizowany i połączony zbiór elementów (podsystemów), takich jak m.in.: produkcja, transport, magazynowanie – wraz z relacjami między nimi oraz ich właściwościami, warunkującymi przepływ strumieni towarów, środków finansowych i informacji.

W ramach systemu logistycznego rozpatruje się trzy przekroje (struktury) [62]:

- przestrzenny: akcentowany w definicji poprzez połączenie elementów systemu i przepływ strumieni towarów,
- organizacyjny: definicja mówi o zorganizowaniu elementów systemu,
- informacyjny: w definicji przejawia się w postaci przepływu strumieni finansowych i informacji.

Przekroje są silnie ze sobą powiązane i razem tworzą spójną całość. Wysoki stopień spójności systemu logistycznego oznacza, że zmiana w jednym podsystemie pociąga za sobą zmiany w pozostałych podsystemach; poszczególne podsystemy są ze sobą silnie powiązane i od siebie zależne. Jednocześnie system logistyczny powinien być maksymalnie elastyczny. Elastyczność wyraża się reagowaniem na wpływ otoczenia ekonomicznego, otoczenia konkurencji, a w związku z tym z podatnością na zmiany cen, podatków, a także poziomu inflacji.

Analizując miejsce systemów logistycznych w naukach systemowych [23], ulokowano teorie systemów logistycznych w klasie uogólnionych teorii systemów. Charakteryzując systemy logistyczne, wskazano na takie ich właściwości, jak: realność, otwartość, interdyscyplinarność, dynamiczność i działaniowość. Podkreślono złożoność systemów logistycznych, których właściwości wynikają z ich struktury (złożoność, spójność (koherencja a addytywność), równorzędność (hierarchiczność i centralizacja)) oraz zachowania (zmiennność w czasie, określoność (przyczynowość a losowość), celowość, adaptacyjność). Specyfika systemów logistycznych wynika [23] z funkcji jakie spełniają – planowania, realizacji, kontroli i sterowania przepływem wielkości materialnych (towarów) i niematerialnych (informacji). Wówczas odpowiednikiem teorii systemów logistycznych w obszarze aplikacji jest inżynieria systemów logistycznych nazywana również logistyką stosowaną.

3.2.3. KLASYFIKACJA SYSTEMÓW LOGISTYCZNYCH

Istotą funkcjonowania systemów logistycznych jest zgodność osiąganych celów z zadaniami, które przyporządkowane są całemu przedsiębiorstwu. Aby możliwe było osiągnięcie tej zgodności, konieczne jest wyodrębnienie poszczególnych elementów, ich zbiorów oraz podsystemów, których zadaniem jest realizacja sformułowanego celu.

Podstawowym problemem w procesie analizy i oceny systemu logistycznego jest charakterystyka i klasyfikacja systemu pod kątem określonych właściwości. W literaturze zagadnienia spotyka się wiele prób klasyfikacji i podziału systemu logistycznego na odpowiednie podsystemy i komponenty.

Na przykład w pracy [1], wśród elementów systemu logistycznego, wyróżnia się węzły i ścieżki sieci zaopatrzeniowej rozpatrywanej w dwóch warstwach – fizycznej (ludzie i zasoby materialne) oraz informacyjnej (ujęcie ilościowe i wartościowe). Wobec tego do najważniejszych elementów systemu logistycznego należą:

- środki techniczne umożliwiające przemieszczenie, przeładunek i magazynowanie towarów w cyklach zaopatrzeniowych (od powstania produktu do konsumenta),
- zintegrowane sieci komputerowe umożliwiające automatyzację oraz wspomaganie zarządzania i sterowania procesami logistycznymi,
- służby decyzyjne zarządzające fizycznym przemieszczaniem towarów.

Inna próba klasyfikacji systemów logistycznych [13] dzieli systemy według płaszczyzny agregacji i zakresu funkcjonowania systemu.

Wyróżniono sześć kryteriów klasyfikacyjnych:

- instytucjonalne – liczba i rodzaj instytucji składających się na strukturę systemu,
- funkcjonalne 1 – sfera działania w przedsiębiorstwie i w skali łańcucha logistycznego (fazy przepływów),
 - funkcjonalne 2 – treść zadań logistycznych,
 - strukturalno-decyzyjno-funkcjonalne – struktura funkcji zarządzania oraz szczebel podejmowania decyzji,
 - przedmiotowo-strukturalne – rodzaj procesów/przepływów i struktur,
 - efektywnościowe.

Kryterium funkcjonalne bierze pod uwagę liczbę i rodzaj rozpatrywanych funkcji logistycznych i wyróżnia:

- podsystem transportu,
- podsystem magazynowania,
- podsystem opakowań,
- podsystem realizacji zamówień,
- podsystem obsługi nabywców.

Kryterium przedmiotowe dzieli podsystemy logistyczne ze względu na rodzaj przepływów:

- podsystem przepływów materiałów, surowców i urządzeń,
- podsystem przepływów towarów (dóbr finalnych),
- podsystem przepływów opakowań, odpadów,
- podsystem przepływów informacyjnych.

Ze względu na sfery działania w przedsiębiorstwie i w skali łańcucha logistycznego wyróżnia się kilka faz przepływów:

- podsystem logistyczny dostawców,
- podsystem logistyczny w sferze zaopatrzenia,
- podsystem logistyczny w sferze produkcji,
- podsystem logistyczny w sferze zbytu,
- podsystem logistyczny nabywców,
- podsystem logistyczny w sferze zwrotu towarów,
- podsystem logistyczny w sferze zwrotu opakowań,
- podsystem logistyczny w sferze handlu,
- podsystem logistyczny w sferze zaopatrzenia materiałów, surowców i ich transformacji.

Kryterium zarządzania i regulacji umożliwia wydzielenie następujących faz i procesów w systemie zarządzania:

- podsystem planowania logistycznego,
- podsystem sterowania logistycznego,
- podsystem organizacji i realizacji logistyki,
- podsystem kontroli logistycznej,
- podsystem zarządzania operacyjnego,

- podsystem zarządzania strategicznego,
- podsystem zarządzania normatywnego,
- podsystem zintegrowanego zarządzania logistycznego.

Oceny niezawodności funkcjonowania systemu logistycznego wymaga skorzystania z kryterium efektywnościowego. Kryterium to oznacza, że system logistyczny powinien gwarantować z jednej strony uzyskanie pożądanego efektu – poziomu i jakości obsługi logistycznej, z drugiej natomiast – jego realizacja powinna mieć odpowiednią sprawność (musi istnieć racjonalna relacja między nakładami a efektami systemu i poszczególnych podsystemów). Jako efekty eksploatacji systemu logistycznego należy traktować przejawy realizacji jego celów i zadań, a jako nakłady – określone czynności i przedsięwzięcia podejmowane na rzecz realizacji tych zadań. Biorąc pod uwagę wymienione czynniki decydujące o efektywności systemu logistycznego, wyodrębniono [13] dwa podsystemy:

- kosztów logistycznych (nakładów),
- usług i obsługi logistycznej (efektów).

Podział systemów logistycznych według kryteriów [188]:

- instytucjonalnych,
- fazy przepływów,
- funkcjonalnych.

Kryterium instytucjonalne

Najistotniejsze ze względu na zarządzanie procesami logistycznymi jest kryterium instytucjonalne. Podział jest prowadzony według rodzaju i liczby instytucji realizujących zadania systemu logistycznego. Według tego kryterium wyróżnia się systemy (rys. 3.3):

- makrologistyczne,
- mikrologistyczne,
- metalogistyczne.

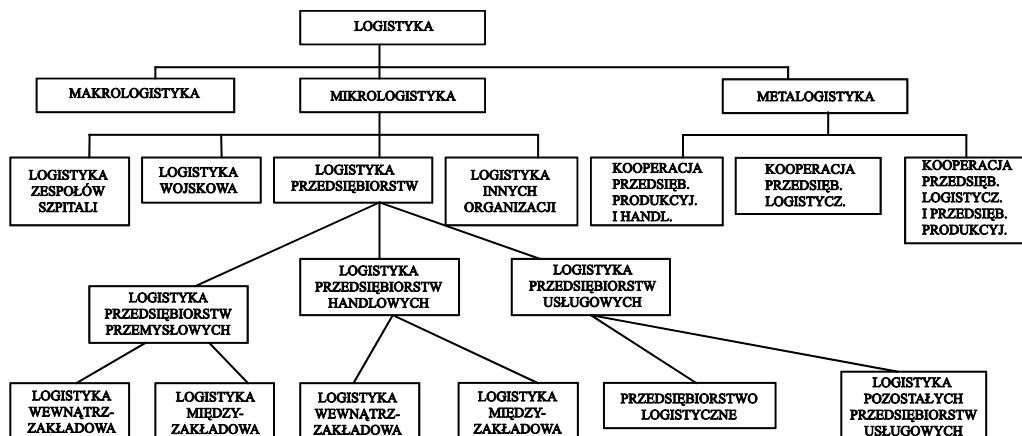
Najwyższy poziom złożoności wykazuje system makrologistyczny i obejmuje swoim zasięgiem całą gospodarkę narodową. Charakteryzuje go ogólnogospodarcze ujęcie przepływu dóbr rzeczowych i informacji. Za podstawowe elementy należące do systemu makrologistycznego przyjmuje się:

- krajowe sieci transportowe i spedycyjne,
- krajowe systemy dystrybucji produktów,
- krajowe systemy informatyczne dotyczące różnych zagadnień logistyki,
- krajowe systemy gospodarki opakowaniami i inne.

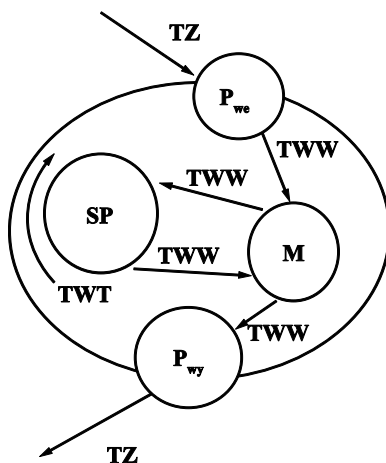
System makrologistyczny określa się także jako zbiór systemów mikrologistycznych wzajemnie między sobą powiązanych.

Najniższy poziom złożoności stanowi system mikrologistyczny. Systemy tego typu obejmują procesy logistyczne wewnątrz jednostkowych organizacji gospodarczych – są to systemy logistyczne przedsiębiorstwa. Z takim systemem spotyka się najczęściej pracownik działu logistyki w przedsiębiorstwie. Ze względu na zadania realizowane

przez różne organizacje gospodarcze, logistykę przedsiębiorstw można podzielić na logistykę przedsiębiorstw produkcyjnych, handlowych oraz usługowych.



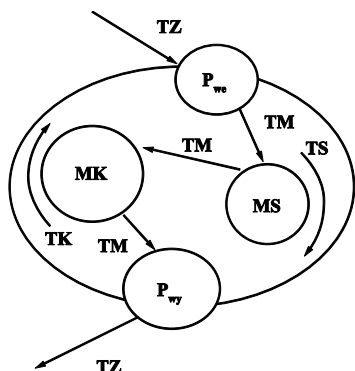
Rys. 3.3. Instytucjonalny podział systemów logistycznych [13]



Rys. 3.4. Struktura systemu mikrologistycznego typu produkcyjnego [99]

Systemy metalogistyczne charakteryzują się średnim poziomem złożoności. Taki system tworzy pewna liczba powiązanych ze sobą podsystemów logistycznego łańcucha zaopatrzenia i dystrybucji. Systemy metalogistyczne są systemami, które wykraczają poza prawne granice jednej organizacji. Ich zadaniem jest tworzenie kooperacji wielu organizacji gospodarczych w przepływie towarów. Możliwe jest wykorzystanie przedsiębiorstwa z takiej samej lub różnych branż gospodarczych w celu stworzenia wspólnego systemu dystrybucji fizycznej towarów. Dlatego też systemy metalogistyczne określane są często mianem kanałów logistycznych.

Schematy systemów mikrologistycznych pokazano na rysunku 3.4 – w przedsiębiorstwie produkcyjnym SLP i na rysunku 3.5 – w przedsiębiorstwie dystrybucyjnym SLD (pokazano tylko przepływ materiałów).



Rys. 3.5. Struktura systemu mikrologistycznego typu dystrybucyjnego [99]

Struktura tych systemów jest opisana przez następujące wzory [99]:

$$SLP = \{P, TW_P, M, SP, TZ\} \quad (3.7)$$

$$SLD = \{P, TW_D, MS, MK, TZ\} \quad (3.8)$$

gdzie: P – układy przeładunkowe, łączące rozpatrywany system logistyczny z otoczeniem:

$$P = \{P_{WE}, P_{WY}\} \quad (3.9)$$

P_{WE} – przepływ strumienia materiałów na wejściu do systemu SL,

P_{WY} – przepływ strumienia materiałów na wyjściu z systemu SL,

TW_P – podsystem transportu wewnętrznego w przedsiębiorstwie produkcyjnym:

$$TW_P = \{TWW, TWT\} \quad (3.10)$$

TWW – transport międzywydziałowy,

TWT – transport technologiczny,

TW_D – podsystem transportu wewnętrznego w przedsiębiorstwie dystrybucyjnym,

$$TW_D = \{TM, TS, TK\} \quad (3.11)$$

TM – transport magazynowy,

TS – transport w strefie składowania,

TK – transport w strefie kompletacji,

M – podsystem magazynowy,

$$M = \{MS, MK\} \quad (3.12)$$

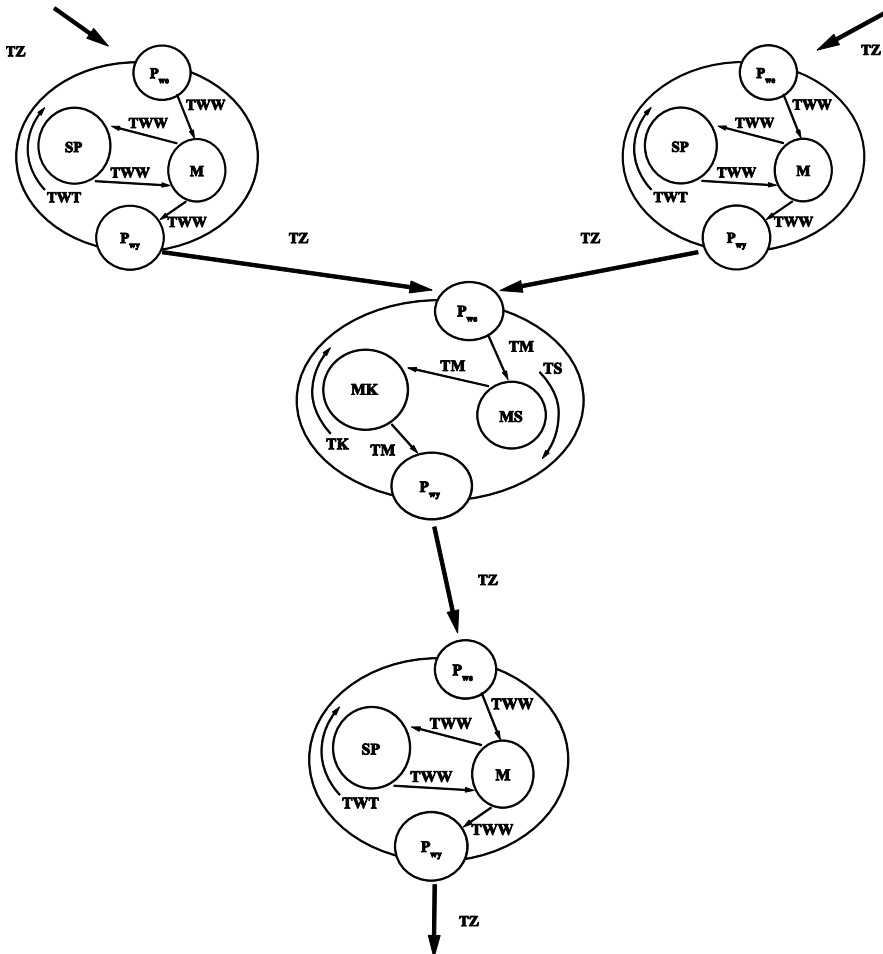
MS – podsystem składowania,

MK – podsystem kompletacji,

SP – system produkcyjny (system operacyjny),

TZ – system transportu zewnętrznego.

System mikrologistyczny w przedsiębiorstwie produkcyjnym SLP realizuje zadania logistyczne polegające na przekształceniu strumieni materiałów wchodzących do przedsiębiorstwa od dostawców na strumienie materiałów wchodzące do produkcji i przepływające w tym procesie. System SLP ma umożliwić ciągłość i rytmiczność procesu produkcyjnego oraz zrównoważenie wydajności poszczególnych stanowisk pracy. System SLP ma także umożliwić przekształcenie strumieni materiałów wychodzących z produkcji (wyrobów finalnych) na strumienie materiałów (jednostek ładunkowych) wychodzących z przedsiębiorstwa w taki sposób, aby zachowując warunki produkcji, spełnić wymagania odbiorców. Charakterystyczna dla tego zadania logistycznego jest zmiana cech materiałów w obszarze funkcjonowania systemu SLP.



Rys. 3.6. Schemat systemu metalogistycznego
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [99]

System mikrologistyczny w przedsiębiorstwie dystrybucyjnym SLD realizuje zadanie logistyczne, które polega na przekształceniu strumieni materiałów wchodzących do przedsiębiorstwa od dostawców na strumienie materiałów wychodzących z przedsiębiorstwa zgodnie z zamówieniami odbiorców (klientów). W obszarze działania systemu SLD nie następuje zmiana cech materiałów.

System metalogistyczny składa się z pewnej konfiguracji elementów wybranych z co najmniej dwóch autonomicznych systemów mikrologistycznych oraz systemu transportu zewnętrznego zapewniającego przepływ pomiędzy rozpatrywanymi systemami mikrologistycznymi. Przykład struktury takiego systemu pokazano na rysunku 3.6.

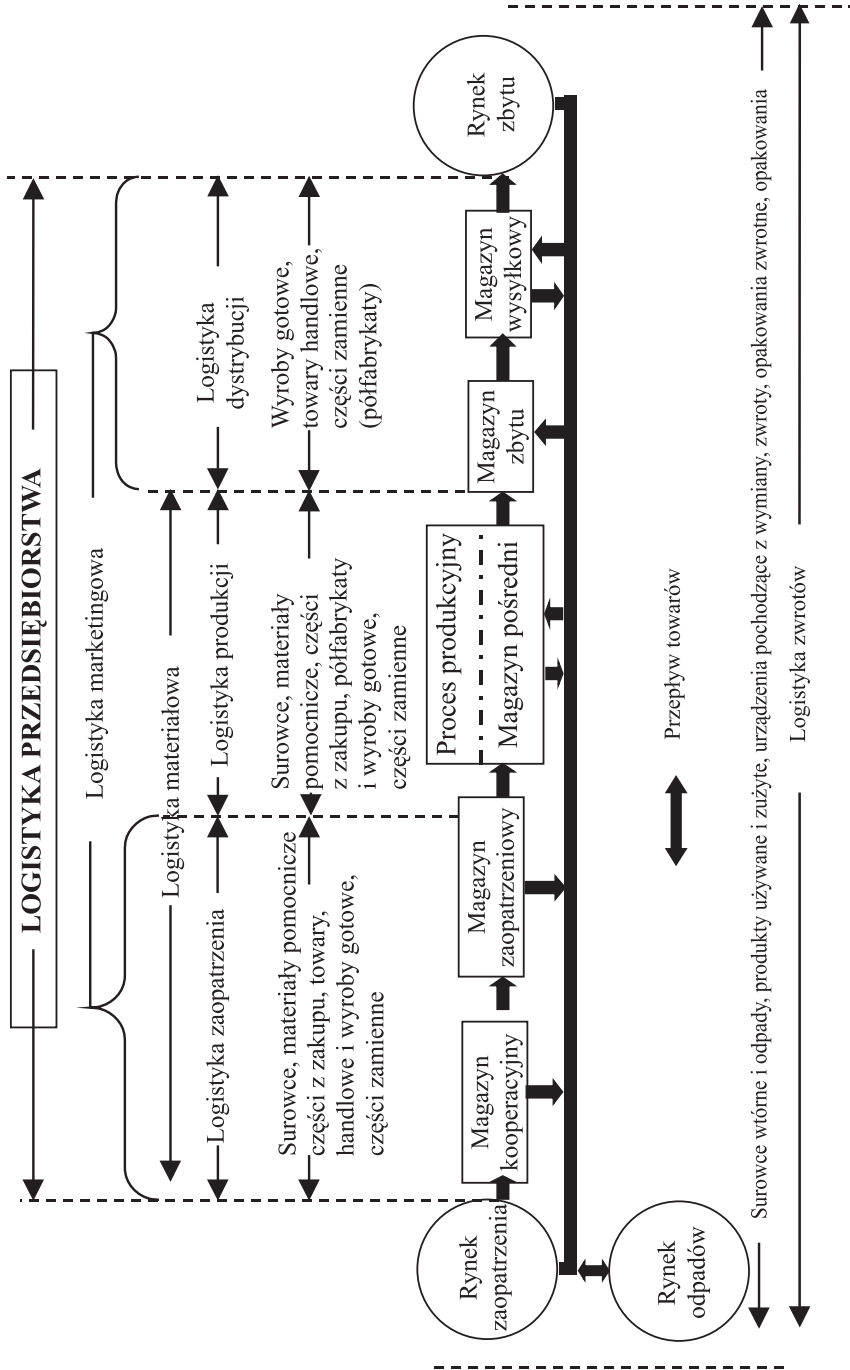
Przykłady różnych systemów metalogistycznych można zaobserwować w wielu działach gospodarki, także poza przemysłem. Stąd wywodzi się pojęcie logistyki fakultatywnej [175] czyli rozwiniętych teorii oraz technologii w takich działach, jak wojsko, szpitale, zarządzanie miastem, zarządzanie dużymi imprezami sportowymi lub kulturalnymi, hotelarstwo, turystyka, spedycja i inne. Wspomniane działy gospodarki wykorzystują pod kątem swoich potrzeb najnowsze technologie logistyczne, które przyczyniają się do ich nowoczesności i atrakcyjności rynkowej. Rozwiązania logistyczne obejmują coraz to szersze dziedziny gospodarki, które z biegiem czasu stanowią wyspecjalizowaną gałąź, a stosowane w niej rozwiązania teoretyczne, technologiczne i organizacyjne stanowią specyficzny standard. Określamy je krótko jako logistykę danej branży lub dziedziny. W podobny sposób można by już dzisiaj mówić o logistyce spedycyjnej, logistyce firm kurierskich, logistyce transportu kontenerowego, logistyce lotniczej, logistyce bankowej, logistyce przemysłu motoryzacyjnego, itp. Rozwiązania raz wdrożone i sprawdzone są stosowane w innych branżach i z czasem stają się uniwersalnymi standardami logistyki.

Kryterium fazowe

Obserwując różne fazy przepływu dóbr fizycznych od rynku zaopatrzenia, poprzez różne przedsiębiorstwa produkcyjne, aż do rynku zbytu wyrobów gotowych można wyodrębnić podsystemy logistyczne charakterystyczne dla tych faz. Jeżeli uwzględnimy jeszcze konieczność przepływu zwrotnego, to cały system logistyczny można schematycznie pokazać tak jak na rysunku 3.7.

Pierwsza faza przepływu dóbr fizycznych, na którą składają się surowce, półfabrykaty, materiały pomocnicze polega na dostarczaniu wymienionych dóbr od dostawców na rynku zaopatrzeniowym do magazynu zaopatrzenia w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Między rynkiem zaopatrzeniowym a magazynem, którym dysponuje przedsiębiorstwo, może być również wykorzystany magazyn pośredni, mający charakter zbiorczy na potrzeby sortowania i kompletowania. System logistyczny zajmujący się pierwszą fazą przepływu dóbr nazywa się logistyką zaopatrzenia lub fizycznym systemem zaopatrzenia.

W drugiej fazie surowce materiały pomocnicze oraz zakupione części przepływają z magazynu zaopatrzenia do procesu produkcji, w którym są przejściowo magazynowane w formie przetworzonej jako półfabrykaty. Gotowe wyroby, półfabrykaty, a także przeznaczone dla klientów części zamienne przepływają ze sfery produkcji do magazynu

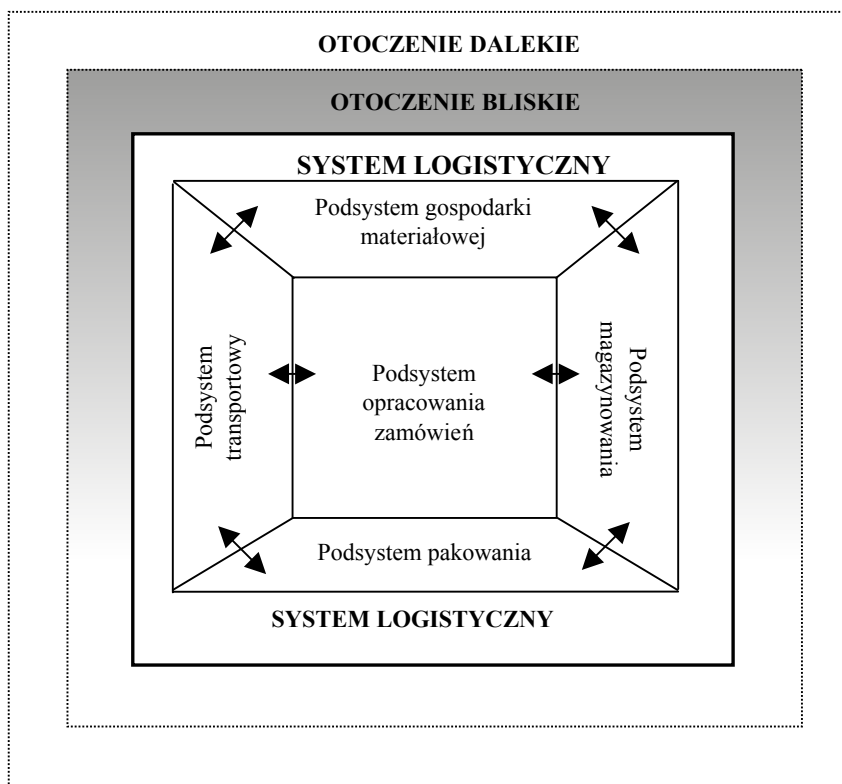


Rys. 3.7. Fazowy podział systemów logistycznych [98]

zbytu. System logistyczny, z którym w tym przypadku mamy do czynienia nazywamy logistyką produkcji. Logistyka zaopatrzenia i produkcji określane są niekiedy łącznie mianem logistyki materiałowej.

Trzecią fazę przepływu towarów nazywa się logistyką dystrybucji. Przepływ dóbr rozpoczyna się w magazynie wyrobów gotowych (magazynie zbytu). Bezpośrednio lub przez magazyny dystrybucyjne (wysyłkowe) towary są dostarczane do klientów. Przez pojęcie logistyki dystrybucji rozumie się zagadnienia związane z dystrybucją fizyczną towarów, na którą składają się: transport, składowanie, zarządzanie zapasami oraz zadania dostawcze. Logistyka dystrybucji może także dostarczać informacji na temat wielkości podaży i popytu na rynku, a także stanowić mechanizm służący kontroli kształtowania się kosztów, ułatwiający osiągnięcie przewagi strategicznej na rynku.

W czwartej fazie strumień dóbr fizycznych przepływa w kierunku przeciwnym. Składa się on z: surowców wtórnych i odpadów przeznaczonych do ponownego wykorzystania, towarów uszkodzonych lub nieprawidłowo wysłanych, opakowań zwrotnych, urządzeń pochodzących z wymiany w dobrach inwestycyjnych i konsumpcyjnych oraz używanych pojemników i opakowań. Tę fazę określa się mianem logistyki zwrotów (powtórne zagospodarowanie).



Rys. 3.8. Funkcjonalny podział podsystemów logistycznych [188]

Kryterium funkcjonalne

Przyjęcie funkcjonalnego kryterium podziału umożliwia wyróżnienie pięciu podsystemów logistycznych, do których należą (rys. 3.8):

- podsystem opracowywania zamówień,
- podsystem gospodarki materiałowej,
- podsystem magazynowania,
- podsystem pakowania,
- podsystem transportu.

W podziale funkcjonalnym pierwszy wyodrębniono podsystem opracowywania zamówień. Czynności związane z realizacją zamówień są podstawą obsługi klienta. Oferowanie klientowi wysokiego poziomu obsługi wymaga właściwej realizacji zamówienia, co wiąże się z kolejno po sobie następującymi czynnościami, na które składają się:

- przygotowanie zamówienia – odnosi się do czynności związanych z przepływem informacji między klientem a sprzedawcą,
- transmisja zamówienia – zawiera transferowanie informacji zawartych w zamówieniu od miejsca, w którym zamówienie zostało złożone, do miejsca, gdzie odbędzie się jego dalsza realizacja,
- wprowadzenie zamówienia – odnosi się do zadań, które są wykonywane przed właściwą realizacją zamówienia,
- realizacja zamówienia – obejmująca fizyczne czynności wymagane do nabycia produktu, jak np. pozyskanie towarów składowych, produkcja, zakup, pakowanie towaru do wysyłki, planowanie wysyłki, przygotowanie dokumentów do wysyłki,
- raportowanie o stanie zamówienia – obejmuje czynności monitorujące w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu obsługi klienta.

Drugim podsystemem wyodrębnionym z kryterium funkcjonalnego jest gospodarka magazynowa. Zajmuje się ona wszystkimi procesami decyzyjnymi, mającymi wpływ na zapasy magazynowe. W związku z tym mówi się również o zarządzaniu zapasami. Zapasy magazynowe w przedsiębiorstwie stają się swoistym buforem między przepływem towarów na wejściu i na wyjściu. Zapasy magazynowe mogłyby stać się zbędne, w przypadku gdyby przepływ towarów na wejściu i wyjściu był całkowicie zsynchronizowany.

System magazynowania stanowi kolejny podsystem funkcjonalny przedsiębiorstwa. Magazyn spełnia rolę węzła w logistycznej sieci zależności, w którym jest tymczasowe przechowywanie towaru lub przekazanie go w innym kierunku. Budynki magazynowe mogą pełnić funkcję jako punkty dostawy, odbioru oraz mogą być punktami rozdziału lub koncentracji w systemie logistycznym. W magazynie zachodzą zarówno procesy magazynowania, jak i przemieszczania (transportu wewnętrznego).

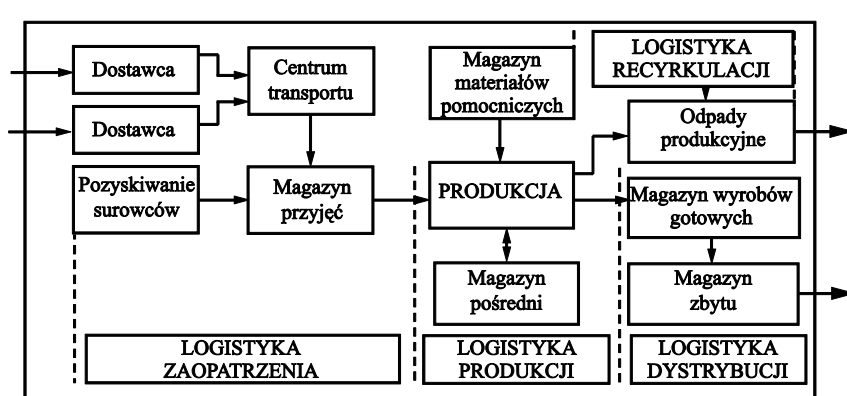
System logistyki opakowań zapewnia przede wszystkim ochronę towaru. Do innych funkcji spełnianych przez opakowania należą m.in.: funkcje marketingowe – opakowania stanowią element wyróżniający wyrób danego przedsiębiorstwa, duża rola opakowań w promocji i reklamie oraz funkcje transportowe – odpowiednie

ukształtowanie opakowania umożliwia prawidłowe przemieszczanie i składowanie towaru.

System transportu stanowi jeden z najważniejszych elementów systemu logistycznego. Do podstawowych zadań transportu należy zapewnienie przemieszczenia określonej ilości ładunku po możliwie najkrótszych trasach, z równoczesnym największym wykorzystaniem bazy majątkowej. Transport w systemie logistycznym dzieli się na transport wewnętrzny (przemysłowy) i transport zewnętrzny (daleki). Transport wewnętrzny realizuje przemieszczanie materiałów w obrębie zakładu, z jednego miejsca produkcji do innego, transport w obrębie magazynu, załadunek i wyładunek na środki transportu zewnętrznego. Przez transport zewnętrzny natomiast rozumie się transport od dostawców do nabywców, transport między różnymi zakładami lub centrami logistycznymi (centrami dystrybucyjnymi).

3.2.3. STRUKTURA SYSTEMÓW LOGISTYCZNYCH

Strukturą systemu nazywa się zbiór relacji występujących pomiędzy elementami, niezbędnych do realizacji przez system określonych celów. System logistyczny przedsiębiorstwa ma uporządkowaną strukturę organizacyjną, utworzoną przez infrastrukturę techniczną oraz osoby biorące udział (zarządzające daną częścią procesu). Strukturę systemu logistycznego tworzą przepływy dóbr materialnych i usług (dóbr niematerialnych) oraz towarzyszących tym przepływowi informacji [188]. Przykład typowej struktury systemu logistycznego w przedsiębiorstwie pokazano na rysunku 3.9.



Rys. 3.9. Struktura systemu logistycznego w przedsiębiorstwie, wg [141]

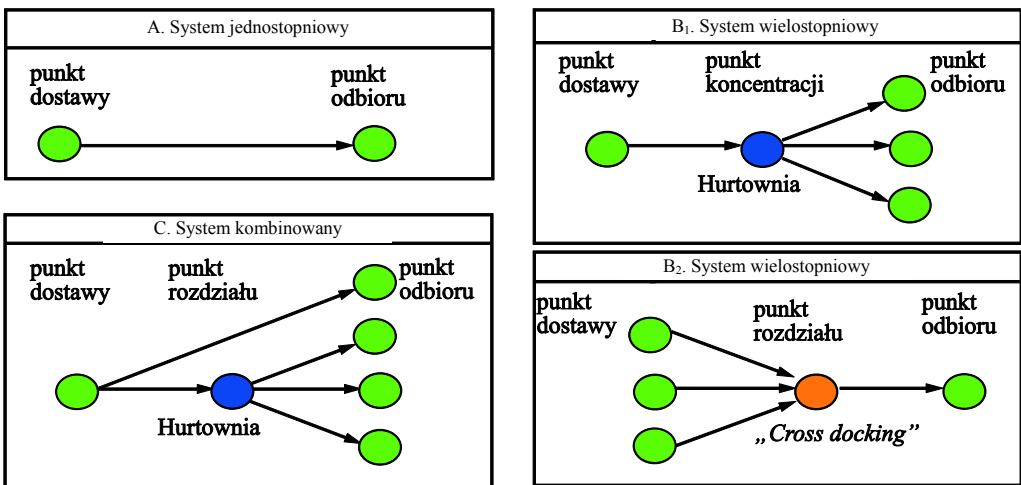
W systemach logistycznych wyróżnia się struktury [2]:

- przestrzenną,
- organizacyjną,
- informacyjną.

Struktura przestrzenna łańcucha logistycznego jest związana z instytucjonalnym kryterium klasyfikacji (liczbą i rodzajem instytucji węzłów łańcucha) podstawowych struktur systemów logistycznych. W zakresie systemów metalogistycznych (w przedsiębiorstwie), wyróżnia się struktury [188]:

- jednostopniowe (bezpośredni przepływ wyrobów),
- wielostopniowe (pośredni przepływ wyrobów),
- kombinowane (możliwe są przepływy bezpośrednie i pośrednie).

Jeżeli przyjmiemy za punkt wyjścia myślenie kategoriami sieci (węzły i ścieżki), można dokonać podziału systemów pod względem przestrzennym – rys. 3.10. Węzły – to punkty, w których następuje przetwarzanie lub składowanie materiałów, ścieżki – obrazują drogi (powiązania transportowe) pomiędzy węzłami. Jeżeli rozpatrujemy ścieżki w ramach jednego podmiotu gospodarczego, to używa się określenia „wewnętrzny łańcuch dostaw”. Jeżeli mówi się o bezpośrednich dostawcach i odbiorcach, używa się określenia „rozszerzony łańcuch dostaw”. Jeżeli będzie się rozpatrywać wszystkich dostawców i odbiorców, to mamy do czynienia z „pełnym łańcuchem dostaw” [205].



Rys. 3.10. System logistyczny jako układ węzłów i ścieżek, wg [188]

Zaletą systemów jednostopniowych jest to, że unika się dodatkowych procesów logistycznych w punkcie przerwania przepływu (w hurtowni lub punkcie *crossdockingu*). Zaletą systemów wielostopniowych jest natomiast zbliżenie punktu koncentracji produktów do rynku regionalnego, co pozwala szybciej zaspokajać potrzeby klientów na tym rynku. Wadą tego rodzaju systemów są dodatkowe procesy logistyczne w punkcie koncentracji lub rozdziału.

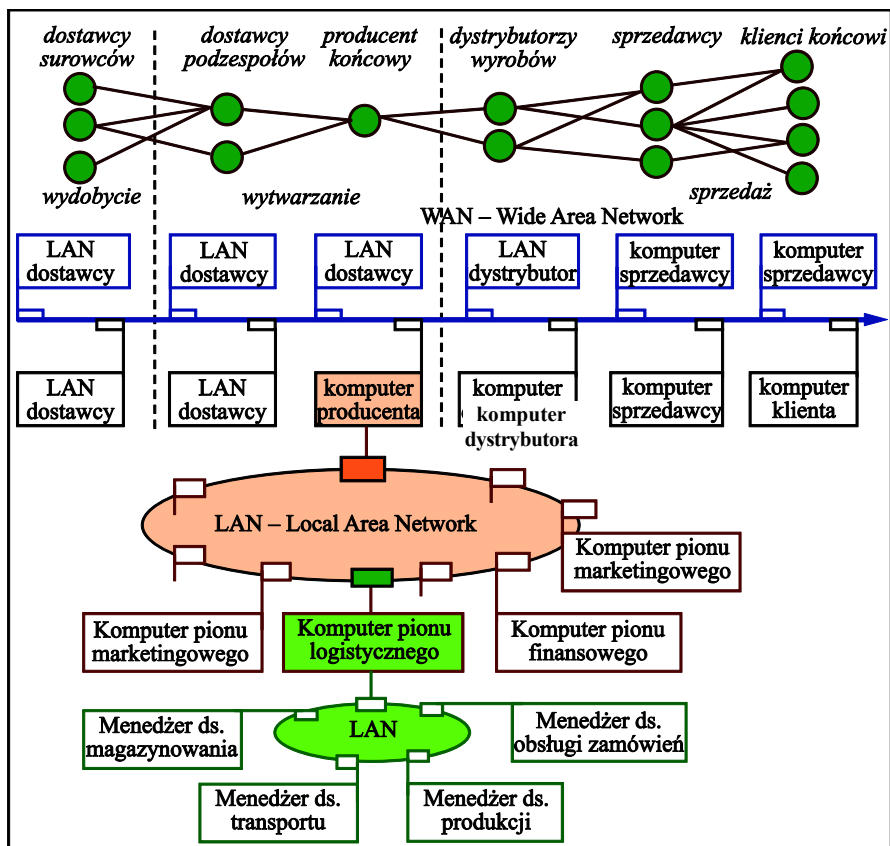
System logistyczny przedsiębiorstwa ma bardzo złożoną strukturę i jego analiza wymaga wyodrębnienia także struktury organizacyjnej. Obejmuje ona metody organizacji i zarządzania łańcuchem dostaw. Struktura organizacyjna najczęściej jest wyra-

zana przez wyróżnienie sfer działania, treści zadań logistycznych i treści funkcji zarządzania i szczebla decyzyjnego [136].

Struktura informacyjna systemu uzupełnia strukturę organizacyjną przez realizację funkcji informacyjnych, wiążących się z przepływem fizycznym zasobów i wyrobów [205]. Jako element łączący strukturę organizacyjną i przestrzenną systemu logistycznego, umożliwia zarządzanie całym systemem, niezależnie od przepływów fizycznych, ponieważ odwzorowuje te struktury w postaci odpowiednich systemów informacyjnych lub informatycznych. Wymogi integracji strumieni informacyjnych w systemie logistycznym wiążą się z [61]:

- ujednoczeniem dostępu do różnych źródeł informacji,
- możliwościami badania całego systemu logistycznego (a nie tylko podsystemu),
- łączeniem operacji przetwarzania danych,
- łączeniem komórek przetwarzania danych.

Przykład struktury informacyjnej systemu logistycznego pokazano na rysunku 3.11.



Rys. 3.11. Struktura informacyjna w systemach logistycznych [141]

3.2.4. PROCESY LOGISTYCZNE

System logistyczny realizuje swoje cele przez realizację odpowiednich procesów logistycznych.

W przedsiębiorstwie wyróżnia się 3 podstawowe procesy:

- kierowanie biznesem,
- podstawowe,
- wspomagające.

W opracowaniu [106] taki podział procesów został zmodyfikowany. Wyróżniono następujące kategorie procesów:

Procesy podstawowe obejmujące działania powiązane technologicznie w procesy wytwarzania wyników (produktów) będących ofertą rynkową.

• Procesy wspomagające grupujące działania zapewniające bezpośrednią obsługę działań wchodzących w skład procesów wytwarzania wyników rynkowych, realizowane przez personel i wykorzystujące zasoby rzeczowe firmy. Wyniki tych działań są przejmowane przez działania procesów podstawowych. Są to procesy bezpośrednio wspomagające wykonywanie działań podstawowych. Nazwano je procesami wspomagającymi pierwszego rzędu lub wspomagania wewnętrznego. Przykładami takich procesów są:

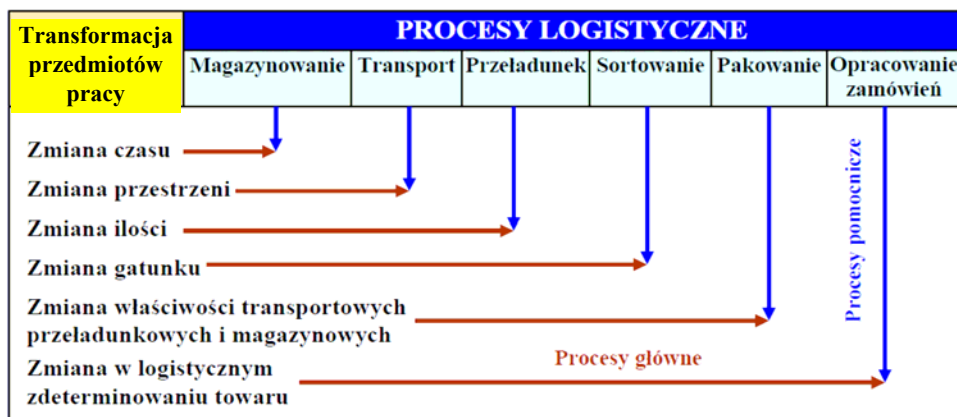
- transport wewnętrzny,
- składowanie półproduktów między stanowiskami,
- naprawa i obsługa urządzeń,
- usuwanie odpadów produkcyjnych.

• Procesy wspomagające wejście i wyjście procesów podstawowych lub procesów wspomagających pierwszego rzędu. Procesy tej grupy nazywa się procesami wspomagania drugiego rzędu lub wspomagania zewnętrznego. Do procesów o tym charakterze należą m.in.:

- wyszukiwanie, ocena potencjalnych dostawców,
 - planowanie, obsługa, konsolidacja dostaw materiałowych,
 - kontrola ilościowa i jakościowa przyjmowanych materiałów,
 - magazynowanie i składowanie,
 - planowanie zapasów dystrybucyjnych,
 - konfekcjonowanie, etykietowanie, pakowanie wysyłanych produktów,
 - monitoring dostaw i wysyłek,
 - obsługa opakowań i materiałów zwrotnych.
- Procesy scalające funkcjonowanie firmy. Przykładami procesów tej grupy są:
- prace administracyjne,
 - obsługa zatrudnienia,
 - komunikacja wewnętrzna i zewnętrzna,
 - księgowość i rachunkowość,

- archiwizacja danych,
- obsługa socjalna.
- Procesy pomocnicze, do których należą m.in.:
 - ochrona budynków,
 - obsługa żywienia,
 - utrzymanie czystości.

W analizie procesów logistycznych należy koncentrować się na procesach wspomagających pierwszego i drugiego rzędu. W trakcie realizacji tych procesów następuje nie tylko przemieszczanie materiałów (dóbr) oraz związanych z nimi informacji, ale także występują dalsze transformacje (dowartościowanie) produktu [105]. Przykład możliwych transformacji towarów w trakcie poszczególnych procesów logistycznych pokazano na rysunku 3.12.



Rys. 3.12. Procesy logistyczne i transformacja towarów w przedsiębiorstwie (wg [54])

Niezależnie od prezentowanego uszczegółowienia procesów logistycznych lub innych klasyfikacji [205] (np. na główne procesy logistyczne, takie jak: operacje transportowe, operacje magazynowe, operacje przeładunkowe, gospodarka materiałowa oraz na procesy pomocnicze: pakowanie, znakowanie, metkowanie, opracowanie zamówień, przygotowywanie dokumentacji przewozowej itp.) ważne jest wyróżnienie procesów przepływu materiałów i procesów przesyłu informacji. W pracy [106] podkreśla się, że proces jest wtedy procesem logistycznym, gdy pojawia się potrzeba skoordynowania go z innymi procesami. Zadania koordynacji procesów są przede wszystkim realizowane przez systemy informacyjne lub informatyczne. Przykłady zadań dotyczących przepływu materiałów i przepływu informacji pokazano w tabeli 3.1.

Proces logistyczny dotyczy działań związanych m.in.: z zaopatrzeniem systemu produkcyjnego w niezbędne materiały, półwyroby czy elementy, dystrybucją wyrobów gotowych do miejsc sprzedaży lub zwrotem produktów zużytych do utylizacji.

Realizacja tych zadań wymaga korzystania z wielu różnych środków technicznych, zaangażowania ludzi do wykonywania i zarządzania poszczególnymi czynnościami, dostarczenia i przesłania odpowiednich informacji. Takie procesy wspomagające wymagają zaprojektowania, zbudowania i utrzymania odpowiedniej infrastruktury – infrastruktury procesów logistycznych.

Tabela 3.1. Pierwotne procesy logistyczne (opracowano na podstawie [13])

Przepływ materiałów	Przepływ towarów
Magazynowanie	Planowanie dostaw, produkcji, zapasów
Transport	Wydawanie dyspozycji dotyczących dostaw, realizacja zleceń
Przyjmowanie towarów	Sterowanie przepływem produktów
Wysyłka towarów	Opracowanie zamówień klientów
Gospodarowanie odpadami	Opracowanie miejsc składowania odpadów
Obsługa logistyczna	Planowanie obsługi

Elementy systemu logistycznego, na które składają się środki techniczne wykorzystywane w procesach fizycznego przepływu materiałów oraz w procesach informacyjnych logistyki wraz ze sposobami ich eksploatacji, tworzą infrastrukturę procesów logistycznych.

Infrastrukturę procesów logistycznych można poklasyfikować ze względu na różne kryteria, takie jak np.: zakres odpowiedzialności za proces, strukturę obiektów technicznych lub zakres realizowanych działań.

Ze względu na zakres odpowiedzialności procesy logistyczne dzieli się na:

- infrastrukturę wewnętrzną, którą tworzą wszystkie obiekty wraz z relacjami między nimi, podlegające menedżerowi zarządzającemu procesem,
- infrastrukturę zewnętrzną, na którą składają się obiekty uczestniczące w wyróżnionym procesie ogólnym, lecz nie podlegające menedżerowi zarządzającemu procesem.

Ze względu na strukturę obiektów technicznych wyróżnia się:

- infrastrukturę liniową – sieć wydzielonych pasów terenu, przeznaczonych do ruchu lub postoju środków transportu wraz z leżącymi w ich ciągu obiektami inżynierskimi,
- infrastrukturę punktową – wyodrębnione przestrzennie obiekty służące stacjonarnej obsłudze ładunków oraz środków przewozowych transportu,
- infrastrukturę komunikacyjną (informacyjną) – linie telekomunikacyjne, środki przekazu, standardy wymiany danych, i środki zabezpieczające ich przepływ.

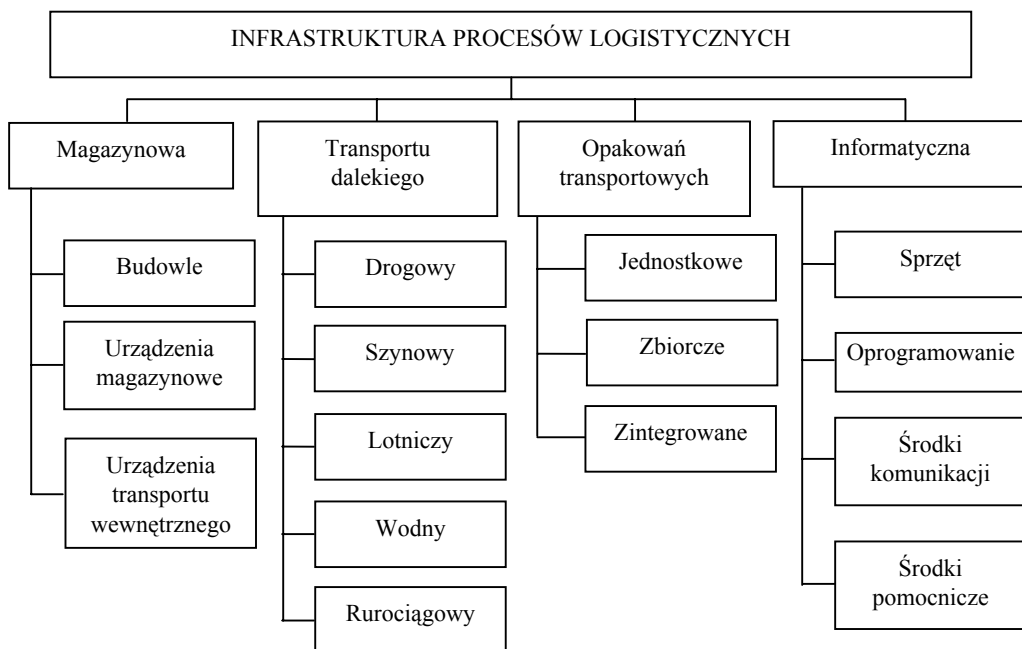
Podział infrastruktury logistycznej ze względu na zakres realizowanych działań pokazano na rysunku 3.13. Do najważniejszych elementów należy infrastruktura magazynowa, którą tworzą:

- budowle magazynowe,
- techniczne środki manipulacji i transportu wewnętrznego,
- urządzenia magazynowe, zwłaszcza urządzenia do składowania, pomiarowo-kontrolne, przeciwpożarowe i inne,

- inne środki techniczne, zwłaszcza środki techniki informatycznej, wykorzystywane do sterowania operacjami magazynowymi.

Podstawą infrastruktury procesów magazynowania są budowle magazynowe. Charakteryzuje je wiele parametrów technicznych i użytkowych, takich jak:

- rodzaj i wielkość,
- parametry konstrukcyjne — podstawowe wymiary (długość, szerokość, wysokość, rozstaw elementów nośnych, dopuszczalne obciążenie itp.),
- parametry użytkowe — powierzchnia całkowita, składowa, manipulacyjna, transportowa itp., pojemność, przepustowość (tj. intensywność przepływu strumieni materiałowych),
- inne szczególne elementy – wyposażenie, klimatyzacja, urządzenia przeciwpożarowe.



Rys. 3.13. Klasyfikacja elementów infrastruktury logistycznej

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [206]

Wyróżniamy budowle magazynowe:

- otwarte, przystosowane do składowania produktów odpornych na działanie czynników atmosferycznych (są to zwłaszcza place składowe),
- półotwarte, częściowo zasłonięte, przeznaczone do magazynowania produktów o ograniczonej odporności na warunki atmosferyczne (wiaty, zbiorniki otwarte itp.),

- zamknięte, służące do magazynowania produktów, które muszą być chronione przed wpływem warunków atmosferycznych i wymagają odpowiedniej temperatury, wilgotności (budynki, zbiorniki zamknięte, silosy).

Techniczne środki manipulacji i transportu wewnętrznego obejmują kilka maszyn i urządzeń:

- dźwignice – urządzenia techniczne służące do przemieszczania ładunków w pionie i poziomie (np. suwnice, wciągarki, dźwigienki),

- przenośniki – środki transportu i manipulacji o ograniczonym zasięgu służące do przemieszczania produktów w pionie i poziomie, a także pod odpowiednim kątem (taśmowe, linowe, łańcuchowe, zgarniakowe, kbelkowe itp.),

- wózki i inne pojazdy kołowe – środki transportu wewnętrznego bez napędu lub z napędem (silnikiem spalinowym, elektrycznym) służące do przemieszczania ładunków na bliskie odległości.

Do urządzeń magazynowych ponadto należą:

- urządzenia do składowania – regały, stojaki, wieszaki, zasieki, szafki magazynowe, podkłady oraz urządzenia specjalne, indywidualnie dostosowane do warunków składowania specyficznych zapasów,

- urządzenia kontrolne i pomiarowe – przyrządy do kontroli warunków przechowywania (np. termometry) oraz ilości i jakości składowanych zapasów (wagi, przepływomierze, wskaźniki poziomu cieczy itp.),

- urządzenia klimatyzacyjno-wentylacyjne – urządzenia do ogrzewania, schładzania, osuszania lub nawilżania powietrza w magazynach zamkniętych i inne,

- urządzenia przeciwpożarowe – instalacje alarmowe sterowane lub automatyczne, instalacje gaśnicze (hydranty, urządzenia pianotwórcze, zasłony wodne), osprzęt gaśniczy (gaśnice, tłumnice, koce azbestowe) i inne,

- urządzenia pomocnicze do składowania i manipulacji – palety, nadstawki palet, pojemniki, jarzma, urządzenia do mocowania ładunków i inne,

- urządzenia techniczno-organizacyjne mające zastosowanie zwłaszcza w procesach informacyjnych: kalkulatory, maszyny księgujące i fakturujące, kartoteki, katalogi, indeksy, czujniki kontrolne itp.

Procesy informacyjno-decyzyjne, ze względu na potencjał osobowy oraz kapitałowy, są równoważne do procesów fizycznego przepływu dóbr. Liczba osób zatrudnionych w działach biorących udział w procesach informacyjnych (służba zaopatrzenia, zbytu, marketingu, przetwarzania informacji) jest często większa od liczby osób zatrudnionych w procesie fizycznego przepływu (w transporcie, magazynach).

Infrastruktura procesów informacyjno-decyzyjnych obejmuje:

- systemy kodowania i identyfikacji dóbr rzeczowych (surowców, materiałów, wyrobów, towarów),

- dokumentacje przepływu (dowody przyjęcia, wydania, faktury, dyspozycje, listy przewozowe itp.),

- systemy kodowania dokumentów, kontraktów, własnych komórek organizacyjnych i stanowisk pracy,
- systemy obiegu dokumentów, instrukcje ich wypełniania,
- przetwarzanie informacji oraz ich grupowanie i agregowanie w różnych przekrojach czasowych oraz dla różnych funkcji dyspozycyjno-decyzyjnych,
- techniczne środki emisji, przetwarzania, gromadzenia i upowszechniania informacji (komputery, urządzenia peryferyjne, systemy łączności).

3.2.5. SYSTEMY WSPARCIA LOGISTYCZNEGO

Opierając się na podstawowej literaturze z zakresu inżynierii logistycznej (np. [16, 31]), po zastosowaniu podejścia systemowego w logistyce, można zdefiniować system wsparcia logistycznego, który jest określany jako celowo zorganizowany podsystem systemu technicznego, wspierający jego proces podstawowy (eksploatacji) przez integrację wszystkich działań, związanych z efektywnym i korzystnym przepływem niezbędnych zasobów rzeczowych i informacyjnych oraz wspierający obsługę procesu eksploatacji w zakresie zapewnienia koniecznego dla tego procesu zaplecza logistycznego (wyposażenia wspierającego i kontrolno-pomiarowego). Przedstawiona definicja [237] odnosi się z jednej strony do cyklu istnienia systemu, a z drugiej strony obejmuje zarówno cechy logistyki przedsiębiorstwa, jak i logistyki wojskowej.

Zadania systemu logistycznego realizowane są przez procesy logistyczne, które towarzyszą każdemu procesowi podstawowemu. W obszarze wsparcia systemów technicznych procesy logistyczne przede wszystkim mają na celu [16, 31, 124, 145]:

– zabezpieczenie właściwego funkcjonowania systemu eksploatacyjnego w zasoby i w usługi:

- zapewnienie i naprawa części wymiennych, podzespołów, zespołów i modułów wyposażenia technicznego systemu,

- zapewnienie terminowości obsługi napraw, zgodnie z wymaganiami i potrzebami systemu technicznego, jak i systemów obsługowych,

– utrzymanie środków trwałych w stanie zdolności funkcjonalnej i zadaniowej:

- zapewnienie maszyn i urządzeń niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania zaplecza technicznego w zakresie potrzeb i wymagań systemu obsługowego i przewozowego,

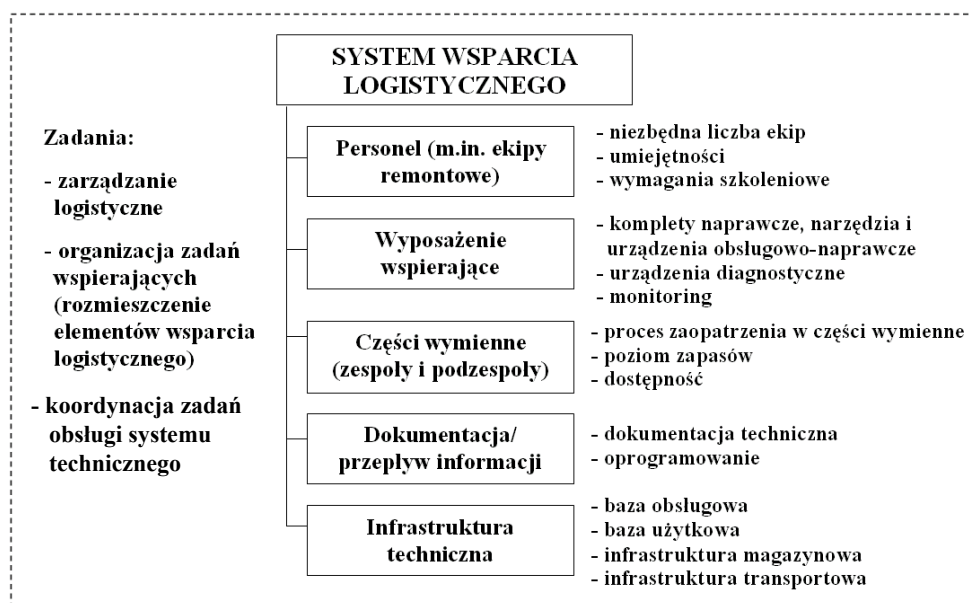
- realizacja procesów obsługowo-naprawczych maszyn i urządzeń stanowiących wyposażenie jednostek organizacyjnych zaplecza (rys. 3.14).

Zgodnie z przedstawionym schematem, istotą logistyki systemu technicznego jest zapewnienie środków do osiągnięcia założonego poziomu utrzymania całego systemu technicznego dla wielu wyszczególnionych potrzeb operacyjnych, dzięki procesom logistycznym i odpowiedniej infrastrukturze wspierającej.



Rys. 3.14. Zadania logistyki w utrzymaniu systemu technicznego [234]

Ograniczając zadania logistyki jedynie do problemu zapewnienia niezbędnych zasobów w procesie funkcjonowania systemu technicznego, można ponadto wyróżnić pięć podstawowych elementów wsparcia logistycznego (rys. 3.15).



Rys. 3.15. Elementy wsparcia logistycznego systemu technicznego [234]

3.2.6. PRZYKŁAD – STAN INFRASTRUKTURY LOGISTYCZNEJ W POLSCE

Liniową infrastrukturę logistyczną stanowią: drogi publiczne, linie kolejowe, śródlądowe drogi wodne i linie lotnicze. W 2006 r. w Polsce było [50]:

- dróg publicznych o utwardzonej nawierzchni: 255 543 km, w tym:
 - o ulepszonej nawierzchni: 229 249 km,
 - autostrad i dróg ekspresowych: 960 km;
- eksploatowanych linii kolejowych: 20 176 km, w tym:
 - normalnotorowych: 19 763 km,
 - zelektryfikowanych: 11 871 km;
- dróg wodnych śródlądowych: 3660 km,
- sieci tras lotniczych: 207 599 km.

Drogi publiczne dzieli się ze względu na funkcje w sieci drogowej:

- krajowe: 18 414 km,
- wojewódzkie: 28 441 km,
- powiatowe: 114 416 km,
- gminne: 94 270 km.

Gęstość dróg publicznych przypadających na 100 km² powierzchni nie jest dużo mniejsza niż w innych rozwiniętych krajach Unii Europejskiej, ale polska sieć drogową ma wiele wad, m.in. [50]:

- brak spójnej sieci autostrad i dróg ekspresowych,
- niedostosowanie dróg do nacisków na oś 115 kN (tylko około 2200 km),
- prowadzenie ruchu przez tereny zabudowane, skutek – duży udział pieszych w wypadkach drogowych,
- zły stan utrzymania dróg, tylko około 54% dróg w stanie dobrym.

Długość eksploatowanych linii kolejowych w Polsce maleje [50]: z 27 000 km w 1980 r. do 20 000 km w 2006 r. Średnia gęstość linii wynosi 6,5 km/100 km² i jest bardzo zróżnicowana pomiędzy poszczególnymi województwami. Największe zagęszczenie linii występuje w województwie śląskim (17,4 km/100 km²), a najmniejsze w województwie podlaskim (3,3 km/100 km²). Mała gęstość linii jest charakterystyczna dla województw wschodnich. W dobrym stanie technicznym jest tylko około 28% linii w Polsce.

Śródlądowe drogi wodne mają niewielkie znaczenie w realizacji zadań logistycznych w porównaniu do dróg i linii kolejowych. Rzeczywiste znaczenie gospodarcze ma tylko Odrzańska Droga Wodna obejmująca Kanał Gliwicki, Odrę skanalizowaną i Odrę swobodnie płynącą. Parametry drogi wodnej o znaczeniu międzynarodowym (przynajmniej klasa IV) ma tylko dolny odcinek Odry i krótkie odcinki Wisły.

Logistyczna infrastruktura punktowa w Polsce rozwija się od początku XXI wieku bardzo dynamicznie. Składają się na nią: zasoby powierzchni magazynowych, porty morskie, śródlądowe wodne, lotnicze, terminale transportu intermodalnego i przejścia graniczne.

W 2007 r. wybudowano ponad 4 500 000 m² nowych powierzchni magazynowych [50]. Najwięcej nowych magazynów powstało w województwie mazowieckim (udział około 44%), wielkopolskim (16%), łódzkim (15%), śląskim (12%) i dolnośląskim (6%). W tych regionach koncentruje się blisko 98% całkowitej wielkości nowoczesnych powierzchni magazynowych w Polsce. Do największych deweloperów na rynku

budowy magazynów należą: ProLogis, Panattoni i SEGRO – wybudowali ponad 50% istniejących zasobów magazynowych.

Do najważniejszych portów morskich w Polsce należą: Gdańsk, Gdynia, Szczecin i Świnoujście. Portami o mniejszym znaczeniu są: Police, Darłowo, Stepnica, Trzebież, Nowe Warpno, Kołobrzeg, Władysławowo, Ustka i Elbląg. Łączna długość nadbrzeży przeładunkowych w portach wynosi około 42 000 m, w tym [50]:

- Szczecin: 15 000 m,
- Gdynia: 10 000 m,
- Gdańsk: 7000 m,
- Świnoujście: 4000 m.

Prawie 100% przewozów w Polsce w technologii transportu intermodalnego jest realizowanych w kontenerach. Kontenery mogą być przeładowywane na 23 terminalach (2007 r.), przy czym 5 z nich to terminale morsko-kolejowo-drogowe, a 18 kolejowo-drogowe. Największa koncentracja terminali obejmuje region śląski, Poznań, Warszawę i Trójmiasto.

3.3. MODELE SYSTEMÓW LOGISTYCZNYCH

Analiza i badania systemów mogą być ukierunkowane na osiągnięcie bardzo różnych celów (np. [78], [189], [209]). Może to być np.: identyfikacja elementów lub struktury systemu, określenie właściwości (atrybutów) elementów systemu, poznanie wpływu wielkości wejściowych na wyróżnione charakterystyki systemu (np. niezawodność), poszukiwanie rozwiązań optymalnych w aspekcie sterowania systemem lub projektowania jego struktury, doboru elementów technicznych. Takie działania mogą być prowadzone na systemach rzeczywistych (badania eksploatacyjne) lub na modelach (najczęściej matematycznych) zbudowanych pod kątem realizowanego celu badań.

Badania i ocena niezawodności systemu logistycznego, ze względu na możliwości analizy poprawności realizacji zadań logistycznych, wymaga podejścia czynnościowego do modelowanego systemu [92]. Taki charakter mają łańcuchy logistyczne definiowane jako [62]: „... łańcuchy magazynowo-transportowe, które stanowią technologiczne połączenia punktów magazynowych i przeładunkowych drogami przewozu towarów oraz organizacyjne i finansowe skoordynowania operacji, procesów zamówień i polityki zapasów wszystkich ogniw łańcucha”.

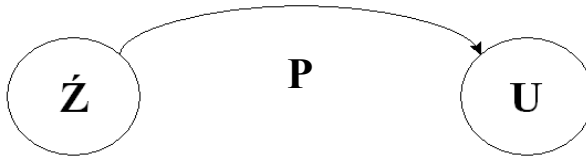
3.3.1. MODEL ELEMENTU SYSTEMU

Dekompozycja struktury systemu logistycznego może być prowadzona aż do zdefiniowania elementu systemu. Element systemu logistycznego jest takim jednorodnym podsystemem, który daje się w sposób jednoznaczny wydzielić ze struktury systemu, a zarazem jest w pełni opisywalny przez dostępną dokumentację funkcjonowania systemu.

Elementami systemu logistycznego mogą być zarówno obiekty materialne – zasoby rzeczowe i ludzkie, jak i byty niematerialne – informacje, przepisy, dane źródłowe. Podstawowym zadaniem elementów systemu logistycznego w sferze przepływów fizycznych są procesy transportu (wewnętrznego lub zewnętrznego) oraz magazynowania produktów.

Wobec tego podstawowym zadaniem elementu logistycznego jest wzajemne powiązanie sekwencji działań, na początku których występuje źródło, w którym pojawia się towar, a na końcu ujście, gdzie przesyłany towar jest wchłaniany przez odbiorcę. Taki element logistyczny możemy utożsamiać z elementarnym kanałem dystrybucji. Błędem lub uszkodzeniem elementu systemu logistycznego będzie niewykonanie zadania związanego z przepływem towaru lub, w dalszej analizie, także informacji (np. [222]).

Między źródłem a ujściem występuje połączenie transportowe (droga). Układ taki można przedstawić [63] za pomocą prostego grafu (rys. 3.16), w którym występują dwa rodzaje oznaczeń graficznych: węzeł (wierzchołek grafu) i łuk (połączenie).



Rys. 3.16. Graf przedstawiający element systemu logistycznego

W elemencie logistycznym występują dwa węzły: źródło \acute{Z} i ujście U oraz jeden łuk wyrażający połączenie transportowe między nimi P . Źródło charakteryzuje się wydajnością λ_w , mierzoną np. ilością jednostek towarowych pojawiających się w jednostce czasu, a ujście chłonnością λ_c mierzoną np. ilością jednostek towarowych odbieranych przez klienta w jednostce czasu, natomiast droga opisywana jest parametrem przepustowości λ_p , tzn. maksymalną liczbą jednostek towarowych, które mogą być przemieszczone w jednostce czasu. Efektywne działanie elementarnego kanału dystrybucji zależy oczywiście od równowagi między chłonnością ujścia a wydajnością źródła.

W najprostszym przypadku musi być spełniona zależność:

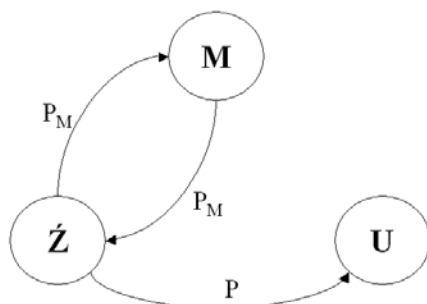
$$\lambda_w = \lambda_c = \lambda_p \quad (3.13)$$

Spełnienie takiego wymogu w warunkach rzeczywistych, gdy wydajność, chłonność i przepustowość są losowymi funkcjami czasu, warunek (3.13) jest nie do dotrzymania i powinien być zastąpiony warunkiem:

$$\lambda_w < \lambda_c < \lambda_p \quad (3.14)$$

Takie ujęcie rozszerza znacznie idee elementarnego kanału dystrybucji, dopuszcza bowiem niejednoznaczne sytuacje w bilansie przepływu masy towarów i wprowadza możliwość chwilowego zakłócenia bilansu. W przypadku zakłóceń bilansu chłonności i wydajności konieczne jest wprowadzenie do elementarnego kanału dystrybucji – bufora (magazynu M) (rys. 3.15), wtedy

$$\begin{aligned}\lambda_w &\leq \lambda_p + \lambda_{pm} \\ \lambda_c &\leq \lambda_p \\ \lambda_w - \lambda_c &\leq \lambda_{pm}\end{aligned}\tag{3.15}$$

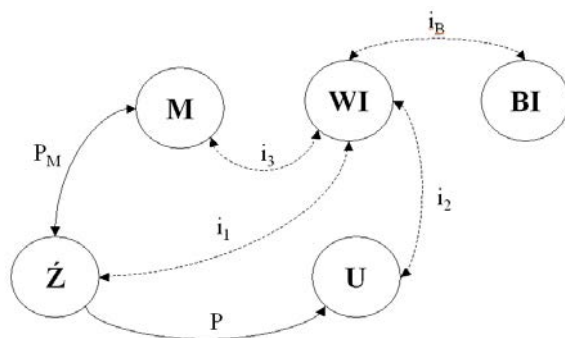


Rys. 3.17. Elementarny kanał dystrybucji z buforem M

Wprowadzenie bufora magazynowego M pozwala na chwilowe przekroczenie chłonności ujścia przez wydajność źródła. Przekroczenie to jest ograniczone przepustowością drogi łączącej źródło z buforem (magazynem), a także pojemnością magazynu M. Przez pojęcie pojemności magazynu rozumie się liczbę jednostek ładunkowych, które mogą być w nim umieszczone i składowane. Jest więc:

$$(\lambda_w - \lambda_c) \Delta t \leq M\tag{3.16}$$

gdzie: Δt – czas zakłócenia równowagi przepływu w kanale dystrybucji.



Rys. 3.18. Elementarne ogniwo łańcucha logistycznego.

WI – węzeł informacyjny, BI – bufor informacyjny, i – przepływ informacji

Nierównowaga przepływu w kanale dystrybucji powinna być śledzona i sterowana na podstawie odpowiednio skonstruowanego systemu sprzężeń zwrotnych. Wprowa-

dzając do elementarnego kanału dystrybucji, równoległy elementarny system informacyjny, otrzymamy elementarne ogniwo łańcucha logistycznego (rys. 3.18).

Elementarne ogniwo łańcucha logistycznego składa się z elementarnego kanału dystrybucji i węzła informatycznego z buforem. W takim ujęciu przepływ informacji może być opisany tak samo jak przepływ materiałów, tzn. za pomocą wydajności, chłonności, źródeł i ujść informatycznych, przepustowości bufora. Tu także musi wystąpić równowaga przepływów. Tak zdefiniowane ogniwo łańcucha logistycznego jest podstawą tworzenia łańcucha logistycznego.

3.3.2. MODEL SYSTEMU

Na podstawie przedstawionych koncepcji elementów systemu logistycznego można zbudować model systemu, biorąc pod uwagę omówione w rozdz. 3.1 definicje systemu. Zgodnie z wzorem (3.1) budowa modelu wymaga określenia:

- zbioru elementów systemu \mathbf{E} ,
- zbioru właściwości (atrybutów) elementów \mathbf{A} ,
- zbioru relacji między atrybutami (lub elementami) \mathbf{R} .

Zbiór elementów systemu \mathbf{E} zawiera elementarne ogniwa łańcucha logistycznego zbudowane, w sensie technologicznym, z węzłów \mathbf{W} o charakterze źródeł i ujść ładunków, węzłów bufora magazynowego, węzłów informacyjnych oraz łuków \mathbf{L} łączących odpowiednie węzły. Wobec tego zbiór węzłów \mathbf{W} jest sumą zbiorów:

$$\mathbf{W} = \mathbf{Z} \cup \mathbf{U} \cup \mathbf{M} \cup \mathbf{WI} \cup \mathbf{MI} \quad (3.17)$$

gdzie: \mathbf{Z} – zbiór źródeł towaru i informacji o towarze, \mathbf{U} – zbiór ujść towaru i wykorzystania informacji o towarze, \mathbf{M} – zbiór miejsc przechowywania towaru (bufor czasowy), \mathbf{WI} – zbiór węzłów przetwarzania informacji, \mathbf{MI} – zbiór miejsc gromadzenia i przechowywania informacji.

Uogólniając – \mathbf{W} jest zbiorem węzłów indeksowanych numerem i :

$$\mathbf{W} = \{1, \dots, i, \dots, j, \dots, N_W\} \quad (3.18)$$

gdzie: N_W – liczba węzłów systemu logistycznego wyróżnionych w analizie.

Między poszczególnymi węzłami, węzłem o numerze i ($i \in \mathbf{W}$) oraz węzłem o numerze j ($j \in \mathbf{W}$, $i \neq j$) mogą istnieć bezpośrednie połączenia umożliwiające przepływ towarów lub informacji $L_{ij} \in \mathbf{L}$, takie że:

$$\mathbf{L} = \{(i, j): (i, j) \in \mathbf{W} \times \mathbf{W}, i \neq j\} \quad (3.19)$$

Łuk L_{ij} jest interpretowany jako przejście od węzła i do węzła j .

Często (np. [78]) w modelach systemów transportowych definiuje się tylko występowanie danego połączenia. Wówczas przyjmuje się, że istnieje odwzorowanie L :

$$l: \mathbf{W} \times \mathbf{W} \rightarrow \{0, 1\} \quad (3.20)$$

przy czym $l(i, j) = 1$ wtedy i tylko wtedy, gdy między węzłami i oraz j ($i \neq j$) znajduje się bezpośrednie połączenie. W przeciwnym razie $l(i, j) = 0$. Dla uproszczenia stosuje się zapis: $l(i, j) = l_{ij}$.

Właściwości (atrybuty) elementu \mathbf{A} (podsystemu) są to [39, 74, 185] cechy umożliwiające uszczegółowienie i identyfikacje obiektu badań w pożądanym stopniu. Zbiór \mathbf{E} opisujący skład systemu spełnia warunki:

$$\mathbf{E} = \{E_i : z(E_i, A_j)\} \quad (3.21)$$

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

Element E_i jest opisany właściwością $\mathbf{A}_j \in \mathbf{A}$. Można więc zapisać

$$z(E_i, A_j) \Rightarrow E_i \in \mathbf{E} \wedge A_j \in \mathbf{A} \quad (3.22)$$

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

$$S_k = \langle \mathbf{E}_k, \mathbf{A}_k, \mathbf{R}_k \rangle \quad (3.23)$$

gdzie: $\mathbf{E}_k, \mathbf{A}_k, \mathbf{R}_k$ – podzbiory zbiorów $\mathbf{E}, \mathbf{A}, \mathbf{R}$.

Na najniższym poziomie dekompozycji, przy danym celu analizy, podsystem (element) jest niepodzielny. Niepodzielny element E_i jest charakteryzowany przez wiele atrybutów A_j powiązanych relacjami R_j . Atrybuty A_j (cechy opisujące element) dzieli się na dwie kategorie [176]: cechy pierwotne i cechy wtórne (fizyczne).

Cechy pierwotne pozwalają na scharakteryzowanie elementu i stanowią informacje umożliwiające wyznaczenie cech wtórnych (uzupełniających). Cechy pierwotne opisują mikro- i makrogeometrię elementu, budowę materii i jej stan energetyczny. Cechy pierwotne pozwalają na jednoznaczny opis budowy i stanu energetycznego elementu. Nie można jednak na podstawie rozważań teoretycznych wyznaczyć cech wtórnych (fizycznych), które są określane doświadczalnie w umownych warunkach eksploatacji i na znormalizowanych elementach – próbkach.

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

Zbiór właściwości elementów systemu logistycznego \mathbf{A} przyporządkowuje zarówno węzłom, jak i łukom zbiór funkcji, każda o ustalonej interpretacji. Funkcje $z(E_i, A_j)$ odwzorowują wybrane do analizy charakterystyki systemu logistycznego, jak np.:

- charakterystyki techniczne maszyn i urządzeń technologicznych, infrastruktury transportu wewnętrznego lub zewnętrznego, sieci informatycznej itp.,

- charakterystyki ekonomiczne,
- charakterystyki eksploatacyjne obiektów m.in. gotowość, niezawodność, naprawialność, bezpieczeństwo.

Zbiór relacji między elementami systemu **R** wyraża strukturę systemu logistycznego i często (np. [77]) jest zapisywany w postaci odpowiedniego grafu **G**:

$$\mathbf{G} = \langle \mathbf{W}, \mathbf{L} \rangle \quad (3.24)$$

gdzie: **W** – zbiór wierzchołków grafu **G**, **L** – zbiór łuków grafu **G**.

System logistyczny realizuje więc przekształcenia ze względu na:

- Czas: składowanie krótkotrwałe – buforowanie materiałów w podukładach rozdzielających i konsolidujących strumienie materiałowe; składowanie długotrwałe – bieżące, zapewniające ciągłość działania układów dystrybucji i produkcji oraz składowanie długotrwałe – rezerwowe, umożliwiające gromadzenie dóbr materialnych w celach strategicznych, obronnych i innych znaczących ze względu na utrzymanie sprawności działania całego systemu.

- Miejsce: transport materiałów w różnych postaciach między blokami funkcjonalnymi systemu, umożliwiający realizację podstawowych przekształceń w tych blokach. Transport może być realizowany poprzez różne gałęzie transportu oraz ich kombinacje, tak aby zapewnione było efektywne wykorzystanie różnych form transportu.

- Postać: szeroko rozumiana zmiana formy fizycznej materiałów ze względu na działania podjęte w blokach funkcjonalnych systemu. W ramach przekształcenia ze względu na postać można mówić o produkcji, która zmienia fizyczną postać materiałów oraz o operacjach zmiany postaci ładunkowej – komisjonowaniu, pakowaniu, przepakowywaniu, a także przeładunkach.

Biorąc pod uwagę charakter zadań realizowanych przez system logistyczny, wymaga się [79], aby w modelu odwzorowane były nie tylko takie wielkości, jak:

- struktura **R**: przedstawiająca powiązania między elementami badanego systemu logistycznego,

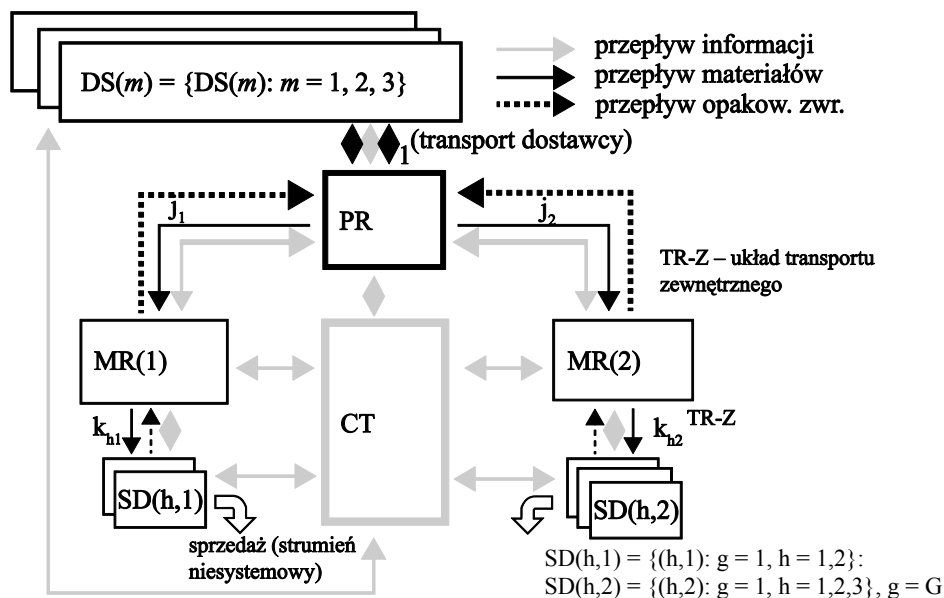
- charakterystyki **A** elementów systemu **E**: przedstawiające odwzorowanie rzeczywistych właściwości elementów systemu logistycznego (istotnych ze względu na dobór wyposażenia, np. techniczne, ekonomiczne, organizacyjne itp.), ale także:

- zadanie logistyczne systemu: określające wielkość obciążenia systemu strumieniami ładunków i informacji (w relacji nadanie i odbiór),

- organizacja przedstawiająca powiązania między wyposażeniem systemu logistycznego a obsługiwanyimi strumieniami ładunków.

Model systemu logistycznego można wówczas zapisać jako uporządkowaną czwórkę w postaci:

$$\mathbf{MSL} = \langle \mathbf{R}, \mathbf{F}, \mathbf{Q}, \mathbf{O} \rangle \quad (3.25)$$



Rys. 3.19. Uproszczony model przepływu materiałów i informacji w systemie logistycznym [78]

gdzie: **MSL** – model systemu logistycznego, **R** – struktura systemu logistycznego, **F** – zbiór charakterystyk elementów systemu, **Q** – wielkość zadań logistycznych, jakie system ma zrealizować, **O** – sposób realizacji zadań logistycznych przez system.

W sposób poglądowy można przedstawić system logistyczny tak jak na rysunku 3.19.

3.3.3. PRZYKŁAD – MODEL SYSTEMU LOGISTYCZNEGO POLSKI

Krajowy system logistyczny, będąc systemem usługowym dla pozostałych sfer gospodarki (wzrost, produkcja itd.), realizuje zadania, które wynikają z nadań i odbiorów ładunków występujących w poszczególnych sferach gospodarki. W takim ujęciu [79] zasoby LSP (*Logistycznego Systemu Polski*) zostały ograniczone do: podsystemu transportu zewnętrznego oraz podsystemu przeładunkowego i magazynowego. W analizie problemu pominięto podsystem przepływu informacji.

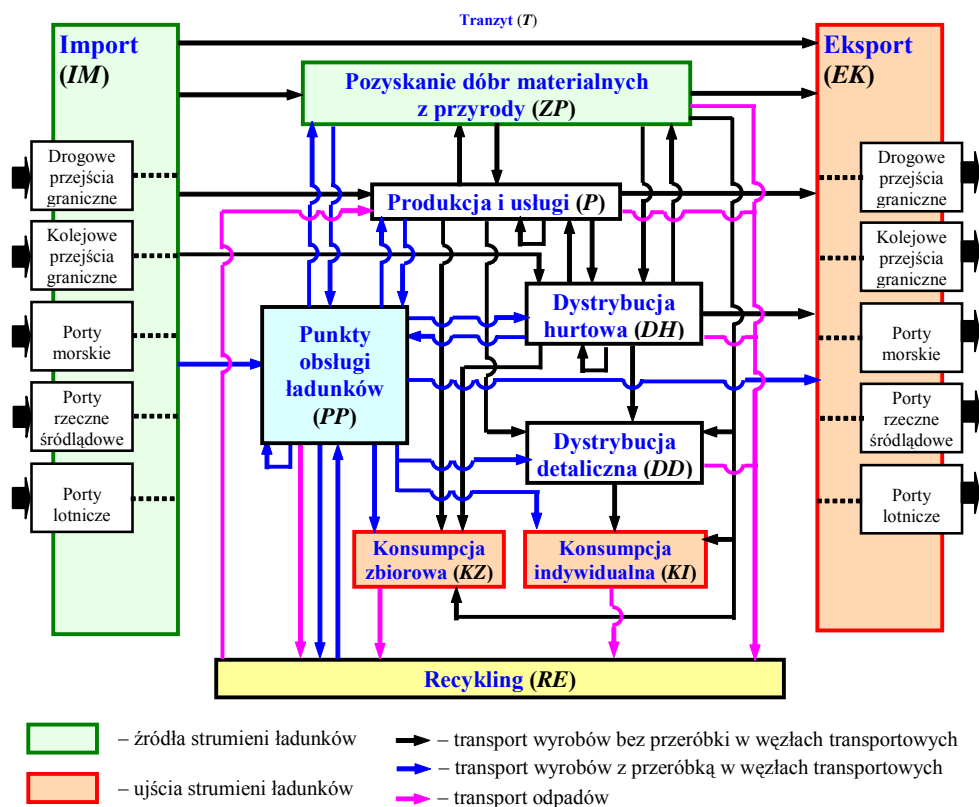
Działaniami podejmowanymi wewnątrz LSP są decyzje w zakresie przydziału zasobów LSP do realizacji postawionych przed nim zadań – organizacja systemu. W wyniku organizacji, dla systemu logistycznego Polski określony zostaje sposób realizacji zadań logistycznych. Organizacja LSP powinna zapewnić wymaganą efektywność tego systemu.

Możliwość przydziału poszczególnych zasobów LSP do realizacji zadań logistycznych oraz jakość tego przydziału są uwarunkowane charakterystykami elementów LSP (np. zdolności przewozowe poszczególnych rodzajów transportu, koszty przewozu według rodzajów transportu, czy też zdolności obsługowe tradycyjnych oraz inter-

modalnych punktów przeładunkowych lub przystosowanie punktów nadeń oraz odbioru ładunków do obsługi za pomocą poszczególnych rodzajów transportu).

Biorąc pod uwagę charakter oraz zadania realizowane przez system logistyczny, w jego modelu odwzorowane były takie właściwości, jak:

- struktura – przedstawiająca powiązania między elementami badanego systemu logistycznego LSP;
- charakterystyki elementów struktury systemu LSP – przedstawiające odwzorowanie rzeczywistych właściwości elementów systemu logistycznego (istotnych ze względu doboru wyposażenia, np. techniczne, ekonomiczne, organizacyjne itp.);
- zadanie logistyczne LSP – określające wielkość obciążenia systemu strumieniami ładunków (w relacji nadanie i odbiór);
- organizacja LSP – przedstawiająca powiązania między wyposażeniem systemu logistycznego a obsługiwanymi strumieniami ładunków.



Rys. 3.20. Schemat powiązań elementów w Systemie Logistycznym Polski LSP [79]

Model Systemu Logistycznego Polski MLSP został opisany [79] jako uporządkowana czwórka:

$$\text{MLSP}^K = \langle \mathbf{S}^{\text{LSP}}, \mathbf{F}^{\text{LSP}}, \mathbf{QZ}^{\text{LSP}}, \mathbf{O}^{\text{LSP}} \rangle \quad (3.26)$$

gdzie: MLSP^K – Model Systemu Logistycznego Polski, \mathbf{S}^{LSP} – struktura systemu logistycznego Polski, \mathbf{F}^{LSP} – zbiór charakterystyk elementów struktury LSP, \mathbf{QZ}^{LSP} – wielkość zadań logistycznych, jakie LSP ma zrealizować, \mathbf{O}^{LSP} – sposób realizacji zadań logistycznych przez LSP z uwzględnieniem komodalności.

Wśród istotnych relacji występujących między elementami LSP należy wymienić (rys. 3.20):

- rodzaj transportu, który może być wykorzystany do obsługi poszczególnych elementów LSP,
- powiązania podsystemów transportowych za pomocą węzłów transportowych poszczególnych rodzajów,
- możliwe drogi przepływu dóbr materialnych przez LSP.

Biorąc pod uwagę przyjęte założenia oraz definicję systemu, strukturę LSP formalnie można zapisać jako [79]:

$$\mathbf{S}^{\text{LSP}} = \langle \mathbf{A}^{\text{LSP}}, \mathbf{R}^{\text{LSP}} \rangle \quad (3.27)$$

gdzie: \mathbf{S}^{LSP} – struktura LSP, \mathbf{A}^{LSP} – zbiór elementów LSP, \mathbf{R}^{LSP} – zbiór relacji występujących między elementami LSP.

Wówczas zbiór elementów LSP jest sumą następujących zbiorów [79]:

$$\mathbf{A}^{\text{LSP}} = \mathbf{IM} \cup \mathbf{ZP} \cup \mathbf{PU} \cup \mathbf{EK} \cup \mathbf{T} \cup \mathbf{DH} \cup \mathbf{DD} \cup \mathbf{KZ} \cup \mathbf{KI} \cup \mathbf{RE} \cup \mathbf{PL} \cup \mathbf{TZ} \quad (3.28)$$

gdzie: \mathbf{A}^{LSP} – zbiór elementów LSP, \mathbf{IM} – zbiór elementów podsystemu importu, \mathbf{ZP} – zbiór elementów podsystemu pozyskania dóbr naturalnych, \mathbf{P} – zbiór elementów podsystemu produkcji i usług, \mathbf{EK} – zbiór elementów podsystemu eksportu, \mathbf{T} – zbiór elementów podsystemu tranzytu, \mathbf{DH} – zbiór elementów podsystemu dystrybucji hurtowej, \mathbf{DD} – zbiór elementów podsystemu dystrybucji detalicznej, \mathbf{KZ} – zbiór elementów podsystemu konsumpcji zbiorowej, \mathbf{KI} – zbiór elementów podsystemu konsumpcji indywidualnej, \mathbf{RE} – zbiór elementów podsystemu recyklingu, \mathbf{PP} – zbiór elementów podsystemu punktów obsługi ładunków, \mathbf{TZ} – zbiór elementów podsystemu transportu zewnętrznego.

Wśród elementów podsystemu importu i eksportu można wyróżnić takie elementy, jak:

- kolejowe przejścia graniczne,
- drogowe przejścia graniczne,
- porty morskie,
- porty lotnicze,
- porty rzeczne śródlądowe.

Stanowią one elementy wiążące system logistyczny Polski z otoczeniem rozumianym jako kraje sąsiadujące z Polską. Będą one również występować jako elementy podsystemu punktów obsługi ładunków PP.

Wszystkie elementy LSP można podzielić [79] na źródła Z^{LSP} , ujścia U^{LSP} oraz elementy pośrednie P^{LSP} , w których następuje przetwarzanie strumieni ładunków. Relacje występujące w LSP są zdefiniowane następująco:

$$R^{LSP} \subset A^{LSP} \times A^{LSP} \quad (3.29)$$

Rodzaj podanych relacji i ich liczba zależy zarówno od liczby uczestników biorących udział w procesie przemieszczania od źródła do ujścia, jak i od formy transportu zastosowanego do realizacji procesu przemieszczania.

Przykładowe typy relacji dotyczą [79]:

- rodzaju transportu, który może być wykorzystany do obsługi poszczególnych elementów LSP, np.:

$$R_1^{LSP} \subset ZP \times TZ \quad (3.30)$$

- powiązania podsystemów transportowych za pomocą punktów obsługi ładunków:

$$R_2^{LSP} \subset TZ \times PP \times TZ \quad (3.31)$$

- możliwych dróg przepływu dóbr materialnych przez LSP, np.:

$$R_3^{LSP} \subset ZP \times TZ \times P \times TZ \times P \times TZ \times D \times TZ \times KI \quad (3.32)$$

3.4. MIARY OCENY SYSTEMÓW LOGISTYCZNYCH

W ostatnich latach opracowano wiele sposobów i metod pomiaru i oceny procesu funkcjonowania łańcucha logistycznego. Jednak charakteryzują się one pewnymi ograniczeniami, obejmującymi [120, 198]:

- brak spójności między miernikami logistycznymi poszczególnych obszarów logistycznych;
- ukierunkowanie przede wszystkim na wykorzystanie miary ekonomicznej zamiast operacyjnej, obejmującej m.in. miarę obszaru obsługi klienta czy jakości produktu;
- brak powiązań pomiędzy wykorzystywanymi miarami logistycznymi a realizowaną w łańcuchu logistycznym strategią logistyczną;
- pomiar przede wszystkim obszaru funkcjonowania pojedynczego uczestnika łańcucha dostaw zamiast rezultatów osiągniętych w całym łańcuchu.

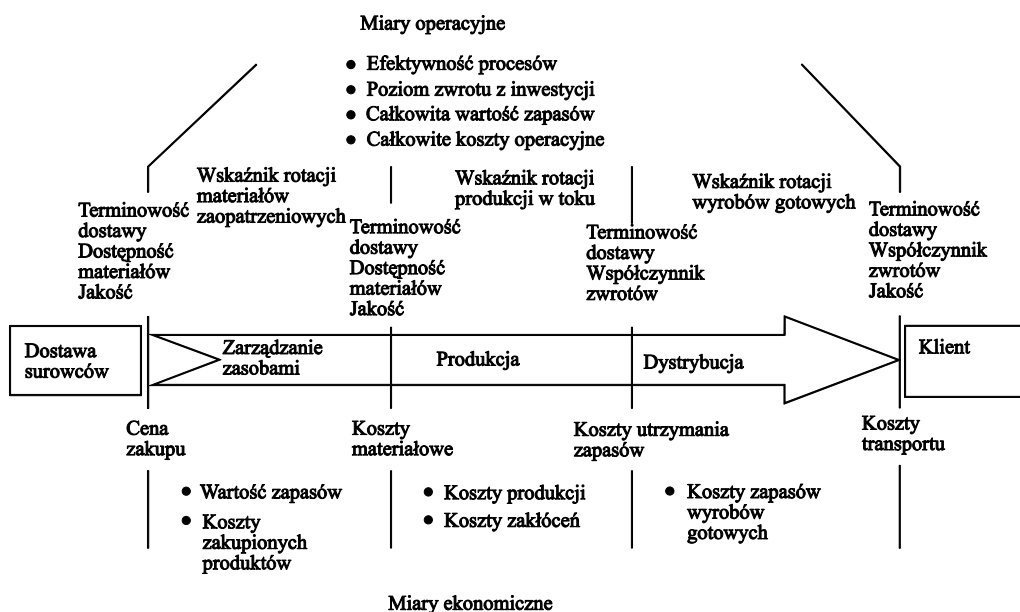
W rezultacie, w literaturze można znaleźć kilka metod pomiaru i oceny poziomu funkcjonowania łańcuchów logistycznych [120]:

- strategiczna karta wyników (ang. *Balanced Scorecard*),
- model SCOR,
- metoda ABC (ang. *Activity-Based Costing*),
- metoda EVA (ang. *Economic Value Analysis*).

Szczegółowe omówienie przedstawionych modeli można znaleźć m.in. w pracach [73, 120].

Właściwie zdefiniowany sposób pomiaru poziomu funkcjonowania łańcucha logistycznego jest podstawą osiągnięcia sukcesu na rynku konsumenta. Jednocześnie tradycyjne systemy pomiaru i oceny realizacji procesów podstawowych i logistycznych w analizowanym obszarze obejmują [29, 120, 198, 232]:

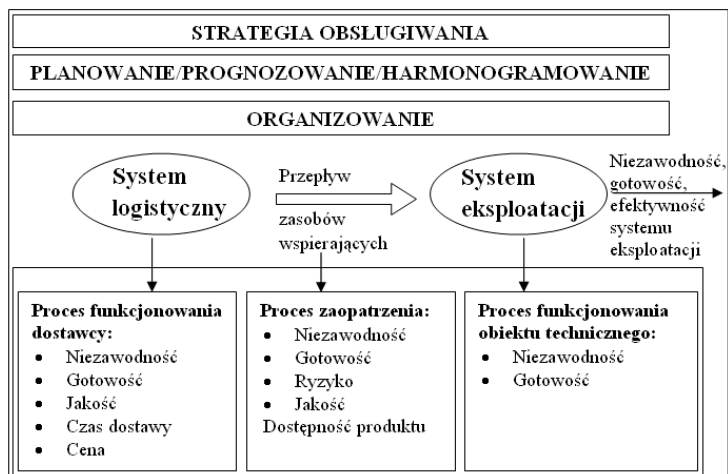
- miarę ekonomiczną;
- miarę obszaru obsługi klienta (m.in. miarę jakości i niezawodności obsługi);
- miarę oceny realizacji procesu logistycznego (np. ocenę poziomu zapasów);
- miarę czasu (m.in. czas przepływu i realizacji zlecenia klienta).



Rys. 3.21. Podstawowe wskaźniki pomiaru i oceny niezawodności łańcucha logistycznego [236]

Tradycyjna metoda organizacji łańcucha logistycznego ma na celu przede wszystkim osiągnięcie wysokiego poziomu obsługi klienta. Determinuje on charakter dokonywanych analiz, które przede wszystkim obejmują obszary kosztów logistycznych oraz ocenę obsługi dostawy [236]. Jednocześnie uzyskane wyniki w przedstawionym obszarze definiują również niezawodność realizacji zadań logistycznych (rys. 3.21).

Podczas analizy zagadnienia wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu eksploatacji niezawodność systemu logistycznego jest odniesiona do [165] (rys. 3.22):



Rys. 3.22. Podstawowe elementy pomiaru i oceny funkcjonowania systemu eksploatacji [165]

- **niezawodności realizacji procesu dostawy** – definiowanej w odniesieniu do terminowej i kompletnej realizacji dostawy zgodnie z wymaganiami klienta;
- **niezawodności procesu transportowego** – określanej jako prawdopodobieństwo, że w procesie transportowym nie pojawią się uszkodzenia ładunku;
- **niezawodności infrastruktury logistycznej** – definiującej prawdopodobieństwo poprawnej pracy zasobów wspierających (np. personelu, urządzeń wspierających).

Ocena funkcjonowania systemu logistycznego koncentruje się obecnie na ocenie zaspokojenia potrzeb finalnego odbiorcy towarów. Oznacza to [179] przypisanie odbiorcy nowej roli, jaką jest nie tylko przyjmowanie zamówionych towarów, ale także akceptowanie ich jako spełniających jego oczekiwania. Tak więc ocena systemu logistycznego polega na ocenie logistycznej obsługi klienta definiowanej jako [92] wykonanie wzajemnie skoordynowanych czynności i usług logistycznych mających wpływ na satysfakcję klienta przy zakupie produktu (ostatnim etapie procesu rozpoczynającego się złożeniem zamówienia i kończącego się dostawą produktu do klienta). Cechami, do których klienci przywiązują największą wagę, są m.in. czas dostawy, dostępność produktu z zapasu, elastyczność, częstotliwość, punktualność, dokładność, kompletność i niezawodność dostawy. Wszystkie te cechy można ocenić w sposób ilościowy, mogą więc stanowić podstawę do standaryzacji i porównywania ocen funkcjonowania systemu logistycznego.

Tradycyjna ocena przedsiębiorstwa (systemu działania) bazuje na różnego rodzaju wskaźnikach, do których zalicza się m.in. [102]:

- skuteczność (ang. *effectiveness*),
- sprawność/wydajność (ang. *efficiency*),
- jakość (ang. *quality*),
- rentowność (ang. *profitability*),
- produktywność (ang. *productivity*),

- jakość warunków pracy (ang. *quality of work life*),
- innowacyjność (ang. *innovation*).

Skuteczność jest mierzona stopniem, w jakim system realizuje to, co zostało zaplanowane. Do oceny stopnia skuteczności trzeba użyć co najmniej trzech kryteriów:

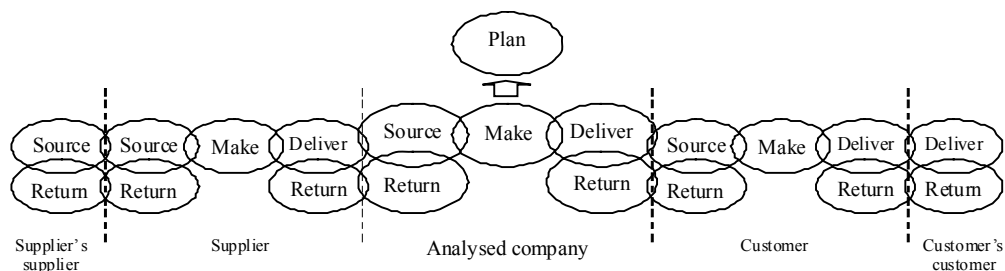
- jakości (czy produkt spełnia wymagania odbiorców),
- ilości (czy liczba wykonanych wyrobów jest zgodna z założonym planem),
- terminu (czy wykonane wyroby dostarczono użytkownikowi na czas).

Sprawność jest to stosunek oczekiwanego zużycia zasobów do zasobów faktycznie zużytych. Do oceny oczekiwanego zużycia zasobów wykorzystuje się różnego rodzaju normatywy, prognozy lub intuicję. Do oceny rzeczywistego zużycia zasobów wykorzystuje się natomiast dane księgowe. Jakość jest stopniem spełnienia przez system wymagań lub oczekiwań odbiorców. Rentowność (zyskowność) opisuje kondycję finansową przedsiębiorstwa i jest stosunkiem zysków, osiąganych przez system, do wielkości sprzedaży, zaangażowanego majątku lub kapitału własnego. Produktywność jest zależnością pomiędzy ilością produktów wytworzonych przez system do określonego rodzaju zasobu (np. energii) zużytego na wytworzenie tej produkcji. Jakość warunków pracy jest sposobem, w jaki uczestnicy systemu reagują na aspekty socjotechniczne tego systemu. Innowacyjność jest to zdolność systemu do kreowania nowych, lepszych produktów [205].

Wobec znacznego stopnia złożoności systemu logistycznego jego ocena jest także zagadnieniem wieloaspektowym i wymaga zastosowania odpowiednich kryteriów, np.:

- ekonomicznych (koszty logistyczne),
- technologicznych,
- eksploatacyjnych (niezawodność, gotowość),
- czasu (czas przepływu i realizacji zlecenia klienta).

Aktualnym standardem pomiaru funkcjonowania systemu logistycznego jest model SCOR – *Supply Chain Operations Reference* [91, 250]. Wdrażaniem tego modelu i jego doskonaleniem zajmuje się amerykańskie stowarzyszenie *Supply Chain Council* [201]. Model SCOR [91] opiera się na pomiarze procesów według ich podstawowych grup, zdekomponowanych następnie w poszczególne podprocesy i czynności logistyczne. Procesy te i czynności rozpatrywane są na czterech poziomach szczegółowości – ideę struktury modelu SCOR przedstawiono na rys. 3.23.



Rys. 3.23. Schemat procesu SCOR [160]

Model SCOR powstał jako narzędzie służące do porównywania procesów oraz dzielenia się informacją pomiędzy organizacjami funkcjonującymi w łańcuchach dostaw w różnych działach gospodarki i branżach przemysłu [91]. Za pomocą modelu SCOR bada się kilka cech procesów funkcjonowania łańcuchów dostaw, takich jak: wiarygodność, szybkość reakcji, elastyczność, koszt zasobów i efektywność ich wykorzystania. W modelu SCOR, w analogii do struktury podstawowych procesów i czynności logistycznych, wykorzystuje się kilka szczegółowych mierników, odzwierciedlających kolejne procesy przepływu produktów. I tak w modelu tym można zastosować takie mierniki, jak:

- mierniki długości czasu cyklu dostawy (np. długość cyklu produkcji, od gotówki do gotówki),
- mierniki kosztu (np. koszty dostawy, koszt pobrania produktu),
- mierniki obsługi/jakości (np. dostawy punktualne, uszkodzone produkty),
- mierniki zasobów (np. zapasy).

Wykorzystanie modelu SCOR zmierza w kierunku zogniskowania uwagi na wewnętrznych i zewnętrznych źródłach poprawy funkcjonowania łańcuchów dostaw. Przegląd zakresu mierników stosowanych przez system pomiaru wyników działania łańcuchów dostaw przedstawia tabela 3.2.

Ze względu na swoją strukturę i zakres model SCOR wiąże opisy i definicje procesów z ich miernikami, najlepszymi wzorcami praktyki funkcjonowania i technologią. Wydaje się, że model ten jest aktualnie najbardziej zbliżony do systemowej (zintegrowanej) wersji pomiaru funkcjonowania łańcuchów dostaw [91].

Tabela 3.2. Karta wyników w łańcuchu dostaw na poziomie 1 według modelu SCOR [91]

Orientacja wskaźników	Zakres pomiaru	Wskaźniki	Jednostka miary
Zorientowanie na zewnątrz firmy	Pewność funkcjonowania łańcucha dostaw	<ul style="list-style-type: none"> • Poziom punktualnej realizacji zamówień • Poziom kompletności realizacji zamówień • Okres oczekiwania klienta na realizację zamówienia • Poziom kompletności zrealizowania „zamówienia doskonałego” 	<ul style="list-style-type: none"> • Udział % w całej ilości zrealizowanych zamówień • Udział % w całości zamawianych pozycji • Liczba dni • Udział % w całej ilości zrealizowanych zamówień
	Elastyczność i reaktywność	<ul style="list-style-type: none"> • Elastyczność produkcji • Czas reakcji na zamówienie klienta 	<ul style="list-style-type: none"> • Długość cyklu produkcyjnego • Liczba dni
Zorientowanie na wewnątrz firmy	Koszty	<ul style="list-style-type: none"> • Całkowity koszt zarządzania łańcuchem dostaw • Koszty gwarancji lub koszty procesów zwrotu • Wartość dodana na 1 zatrudnionego 	<ul style="list-style-type: none"> • Udział % w wartości sprzedaży • Jednostki pieniężne • Jednostki pieniężne
	Zasoby	<ul style="list-style-type: none"> • Poziom zapasów • Cykl „od gotówki do gotówki” • Obroty aktywów 	<ul style="list-style-type: none"> • Liczba dni dostaw • Liczba dni • Liczba obrotów rocznie

Wcześniej wskaźniki logistyczne były definiowane [188] jako empirycznie obserwowalne i mierzalne stany faktyczne, które możliwie adekwatnie opisują cel lub system celów logistyki. Wówczas wskaźniki są traktowane jako regulatory ekonomiczne i narzędzia logistyczne ekonomicznego i logistycznego oddziaływania, a także pośrednie instrumenty sterowania przepływem surowców, materiałów i wyrobów gotowych.

Wskaźniki logistyczne służą m.in. do pomiaru efektywności systemów logistycznych, określania ilościowo sformułowanych celów, stopnia osiągnięcia celu logistycznej działalności przedsiębiorstwa oraz stopnia zaspokojenia potrzeb klientów będących przedmiotem jego działania.

Systemy wskaźników są formułowane dla logistyki przedsiębiorstwa oddzielnie dla każdego obszaru działań przez fazy przepływu towarów. Dla poszczególnych faz tworzone są zasadniczo te same wskaźniki. Strukturę tak budowanego systemu wskaźników pokazano na rys. 3.24.

Fazy przepływu towarów	Logistyka zaopatrzenia	Logistyka produkcji	Logistyka dystrybucji	Logistyka przedsiębiorstwa
Podsystemy logistyczne				
Ogólny system logistyczny				
Transport				
Gospodarka magazynowa				
Magazyn				
Obsługa zamówień				

Grupy obrotu wg towarów	A	B	C	Razem
Grupy obrotu wg klientów				
A				
B				
C				
Razem				

Rys. 3.24. Struktura systemu wskaźników logistycznych [226]

W analizie efektywności ekonomicznej systemu logistycznego zaleca się [188] myślenie kategoriami kosztów całkowitych, ponieważ „te same wzajemne zależności, które występują między elementami systemu logistycznego, występują również w wypadku kosztów wywołanych przez te elementy”. Obniżenie kosztów w jednym podsystemie logistycznym może być powodem zwiększenia kosztów w innym podsystemie. W przypadku gdy obniżka kosztów jest mniejsza niż ich wzrost, wówczas możliwy jest znaczny wzrost kosztów w całym systemie logistycznym. Myślenie ka-

tegoriami kosztów ogólnych lub całkowitych wymaga uwzględnienia wszystkich kosztów logistyki, które są istotne w podejmowaniu określonej decyzji logistycznej.

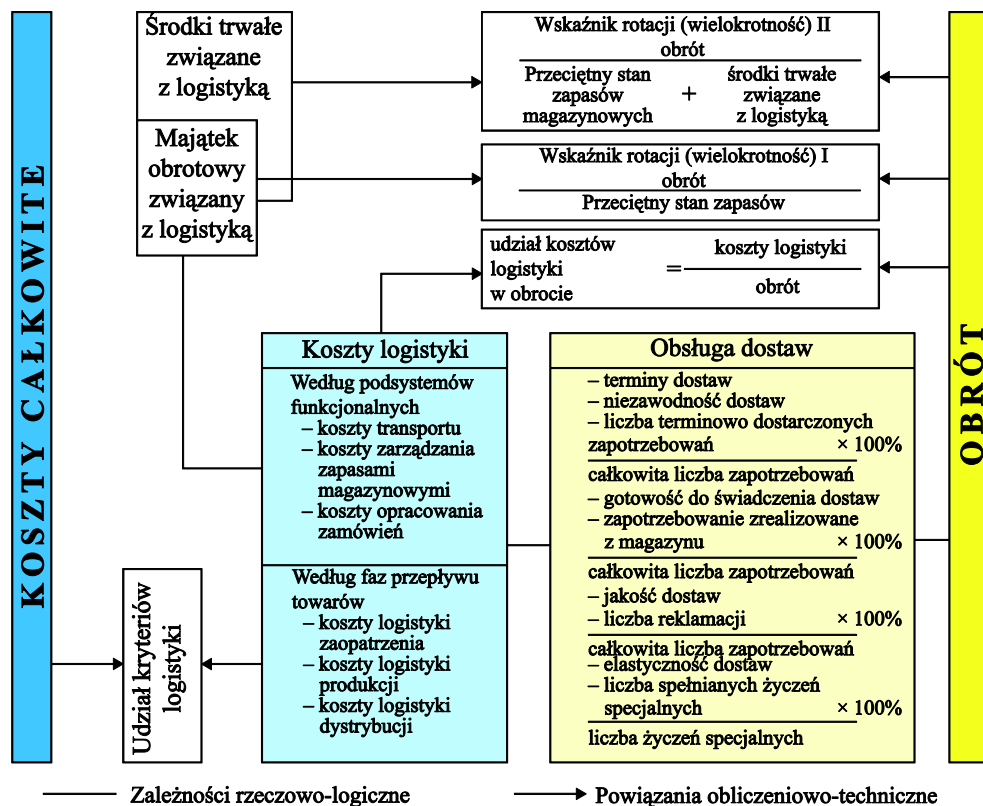
Całkowity koszt logistyki i podział na podsystemy logistyczne transportu, gospodarki magazynowej, magazynu i obsługi zamówień oraz ich zróżnicowanie należy podawać według faz przepływu towarów, takich jak logistyka zaopatrzenia, logistyka produkcji i logistyka dystrybucji. Wyraźnie sprecyzowany podział kosztów logistyki, rozpatrywany według faz logistycznych, określa główne punkty przedsiębiorstwa pod względem złożoności logistyki.

Na obsługę dostaw, stanowiącą wyjście z całego systemu logistycznego składają się takie elementy, jak: termin dostawy, niezawodność dostaw, jakość i elastyczność dostaw. Jako cykl dostawy określa się okres między złożeniem zamówienia przez klienta i otrzymaniem towaru. Cykl ten składa się z różnych komponentów, do których zaliczamy: czas transportu, czas opracowania zamówienia, czas kompletacji i przygotowania. Niezawodność dostaw określana jest stosunkiem terminowo dostarczanych zamówień do całkowitej liczby zapotrzebowań. Jakość dostaw może być natomiast mierzona stosunkiem liczb reklamacji i całkowitej liczby zapotrzebowań. Jako reklamację powinno się rozumieć wszelkiego typu zastrzeżenia co do dokładności dostaw lub stanu dostawy, jednak nieodnoszące się do terminu dostawy. Zdolność systemu logistycznego do dostosowywania się do określonych potrzeb klientów określa się wskaźnikiem elastyczności dostaw. Opisuje się go jako stosunek liczby spełnionych życzeń specjalnych do całkowitej liczby tych życzeń. Każde indywidualne przedsiębiorstwo wybiera taką definicję, która w jak najlepszy sposób oddaje zależność między niezawodnością i oczekiwanymi efektami w sprzedaży.

Ostatnim wskaźnikiem pomiaru efektywności całego systemu logistycznego, oprócz omówionych kosztów logistyki i obsługi dostaw, jest kapitał zamrożony w logistyce. Obejmuje on kapitał zamrożony w środkach trwałych, do których zaliczyć należy tabor transportowy, magazyn i urządzenia magazynowo-transportowe jak również kapitał znajdujący się w majątku obrotowym określany jako przeciętny stan zapasów magazynowych, wyceniony według cen.

Do wspólnego rozpatrywania ściśle związanego z logistyką majątku obrotowego i środków trwałych przyjmuje się dwa różne wskaźniki rotacji. Wskaźnik rotacji I odnoszący się jedynie do zapasów magazynowych oraz wskaźnik rotacji II podający obrót całego kapitału zamrożonego przez logistykę. Wskaźnik „koszty logistyki każdej jednostki obrotu” stanowi wskaźnik globalny dla obciążenia przychodów z produkcji przez koszty logistyki. Określa on wartość wejścia do systemu logistycznego, czyli koszty logistyki, w stosunku do wartości wyjścia z systemu, czyli obrotu. Wskaźnik ten uznaje się za najlepszy praktyczny wskaźnik opłacalności logistyki. Inne wskaźniki to przede wszystkim miernik czasu i jakości w zaopatrzeniu, sterowaniu produkcją, dystrybucji, magazynowaniu i kompletacji oraz miernik obsługi klienta.

Schemat tak zbudowanego systemu wskaźników logistycznych pokazano na rysunku 3.25.



Rys. 3.25. System wskaźników dla całego systemu logistycznego (wg [188])

Dla poszczególnych faz działania systemu logistycznego opracowano (np. [226]) bardziej szczegółowe zbiory wskaźników. Na przykład do oceny procesu zaopatrzenia określono istotę wskaźników ilościowych i jakościowych, które charakteryzują obszary współpracy z dostawcami. Wskaźniki ilościowe określają m.in.: liczbę zamawianych pozycji materiałów, ich ciężar, objętość, liczbę dokumentów i dostawców. Wskaźniki wartościowe podzielono na wskaźniki bezwzględne i wskaźniki względne. Podstawą podziału stały się wymagania porównawcze pomiędzy przedsiębiorstwami, które różnią się znacznie wielkością obrotu, liczbą zatrudnionych i wielkością zaangażowanego majątku. W grupie wskaźników bezwzględnych dominują koszty zaopatrzenia i ich udział w kosztach całkowitych oraz przypadających na dostawcę. Wyodrębniono także koszty reklamacji jako element oceny wyboru dostawcy oraz wskaźniki dotyczące czasu i jakości dostaw surowców – tablica 3.3.

W analizie wskaźników oceny poszczególnych podsystemów logistycznych [164] formułuje się kilka wskaźników związanych z bezbłędnym realizowaniem zadania przez podsystem. I tak dla procesu zaopatrzenia są to:

Tablica 3.3. Wskaźniki oceny systemu zaopatrzenia [226]

Lp.	Określenie wskaźnika	Wzór obliczenia wskaźnika	J.m.
1	Przeciętny czas trwania dostawy – cykl dostawy	Łączny czas dostaw/liczba dostaw	h
2	Czas realizacji zamówienia	Czas od przyjęcia zlecenia do wysłania dostawy	dni
3	Wartość dostarczanych wadliwych surowców	Wartość wadliwych surowców + wartość wadliwych opakowań + wartość wadliwych materiałów pomocniczych	zł
4	Udział wadliwych dostaw surowców	Liczba wadliwych dostaw surowców/łączna liczba dostaw surowców	%
5	Udział reklamowanych dostaw surowców	Liczba reklamowanych dostaw surowców/łączna liczba dostaw surowców	%
6	Opóźnienia dostaw surowców	Liczba opóźnionych dni dostaw surowców + liczba opóźnionych dni dostaw opakowań + liczba dni opóźnionych dostaw materiałów pomocniczych	dni
7	Udział opóźnionych dostaw surowców	Liczba opóźnionych dostaw surowców/łączna liczba dostaw surowców	%
8	Udział zwrotów dostaw surowców	Liczba zwróconych dostaw surowców/łączna liczba dostaw surowców	%
9	Niezawodność dostaw surowców	Liczba terminowo dostarczonych dostaw surowców/łączna liczba dostaw surowców	%
10	Udział wartościowy reklamowanych surowców	Wartość reklamowanych surowców/łączna wartość surowców	%
11	Elastyczność dostaw	Liczba spełnionych życzeń specjalnych/łączna liczba życzeń specjalnych	%
12	Średnia wartość zamówienia	Wartość zamówień zrealizowanych/liczba zamówień zrealizowanych	zł

- niezawodność dostawy – pewność realizacji dostawy oznacza prawdopodobieństwo dotrzymania ustalonych terminów dostawy i zgodności dostawy z zamówieniem (stosunek terminowo dostarczonych zamówień do całkowitej liczby zapotrzebowań),

- jakość dostawy – wydanie pożądaných i zamawianých produktów według rodzaju i ilości oraz stanu przesyłki, tj. kompletność, prawidłowość dokumentacji, zgodność opakowania z przepisami i życzeniami zamawiającego, uniknięcie uszkodzeń w czasie transportu i przeładunków (stosunek liczby reklamacji i całkowitej liczby zapotrzebowań),

- elastyczność dostaw (zdolność do dostosowania się do określonych potrzeb klientów) może być określona stosunkiem liczby spełnionych życzeń specjalnych do liczby tych życzeń,

- gotowość do świadczenia dostaw może być wyrażona przez stosunek liczby zapotrzebowań zrealizowanych z magazynu do całkowitej liczby zapotrzebowań.

W procesie produkcji pojawia się:

- udział wadliwej produkcji – wartość wyrobów wadliwych w stosunku do łącznej wartości wyrobów,
- udział przestojów w produkcji – stosunek przestojów w produkcji do czasu pracy ogółem,
- przeciętny okres trwania zatrzymań,
- częstotliwość wypadków i uszkodzeń.

W procesie dystrybucji powtarzają się wskaźniki:

- gotowości dostawczej,
- pewności (niezawodności) dostaw,
- udziału nieprawidłowych/opóźnionych dostaw,
- udziału zwrotów dostaw,
- udziału powtórnych dostaw,
- udziału reklamowanych dostaw wyrobów.

Tabela 3.4. Wskaźniki dotyczące czasu i jakości dostaw

Lp.	Określenie wskaźnika	Wzór obliczenia wskaźnika	J.m.
1	Przeciętny czas trwania dostawy – cykl dostawy	Łączny czas dostaw/liczba dostaw	h
2	Czas realizacji zamówienia	Czas od przyjęcia zlecenia do wysłania dostawy	dni
3	Wartość dostarczonych wadliwych materiałów	Wartość wadliwych materiałów + wartość wadliwych opakowań + wartość wadliwych materiałów pomocniczych	zł
4	Udział wadliwych dostaw materiałów	$(\text{liczba wadliwych dostaw materiałów}/\text{łączna liczba dostaw surowców}) \times 100$	%
5	Udział reklamowanych dostaw materiałów	$(\text{liczba reklamowanych dostaw materiałów}/\text{łączna liczba dostaw materiałów}) \times 100$	%
6	Opóźnienia dostaw materiałów	Liczba dni opóźnionych dostaw materiałów + liczba dni opóźnionych dostaw opakowań + liczba dni opóźnionych dostaw materiałów pomocniczych	dni
7	Udział opóźnionych dostaw materiałów	$(\text{liczba opóźnionych dostaw materiałów}/\text{łączna liczba dostaw materiałów}) \times 100$	%
8	Udział zwrotów dostaw materiałów	$(\text{liczba zwróconych dostaw materiałów}/\text{łączna liczba dostaw materiałów}) \times 100$	%
9	Niezawodność dostaw materiałów	$(\text{liczba terminowo dostarczonych dostaw materiałów}/\text{łączna liczba dostaw materiałów}) \times 100$	%
10	Udział wartościowy reklamowanych materiałów	$(\text{wartość reklamowanych materiałów}/\text{łączna wartość materiałów}) \times 100$	%
11	Elastyczność dostaw	$(\text{liczba spełnionych życzeń specjalnych}/\text{łączna liczba życzeń specjalnych}) \times 100$	%
12	Średnia wartość zamówienia	$(\text{wartość zamówień zrealizowanych}/\text{liczba zamówień zrealizowanych}) \times 100$	zł

W fazie transportu ocenia się, m.in.:

- niezawodność transportu – stosunek liczby terminowo wykonanych przewozów do liczby przewozów ogółem,
- udział uszkodzeń – stosunek liczby uszkodzonych jednostek transportowych do liczby przewiezionych jednostek transportowych ogółem.

W zakresie gospodarki magazynowej, pojawiające się błędy są oceniane m.in. przez:

- wskaźnik bezbłędnych dostaw,
- wskaźnik bezbłędnie wystawionych faktur,
- wskaźnik zamówień zrealizowanych z opóźnieniem,
- wskaźnik zamówień zrealizowanych w niepełnym wymiarze asortymentowym,
- wskaźnik reklamowanych dostaw.

Wybrane wskaźniki charakteryzujące, zgodnie z przyjętym systemem pojęć w [226], niezawodność (gotowość, dokładność, precyzję) systemu logistycznego zestawiono w tabeli 3.4.

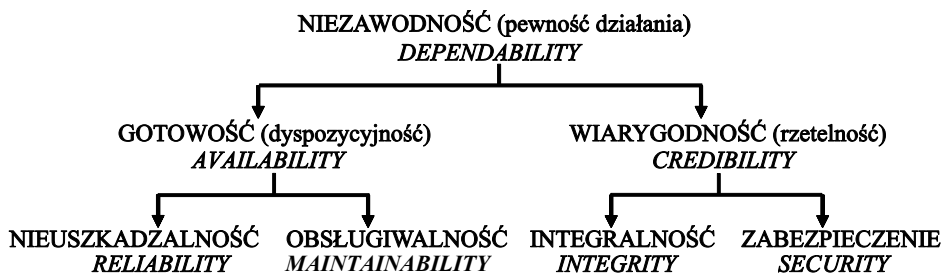
4. KONCEPCJE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU

4.1. PODSTAWOWE DEFINICJE

Analiza koncepcji logistycznych (np. [21, 24, 134, 165, 183]) wyraźnie wskazuje na konieczność określenia pojęcia niezawodności systemu logistycznego.

W ujęciu technicznym niezawodność systemu (obiektu technicznego) jest definiowana jako [191] zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi. Stwierdza się, że termin niezawodność powinien być używany tylko do ogólnego, nieliczbowego opisu.

Według normy [75] niezawodność jest postrzegana na dwa sposoby: jako właściwość opisywana w kategoriach probabilistycznych (obejmuje zdarzenia i procesy losowe) i w kategoriach deterministycznych. Schemat hierarchii w tym ujęciu pojęć pokazano na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Schemat hierarchii pojęć według normy IEC 1069 [21]

W kategoriach probabilistycznych definiuje się gotowość obiektu i związane z nią nieuszkodzalność i obsługiwalność.

Gotowość [191] oznacza zdolność obiektu do utrzymywania się w stanie umożliwiającym wypełnianie wymaganych funkcji w danych warunkach, w danej chwili lub w danym przedziale czasu, po założeniu, że są dostarczone wymagane środki zewnętrzne. Zakłada się, że środki zewnętrzne inne niż środki obsługi nie wpływają na

gotowość obiektu. Podstawową miarą gotowości [229] jest funkcja gotowości $K_g(t)$ – prawdopodobieństwo, że obiekt O jest w stanie spełniać wymaganą funkcję w danych warunkach, w danej chwili, po założeniu, że zostały dostarczone wymagane środki zewnętrzne:

$$K_g(t) = P(O \text{ zdalny w chwili } t) \quad (4.1)$$

Szerzej miarę gotowości obiektu omówiono w rozdziale 5. Jest ona powiązana funkcyjnie z miarą niezakładzalności i obsługiwalności.

Nieuszkodzalność jest rozumiana [191] jako zdolność obiektu do poprawnego działania nieprzerwanego uszkodzeniem. Oznacza więc zdolność obiektu do wypełniania wymaganych funkcji w danych warunkach w danym przedziale czasu. Zakłada się, że na początku danego przedziału czasu obiekt jest w stanie zdalności – może poprawnie funkcjonować. Najczęściej niezakładzalność wyraża się przez prawdopodobieństwo [229]:

$$R(t) = P(O \text{ zdalny w przedziale czasu } [0, t]) \quad (4.2)$$

Obsługiwalność jest to [191] zdolność obiektu do utrzymania lub odtworzenia w danych warunkach eksploatacji stanu, w którym może on wypełniać wymagane funkcje, po założeniu, że obsługa jest przeprowadzona w ustalonych warunkach z zachowaniem ustalonych procedur i środków. Zapewnienie środków obsługi wiąże się ze zdolnością organizacji zajmującej się obsługą do zapewnienia w danych warunkach użytkowania i obsługiwanego, na żądanie, środków potrzebnych do obsługi obiektu dla danej polityki obsługi. Podstawową miarą obsługiwalności i zapewnienia środków obsługi [229] jest prawdopodobieństwo obsługi $M(t)$ – prawdopodobieństwo wykonania w ustalonym przedziale czasu aktywnej obsługi obiektu eksploatowanego w określonych warunkach, po założeniu, że obsługa jest wykonana w ustalonych warunkach z zastosowaniem określonych metod i środków:

$$M(t) = P(O \text{ został naprawiony w przedziale czasu } [0, t]) \quad (4.3)$$

Zdeterminowane cechy niezawodności, jako zbiorowej właściwości systemu, opisują: wiarygodność, integralność i zdolność do zabezpieczenia [21]. Wiarygodność określa zdolność systemu do rozpoznania i sygnalizowania stanu systemu oraz zapobiegania pojawieniu się nieprawidłowego wymuszenia lub nieautoryzowanego dostępu. Integralność oznacza zdolność do prawidłowego działania (wykonywania zadań) w dowolnych warunkach otoczenia. Zabezpieczalność (*security*) dotyczy zdolności zapobiegania nieprawidłowym oddziaływaniom lub niedozwolonemu dostępowi do systemu.

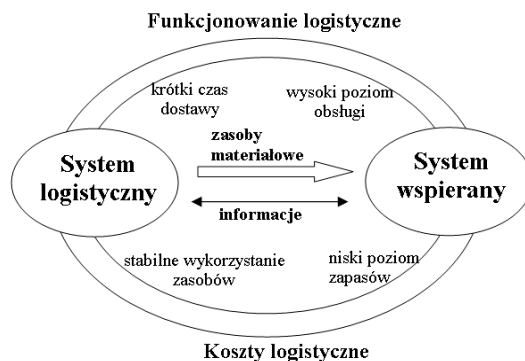
Podobny sposób rozumienia pojęcia niezawodności systemów w odniesieniu do realizacji zadań logistycznych zaprezentowano w pracy [135], przeciwstawiając niezawodności podatność na zakłócenia (*vulnerability*). System podatny na zakłócenia charakteryzuje się niskim stopniem realizacji zadań, co wyrażone być może przez brak zdolności do obsługi, brak dostępności i zmienność w pewnych okolicznościach, ze

względu na brak zabezpieczeń, niski poziom wytrzymałości i elastyczności. System niepodatny na zakłócenia charakteryzuje się wysokim stopniem realizacji zadań, co może być wyrażone przez zdolność do obsługi, dostępność, niezmienność w każdych warunkach i występuje dzięki odpowiedniemu zabezpieczeniu w razie uszkodzenia, dużej wytrzymałości (trwałości) i elastyczności.

Efektywność procesów logistycznych (podmiotów uczestniczących w łańcuchu logistycznym) polega na utrzymaniu równowagi pomiędzy: wzrostem popytu na zasoby podstawowe i wspierające, coraz krótszym czasem realizacji zadań logistycznych, a kontrolą kosztów w całym łańcuchu [37]. W literaturze dotyczącej problemów logistyki wojskowej, zadania w łańcuchu logistycznym nakierowane są na zapewnienie zasobów wspierających w okresie realizacji misji pokojowych oraz wojennych (np. [123]). Jednocześnie w obszarze funkcjonowania systemów technicznych realizacja procesu eksploatacji obiektu technicznego wymaga uwzględnienia funkcji wspierających przyjętego łańcucha logistycznego. Funkcja wspierająca może być definiowana jako [221] całokształt przedsięwzięć, które pozwalają na racjonalne zapewnienie niezbędnych zasobów wspierających, umożliwiających osiągnięcie i utrzymanie wymaganej gotowości operacyjnej systemu technicznego, uwzględniających uwarunkowania zewnętrzne i wewnętrzne wykonywanego zadania na całej długości łańcucha logistycznego, w tym wymagania dotyczące: ilości, jakości, rodzaju, czasu, oraz kosztów pozyskanych zasobów.

Zgodnie z przedstawioną definicją proces prawidłowego funkcjonowania łańcucha logistycznego zależy od przyjętego systemu wsparcia (rys. 4.2), którego podstawowym celem jest szybkie reagowanie na potrzeby systemu wspieranego [239].

Problematyka optymalizacji funkcjonowania łańcuchów logistycznych jest analizowana od około 20 lat (np. [31]). Zagadnienie funkcjonowania łańcucha logistycznego oraz optymalizacji realizowanych funkcji przede wszystkim obejmuje proces definiowania i wdrażania decyzji planistycznych. Na poziomie planowania strategicznego typowe decyzje obejmują: zagadnienia lokalizacji rejonów obsługi (np. magazynu centralnego, magazynów regionalnych), ocenę i wybór dostawców czy organizację transportu [137].



Rys. 4.2. Podstawowe cele systemu logistycznego
Źródło: Opracowanie na podstawie [242]

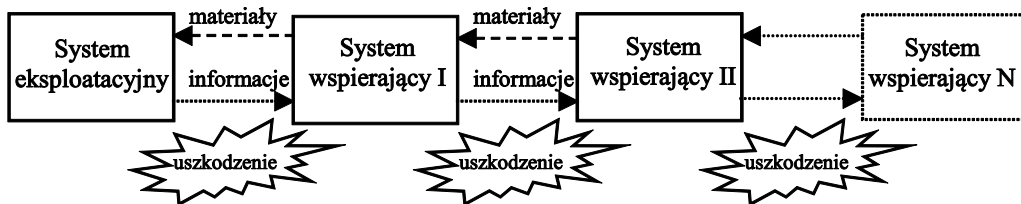
Jednocześnie, w literaturze teorii niezawodności można znaleźć kilka prac, dotyczących zagadnienia modelowania i oceny poziomu funkcjonowania systemów logistycznych, projektowanych dla wsparcia obiektów technicznych podlegających procesom obsługiwanym [236]. Opracowane modele ograniczone są jednak przede wszystkim do analizy procesu zaopatrzenia systemu technicznego w konieczne części wymienne (np. [27, 36]), po uwzględnieniu problemu zapewnienia niezbędnej liczby stanowisk obsługi/ekip remontowych (np. [69, 200, 210, 231, 232]), nie badając wpływu funkcjonowania innych elementów logistycznych na poziom niezawodności systemu wspieranego.

Inne zagadnienia omawianego obszaru, które wymagają dalszej analizy można wyróżnić m.in. w obszarze oceny źródeł dostaw, problemów zarządzania zapasami, uwzględnienia ograniczeń składowania zapasów oraz integracji zadań logistycznych z celami strategii obsługiwanego obiektów technicznych [137].

W rozważaniach logistycznych można wyróżnić dwa podstawowe pojęcia dotyczące stanów niezawodnościowych systemu wspierającego: zdalny do zrealizowania zadań, jakie stawia się systemowi logistycznemu, oraz stan niezdatności, który może doprowadzić do [123]:

- zakłócenia lub wręcz uniemożliwienia podjęcia realizacji bieżącego zadania logistycznego,
- niezdolności do podjęcia realizacji nowych zadań logistycznych.

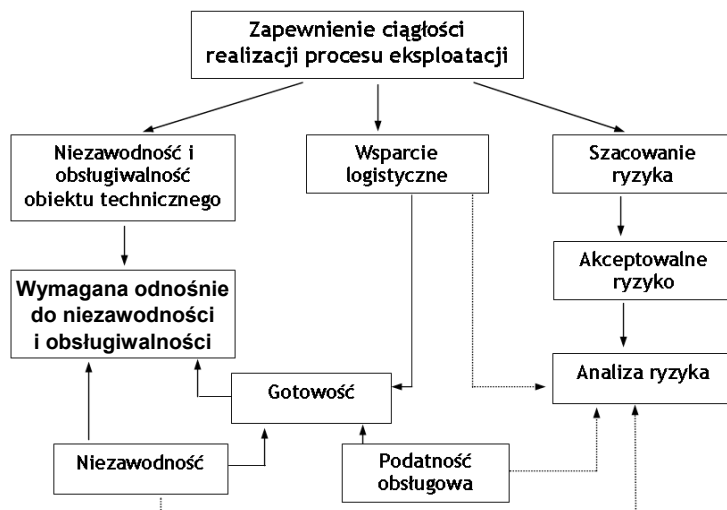
Uwzględnienie stanu zawodności systemu wspierającego definiuje nowe spojrzenie na sprawne i efektywne funkcjonowanie systemu podstawowego, które wymaga przeanalizowania zdolności systemu logistycznego do realizacji określonych zadań, w określonych warunkach i w określonym czasie, kiedy losowo do systemu zostanie zgłoszona potrzeba logistyczna – rysunek 4.3.



Rys. 4.3. Koncepcja systemu wsparcia systemu operacyjnego [165]

Bezbledna realizacja wymienionych zadań logistycznych determinuje prawidlowe funkcjonowanie systemu technicznego. Oczywiscie system wspierajacy I jest takze systemem technicznym i moze ulec uszkodzeniu – jego utrzymaniu sluzi jego system wspierajacy II itd. Na poziomie koncepcji sa to odpowiednio analogiczne problemy i warto rozwazac wspolprace systemu operacyjnego, ktorego niezawodnosc jest wspierana przez odpowiedni system logistyczny.

Relacje miedzy analizowanymi pojeciami, takimi jak: niezawodnosc, gotowosc oraz ryzyko przedstawiono na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Potrzeby realizacji zadań w eksploatacji systemu logistycznego
 Źródło: Opracowanie na podstawie [221]

Obecnie w literaturze zagadnienia nie ma jednoznacznej definicji niezawodności systemu logistycznego [164]. W logistyce cywilnej (biznesowej), niezawodność jest przede wszystkim odnoszona do problemu zapewnienia terminowego i niezakłóconego procesu dostawy zamówionych produktów (np. [226]). Znaczenie pojęcia niezawodności systemu w obszarze logistyki wojskowej jest z kolei definiowane jako [69] jego zdolność do zapewnienia gotowości wszelkich zasobów (np. transportowych, części wymiennych, wyposażenia wspierającego), niezbędnych w procesie realizacji zadań operacyjnych systemu wojskowego. Pojęcie niezawodności systemu wsparcia logistycznego w obszarze funkcjonowania systemu technicznego określono jako [236] zdolność systemu do niezakłóconej realizacji procesu wspierającego system techniczny w zakresie dostarczenia niezbędnych zasobów logistycznych (części wymiennych, personelu, wyposażenia itp.), w określonym przedziale czasu i ustalonych warunkach operacyjnych.

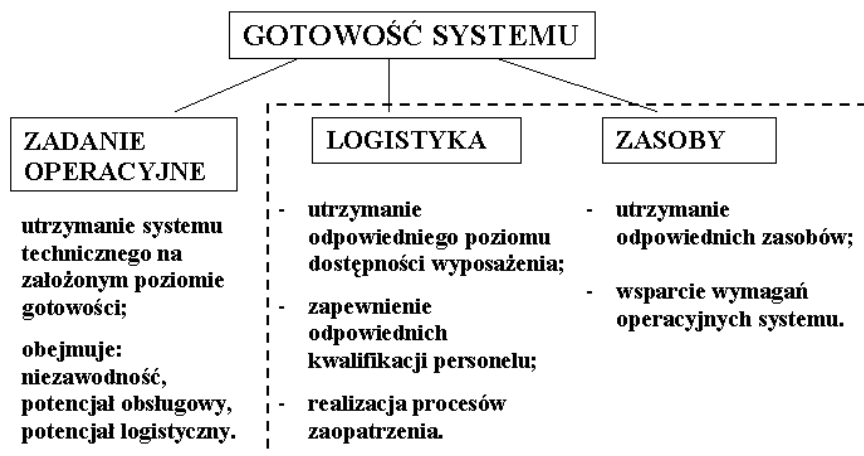
Podobnie niezawodność systemu logistycznego jest określana jako zdolność do zaspokojenia zapotrzebowania klienta końcowego przez łańcuch dostaw, w którym proces przepływu materiałów niezakłócony jest możliwą zawodnością dostawcy (ogniwa łańcucha). Z kolei w pracy [242] niezawodność łańcucha logistycznego jest odniesiona bezpośrednio do jego zdolności do realizacji wymagań klienta.

Wszelkie zakłócenia w transferze zasobów materiałowych w łańcuchu logistycznym mają negatywny wpływ na koszty operacyjne oraz miarę logistycznej obsługi klienta. Ponadto mogą być również źródłem stanu jego niezdatności w wyniku [29]:

- zastosowania niewłaściwych struktur organizacyjnych,
- zawodności personelu,
- zawodności przepływu informacji.

Pojawia się zatem problem definicji podstawowej miary niezawodności funkcjonowania systemu i łańcucha logistycznego. Biorąc pod uwagę zagadnienie niezawodności systemu wspierającego, gotowość systemu można rozpatrywać w odniesieniu do trzech aspektów jego funkcjonowania [165] (rys. 4.5):

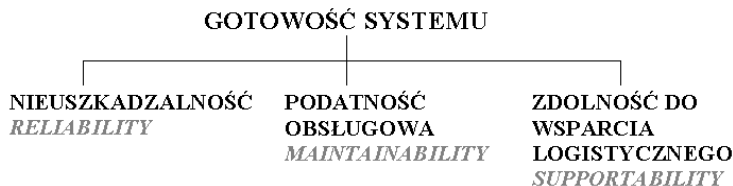
- utrzymania systemu realizującego zadania operacyjne na wymaganym poziomie niezawodności,
- utrzymania odpowiedniego poziomu dostępności wyposażenia, personelu, materiałów,
- utrzymania odpowiednich zasobów i wsparcia wymagań operacyjnych systemu.



Rys. 4.5. Wymagania dotyczące gotowości systemu logistycznego

Zródło: Opracowanie na podstawie [125]

Podstawowe definicje gotowości systemu odnoszą się do zagadnienia realizacji zadania operacyjnego. W tym kontekście gotowość systemu bazuje na określeniu relacji pomiędzy trzema podstawowymi charakterystykami systemu technicznego (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Zależność pomiędzy podstawowymi charakterystykami systemu

Zródło: Opracowanie na podstawie [125]

Gotowość charakteryzuje zdolność do terminowego podejmowania i pomyślnej realizacji zadań. Zgodnie ze schematem (rys. 4.6) zdolność obiektu do przebywania

w stanie operacyjnym, jak również do rozpoczęcia realizacji zadania w losowej chwili nadejścia zgłoszenia jest funkcją [180]:

- częstości występowania uszkodzenia, a w związku z tym i częstotliwości zapotrzebowania na realizację zadań logistycznych,
- częstotliwości realizacji obsługi prewencyjnej oraz czasu, jaki musi być przeznaczony na jej przygotowanie,
- czasu niezbędnego na wykrycie i usunięcie z systemu zakłóceń,
- stopnia wpływu opóźnień w obszarze wsparcia logistycznego na czas niezdatności systemu.

Jednocześnie w przypadku analizy funkcjonowania systemu wsparcia logistycznego, zdefiniowanie pojęcia gotowości musi obejmować znacznie większy zakres funkcji i procesów niż w przypadku oceny systemu technicznego. Jest to przede wszystkim związane ze znaczną liczbą elementów logistycznych, których niezawodne funkcjonowanie przyczynia się do osiągnięcia gotowości systemu technicznego.

W związku z tym przyjęto [165], że gotowość systemu logistycznego oznacza dostępność wszelkich niezbędnych zasobów w procesie eksploatacji systemu technicznego [42, 125]. Jednocześnie zasoby, w ujęciu ogólnym, są definiowane jako wszelkie elementy (w tym urządzenia, maszyny, części wymienne, wyposażenie dodatkowe, wspierające i kontrolno-pomiarowe), niezbędne do:

- wyposażenia,
- funkcjonowania,
- utrzymania,
- wsparcia

procesów podstawowych systemu technicznego.

Na poziom gotowości systemu logistycznego wpływają pewne grupy czynników związane m.in. z realizacją zadań operacyjnych czy podstawowymi charakterystykami i parametrami systemu logistycznego.

Po pierwsze informacja o przebiegu procesu podstawowego systemu wspieranego umożliwia identyfikację stanów eksploatacji i niezawodności, w jakich może przebywać ten system oraz ustalenie reguł rządzących ich kolejnymi zmianami, co z kolei ma znaczący wpływ na realizację zadań logistycznych. Jednocześnie wiąże się to z właściwym zaprojektowaniem systemu wspierającego pod kątem niezawodności i doboru charakterystyk podsystemów użytkowania i wsparcia.

Po drugie rozwiązania organizacyjne w obrębie samego systemu logistycznego decydują o poziomie jego gotowości przez definicję i kontrolowanie poziomu podstawowych parametrów tego systemu, do których należą m.in. [165]:

- poziom gotowości dostaw (organizacja, terminowość i niezawodność),
- dyspozycyjność niezbędnych części wymiennych, oprzyrządowania do wykonania bieżących napraw,
- efektywność procesów: pakowania, manipulowania, magazynowania i transportowania,

- jakość organizacji procesów administracyjnych (terminowość),
- efektywność pomiaru i kontroli konkretnych parametrów poszczególnych elementów systemu wsparcia logistycznego (niezawodność, właściwy wybór parametrów),
- niezawodność i pewność przepływu informacji.

Ponadto, bez względu na jakość wymienionych grup czynników, realizacja jakiegokolwiek zadania logistycznego nie byłaby możliwa bez zasobów wsparcia logistycznego, które obejmują przede wszystkim:

- dostępną infrastrukturę utrzymania i wsparcia,
- personel, stopień wykształcenia obsługi dysponującej umiejętnościami, oprzyrządowaniem i częściami wymiennymi,
- zapasy części wymiennych oraz niezbędne wyposażenie wspierające.

W związku z tym, że nie istnieje idealny system wsparcia logistycznego, który bez załóceń, w sposób natychmiastowy, realizowałby wszelkie potrzeby systemu technicznego, należy rozpatrzyć, jaka miara pozwoli na ocenę rzeczywistego poziomu gotowości systemu logistycznego.

Pojawia się potrzeba zdefiniowania zdolności systemu do wsparcia systemu operacyjnego. Taka właściwość jest nazywana w literaturze zagadnienia *supportability* (zdolność do wsparcia logistycznego/wspieralność). W pracy [145] jest ona definiowana jako zdolność systemu logistycznego osiąganą przez właściwą organizację procesów i infrastruktury logistycznej, do zapewnienia na odpowiednim poziomie dostępności/zdatności systemu przy założonych wymaganiach/warunkach wykorzystania.

Niezawodność systemu technicznego, najogólniej charakteryzowana przez pojęcia: *logistics support* i *supportability*, rozumiana jest [165] jako zdolność systemu logistycznego, przez właściwą organizację procesów, i infrastruktury logistycznej, do zapewnienia na odpowiednim poziomie gotowości systemu technicznego dla założonych wymagań i warunków wykorzystania. Innymi słowy, jest to stopień, w którym charakterystyki systemu oraz planowane zasoby logistyczne spełniają wymagania systemu eksploatacji. W związku z tym system wspierający musi odznaczać się zdolnością do wsparcia potrzeb operacyjnych oraz zapewnienia wymaganej gotowości przez odpowiednią niezawodność oraz dostępność zaplecza wspierającego w całym cyklu istnienia systemu wspieranego, przy wymaganych, ustalonym poziomie kosztów.

Jednocześnie zdolność do wsparcia – *supportability* – jest mierzalną, przewidywalną oraz definiowalną charakterystyką systemu technicznego („projektowanie dla wsparcia” – *design for supportability*) oraz systemu logistycznego („projektowanie dla logistyki” – *design for logistics*).

Po uwzględnieniu perspektywy cyklu istnienia systemu/produktu (*Product/System Life Cycle*) definicja logistyki obejmuje [14, 15]:

- z perspektywy biznesowego ujęcia logistyki – zgodnie z definicją CLM – czynności związane z procesem produkcyjnym dotyczące: wsparcia fizycznego, przepływów materiałowych, magazynowania, transportowania i fizycznej dystrybucji produktów do klienta (nabywcy końcowego),

- w kontekście logistyki wojskowej („*defense logistics*”) – logistykę rozpatrywaną z perspektywy systemu i obejmuje niezbędną infrastrukturę utrzymaniową i wspierającą, po uwzględnieniu wysokiego poziomu integracji wszystkich elementów.

W tym kontekście, uwzględniając zalety obu podejść, zaproponowano [14] definicję logistyki systemu technicznego w cyklu istnienia tego systemu, obejmującą fazę jego eksploatacji jako podejście obejmujące wsparcie projektowania, dystrybucji oraz operacji utrzymania systemu. Logistyka w tym podejściu obejmuje planowanie i projektowanie systemu dla wsparcia (*design for supportability*), produkcję i dystrybucję systemów, utrzymanie oraz wsparcie systemu w fazie operacyjnej (eksploatacyjnej), jak również wsparcie w fazie bezpiecznego wycofania zasobów z eksploatacji. Definicja ta odnosi się z jednej strony do cyklu istnienia systemu, a z drugiej strony obejmuje zarówno cechy logistyki komercyjnej, jak i wojskowej.

Innymi słowy logistyka systemu technicznego odpowiada za spełnienie wymagań (operacyjnych, obsługi itp.) systemu technicznego dzięki wykorzystaniu planowanych zasobów logistycznych oraz charakterystyk systemu wspierającego. Dzięki integracji funkcji zarządzania oraz organizacji procesów wspierających i infrastruktury logistycznej ostatecznie pozwala na niezawodną i efektywną realizację zadania eksploatacyjnego.

4.2. MIARY NIEZAWODNOŚCI

Każdy system logistyczny jest zawsze rozwiązaniem indywidualnym, uwzględniającym specyfikę podmiotowo-przedmiotową oraz uwarunkowania otoczenia, co z kolei ma bezpośredni wpływ na proces oceny jego funkcjonowania.

W literaturze problem pomiaru realizacji podstawowych zadań operacyjnych systemu logistycznego jest ujmowany w zróżnicowany sposób. Koncepcje systematyki miary oceny różnią się między sobą:

- zakresem i stopniem szczegółowości,
- kryteriami podziału,
- rodzajem, zakresem oraz obszarem oddziaływania mierników i wskaźników.

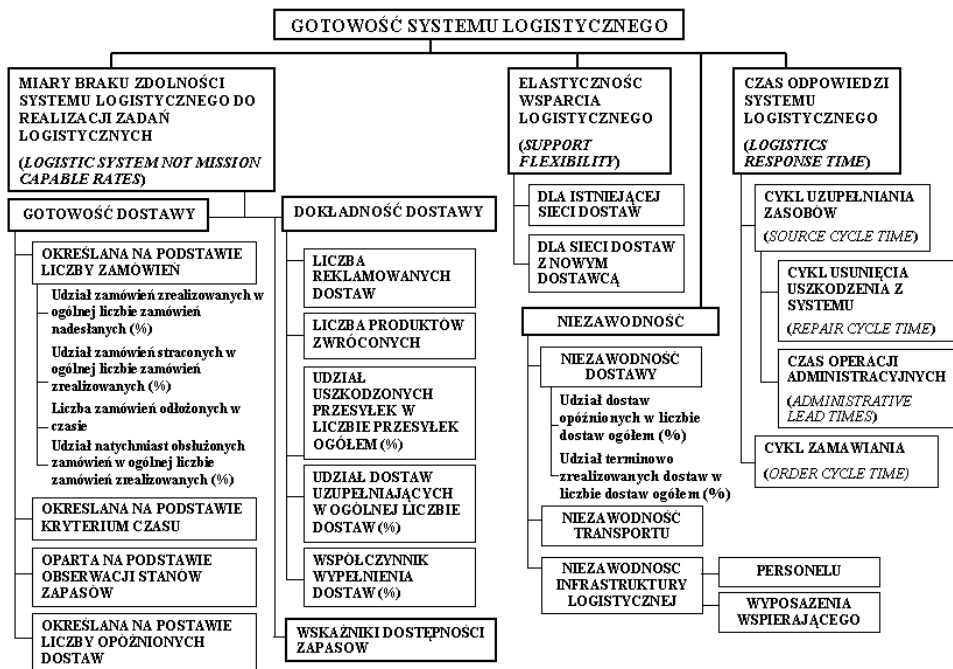
W tradycyjnym podejściu celem organizacji jest osiągnięcie wysokiego stopnia realizacji obsługi dostawy. Determinuje on charakter dokonywanych analiz, które przede wszystkim obejmują obszary kosztów logistycznych oraz obsługi dostaw [226]. Uzyskane wyniki są zwykle uznawane za definiujące w dostatecznym stopniu efektywność i niezawodność realizacji zadań wspierających. Jednocześnie niezawodność systemu wspierającego jest odnoszona do stopnia zadowolenia klienta z poziomu realizacji jego zamówienia.

Z kolei w podejściu do logistyki, jako działalności wspierającej procesy operacyjne systemu technicznego, główny nacisk analizy nakierowany jest na:

- pomiar i ocenę zdolności operacyjnej systemu (np. [126]),
- określenie poziomu zdadności infrastruktury logistycznej (np. [180]).

W rezultacie, nie odrzucając tradycyjnej miary oceny gotowości oraz uwzględniając nowe uwarunkowania wynikające ze zmiany podejścia do celu systemu logistycznego, możliwe było zaproponowanie miary gotowości systemu wspierającego [165] (rys. 4.7).

Proponowany podział wskaźników gotowości systemu logistycznego bazuje na wykorzystaniu czterech podstawowych miar.



Rys. 4.7. Podstawowe miary gotowości systemu logistycznego [165]

Pierwszą grupą wymienionych wskaźników są tzw. współczynniki braku zdolności systemu logistycznego do realizacji zadań wspierających (logistic system not mission capable rates), określające procent czasu, w którym system logistyczny nie może realizować zadań wspierających z powodu braku części wymiennych i/lub braku dostępnego wyposażenia, niezbędnego do przeprowadzenia procesu obsługi [126]. Poziom danych wskaźników kształtują przede wszystkim parametry podsystemu zaopatrzenia (organizacja dostaw części wymiennych), gospodarki magazynowej (zarządzanie zapasami) oraz podsystemu dystrybucji.

Kolejnym miernikiem jest elastyczność wsparcia logistycznego (*support flexibility*). Pierwotnie wskaźnik ten był definiowany jako czas niezbędny do uzyskania 20% wzrostu produkcji. Obecnie miernik ten określa czas, jaki jest niezbędny do osiągnię-

cia nieplanowanej zmiany w systemie wsparcia logistycznego, wywołanej zmianą parametrów funkcjonowania systemu technicznego lub sieci dostaw zasobów wspierających. Najczęściej w obszarze tym definiuje się wskaźniki [126]:

- elastyczność wsparcia dla istniejącej sieci dostawców – odzwierciedlająca poziom czasu reakcji na zwiększone zapotrzebowanie na zasoby, realizowane przez istniejącą sieć dostawców,
- elastyczność sieci dostaw z nowym dostawcą – definiowana jako czas niezbędny do pozyskania nowego dostawcy w celu zapewnienia zaopatrzenia w niezbędne zasoby.

Trzecią miarą gotowości systemu logistycznego jest niezawodność, określana jako zdolność systemu do – nieprzerwanej zakłóceniem – realizacji zadań wspierających.

Zagadnienie to w systemie logistycznym obejmuje przede wszystkim:

- niezawodność dostawy – definiowaną jako prawdopodobieństwo dotrzymania ustalonych terminów i zgodność dostawy z zamówieniem,
- niezawodność transportu – określaną jako prawdopodobieństwo dostarczenia zamówienia terminowego i niezakłóconego uszkodzeniami,
- niezawodność infrastruktury logistycznej – obejmującą parametry pracy personelu oraz wyposażenia wspierającego (urządzenia, narzędzia, wyposażenie kontrolno-pomiarowe).

Ostatnią analizowaną miarą jest czas odpowiedzi systemu logistycznego (*logistics response time*). Wskaźnik ten definiuje czas, jaki jest niezbędny do realizacji procesu wspierającego – od chwili, w której została zidentyfikowana potrzeba logistyczna, do chwili jej zrealizowania.

Zwykle wskaźnik ten obejmuje:

- czas niezbędny na zaopatrzenie systemu w nowe obiekty,
- czas dostawy z magazynu do miejsca realizacji obsługi,
- czas niezbędny na zapewnienie m.in. wymaganego wyposażenia wspierającego i kontrolno-pomiarowego oraz odpowiedniego personelu.

Przedstawione podstawowe miary gotowości pozwalają na ocenę funkcjonowania systemu logistycznego w odniesieniu do systemu wspieranego i jego procesów.

4.3. PRZYKŁAD OCENY GOTOWOŚCI SYSTEMU LOGISTYCZNEGO

W procesie realizacji zadań logistycznych może pojawić się wiele problemów. Wpływ tych zakłóceń na poziom gotowości odzwierciedlają uzyskane wyniki oceny jej

podstawowej miary dla wybranych przedsiębiorstw. Analizie poddano cztery przedsiębiorstwa oznaczone kodami [165]:

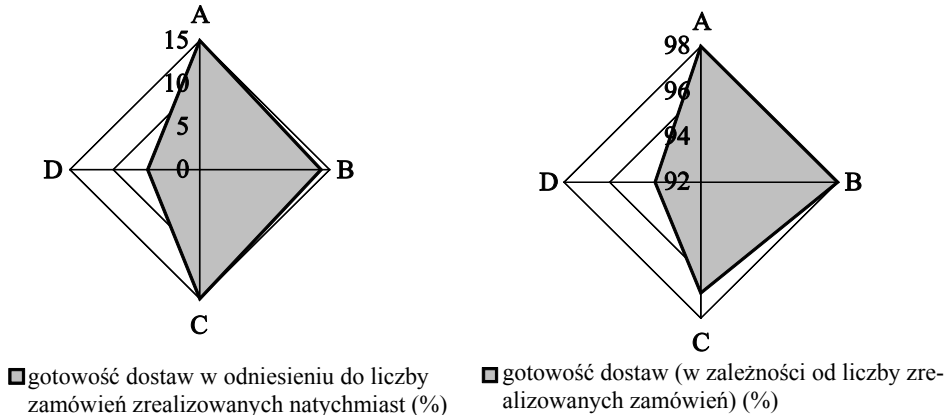
- A – przedsiębiorstwo produkcyjne z branży meblarskiej,
- B – firma z branży TSL,
- C – firma usługowa (dystrybutor wyrobów biurowych),
- D – przedsiębiorstwo produkcyjne z branży AGD.

Na podstawie analizy rozwiązań organizacyjnych oraz analizy otoczenia systemów wspierających wymienionych firm możliwe było zdefiniowanie parametrów, które określają gotowość logistyczną. Uzyskane wyniki (2004 r.) obejmują poziom podstawowych wskaźników w tym obszarze.

Dokumentacja, na podstawie której możliwe było oszacowanie podstawowych wskaźników gotowości systemu logistycznego, obejmowała:

- raporty dotyczące: bieżących stanów magazynowych, realizowanej sprzedaży, rotacji zapasów, przepływu produktów między magazynami,
- szczegółowe prognozy popytu,
- faktury wystawiane w chwili przyjęcia zamówienia,
- plany produkcji, planowane zdolności produkcyjne,
- raporty o realizowanych zleceniach transportowych.

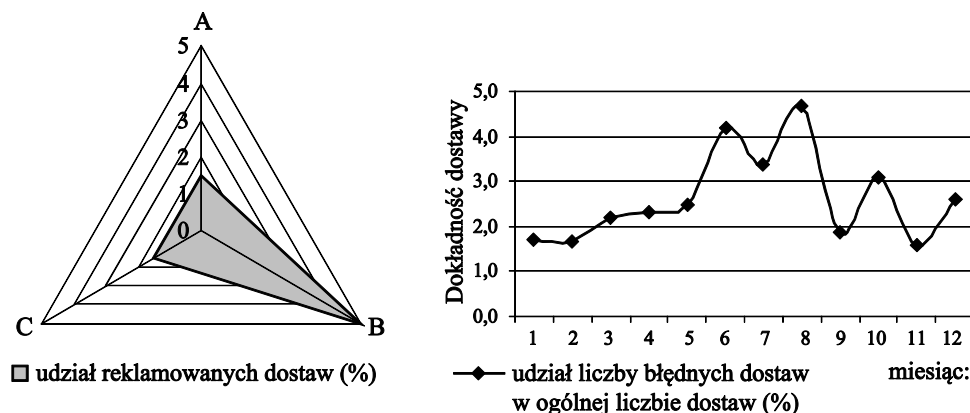
Przykłady oszacowania podstawowych wskaźników gotowości zostały przedstawione na rysunkach 4.8–4.10.



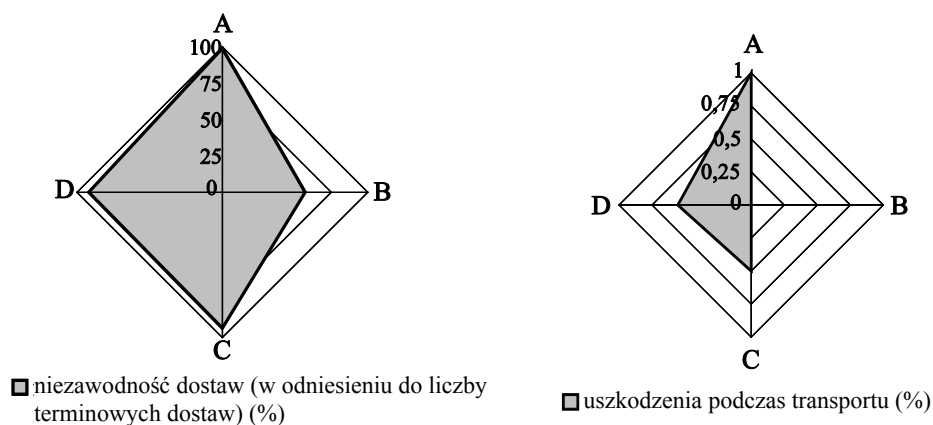
Rys. 4.8. Wartości wskaźnika gotowości dostaw dla analizowanych przedsiębiorstw

Przedstawione przykłady oszacowania gotowości systemu logistycznego wskazują na pracę w zakresie identyfikacji elementów systemu wsparcia logistycznego, odpowiedzialnych za realizację zadań logistycznych oraz miarę oceny ich funkcjonowania. Tradycyjnie przedsiębiorstwa analizują możliwość pojawienia się np. uszkodzenia czy opóźnienia dostawy, ponieważ ich wpływ na poziom realizacji zamówienia klienta jest

niezaprzeczalny i znany. Natomiast badania możliwości pojawienia się uszkodzenia systemu logistycznego i jego wpływ na poziom gotowości systemu wspieranego są w rzeczywistych systemach pomijane.



Rys. 4.9. Wartości wskaźnika dokładności dostaw dla analizowanych przedsiębiorstw



Rys. 4.10. Wartości wskaźników niezawodności dostaw

Niechęć firm do oceny zdolności funkcjonalnej i zadaniowej infrastruktury logistycznej jest m.in. związana z koniecznością pozyskiwania wielu dodatkowych informacji, które do tej pory nie były zwykle gromadzone w systemach, jak parametry:

- pracy personelu,
- pracy wyposażenia wspierającego,
- procesu obsługiwanego wspierającego.

W rezultacie koszty gromadzenia wiarygodnych informacji i przesyłania danych w znaczący sposób wzrastają.

5. MODELE NIEZAWODNOŚCI ELEMENTU TECHNICZNEGO

Przedstawiona w rozdziale 4 koncepcja niezawodności systemu logistycznego wykorzystuje dobrze opracowane pojęcia dotyczące niezawodności systemu technicznego, a modelowanie niezawodności elementów i systemów logistycznych wymaga odniesienia się do znanych modeli niezawodności obiektów technicznych. Na poziomie złożoności elementu systemu rozważa się w teorii niezawodności dwa modele: model niezawodności elementu nieodnawialnego oraz model niezawodności elementu odnawialnego.

5.1. MODEL NIEZAWODNOŚCI ELEMENTU NIEODNAWIALNEGO

Przez niezawodność obiektu rozumie się jego zdolność do wykonania określonego zadania. Wykonanie zadania polega na poprawnym spełnieniu zadanych funkcji w określonych warunkach eksploatacji i w określonym czasie. Jeżeli t oznacza czas pracy obiektu, Φ – funkcję realizowaną przez obiekt, κ – warunki eksploatacji, to zadanie, które obiekt ma wykonać można zapisać [89] za pomocą uporządkowanej trójki (t, Φ, κ) . Dla poszczególnych zadań obiektu można ustalić zbiór wymagań ω_ϕ dla cech obiektu, których spełnienie jest warunkiem koniecznym i wystarczającym poprawnej realizacji funkcji Φ .

Kryterium poprawności spełniania funkcji Φ może być:

- dwuwartościowe – mówimy wówczas o obiektach dwustanowych i rozróżniamy stan zdatności i stan niezdatności obiektu,
- wielowartościowe – tak opisane obiekty nazywa się wielostanowymi w sensie niezawodności.

Najczęściej miarą niezawodności obiektu ze względu na wykonywane zadanie jest prawdopodobieństwo wykonania danego zadania. Jeżeli $A(\tau, \omega_\phi, \kappa)$ oznacza [90] zdarzenie polegające na tym, że obiekt jest zdalny w chwili τ przy danym zbiorze cech

obiektu ω_ϕ i w danych warunkach eksploatacji κ , to obiekt wykona zadanie określone trójką (t, ω_ϕ, κ) , jeżeli zajdzie zdarzenie $A(\tau, \omega_\phi, \kappa)$ dla każdego τ z przedziału $[0, t]$. Wówczas miarą niezawodności jest funkcja:

$$R = R(t, \omega_\phi, \kappa) = P\{A(\tau, \omega_\phi, \kappa); 0 \leq \tau \leq t\} \quad (5.1)$$

Jeżeli R_0 oznacza niezawodność początkową obiektu – prawdopodobieństwo tego, że w chwili rozpoczęcia zadania ($\tau = 0$) obiekt jest zdalny, przy czym:

$$R_0 = P\{A(0, \omega_\phi, \kappa)\}$$

to:

$$R = R_0 R(t)$$

gdzie:

$$R(t) = P\{A(\tau, \omega_\phi, \kappa); 0 \leq \tau \leq t \mid A(0, \omega_\phi, \kappa)\} \quad (5.2)$$

prawdopodobieństwo, że obiekt zdalny w chwili rozpoczęcia zadania wykona to zadanie. Funkcja $R(t)$ jest nazywana funkcją niezawodności.

Od chwili rozpoczęcia wykonywania zadania przez obiekt aż do chwili jego uszkodzenia jest to czas poprawnej pracy analizowanego obiektu i najczęściej oznacza się jako T . Jest on zmienną losową o rozkładzie prawdopodobieństwa zależnym od właściwości obiektu oraz od warunków eksploatacji κ i ustalonego zbioru cech zdalności ω_ϕ . Modelując niezawodność elementu technicznego, można założyć, że na początku wykonywania zadania obiekt jest zdalny ($R(0) = 1$), a warunki eksploatacji κ i zbiór wymagań ω_ϕ są ustalone. Wówczas:

$$R(t) = P(T > t; \omega_\phi, \kappa) = 1 - F(t) \quad (5.3)$$

gdzie: zdarzenie $T > t$ oznacza, że obiekt zdalny w chwili rozpoczęcia pracy jest zdalny w każdej chwili τ z przedziału $(0, t]$.

Funkcja $F(t)$ jest dystrybuantą rozkładu prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy T (funkcją zawodności):

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (5.4)$$

Z założenia o różniczkowalności dystrybuanty $F(t)$ czasu poprawnej pracy T wynika, że funkcja niezawodności jest różniczkowalna i ma pochodną:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \quad (5.5)$$

przy czym $f(t)$ jest funkcją gęstości prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy T .

Oczywiście:

$$F(t) = \int_0^t f(u) du \quad (5.6)$$

oraz

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (5.7)$$

Wartość oczekiwana czasu poprawnej pracy T jest często oznaczana jako MTTF i wynosi:

$$\text{MTTF} = E[T] = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - F(t)) dt \quad (5.8)$$

Pozostałe charakterystyki zmiennej losowej T wynoszą:

- wariancja:

$$\text{var} T = E[T^2] - (E[T])^2 = \text{var} T = 2 \int_0^{\infty} t R(t) dt - \left\{ \int_0^{\infty} R(t) dt \right\}^2 \quad (5.9)$$

- współczynnik zmienności:

$$v = \frac{\sqrt{\text{var} T}}{E[T]} \quad (5.10)$$

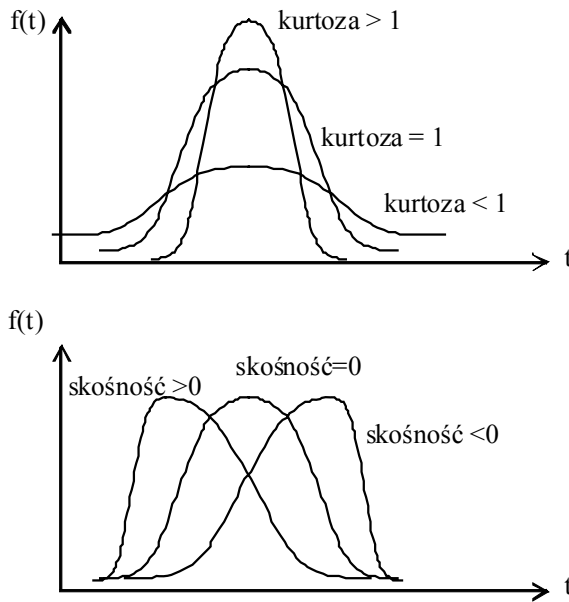
- mediana $M_e[T]$:

$$\int_{M_e[T]}^{\infty} f(t) dt = \frac{1}{2} = \int_0^{M_e[T]} f(t) dt \quad (5.11)$$

- wartość modalna $M_o[T]$:

$$M_o[T] = t \mid \max [f(t)] \quad (5.12)$$

- wskaźniki skośności i kurtozy – rys. 5.1.



Rys. 5.1. Interpretacja graficzna wskaźników skośności i kurtozy

Często wykorzystywaną miarą niezawodności jest funkcja intensywności uszkodzeń oznaczana jako $\lambda(t)$. Jest ona rozumiana jako warunkowa gęstość czasu poprawnej pracy T . Prawdopodobieństwo warunkowe dotyczy uszkodzenia obiektu w przedziale czasu $(t, t + \Delta t)$ pod warunkiem, że do chwili t obiekt pracował poprawnie (nie uszkodził się). Wówczas:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \quad (5.13)$$

oraz:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{d \ln R(t)}{dt} \quad (5.14)$$

Dla $R(0) = 1$ otrzymuje się:

$$R(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right], \quad (t > 0) \quad (5.15)$$

oraz:

$$f(t) = \lambda(t) \exp \left[- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right], \quad (t > 0) \quad (5.16)$$

nazywane równaniami Wienera.

Szczególne znaczenie w modelowaniu niezawodności elementu ma przypadek, w którym intensywność uszkodzeń jest stała, nie zależy od upływu czasu eksploatacji: $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. Wówczas funkcja niezawodności wynosi:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5.17)$$

a średni czas do uszkodzenia jest równy:

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \quad (5.18)$$

Jak widać niezawodność elementu jest określona przez funkcję intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$. W przypadku $\lambda(t) = \lambda$ rozkład czasu poprawnej pracy jest opisany wykładniczym rozkładem prawdopodobieństwa. W przypadku gdy funkcja intensywności uszkodzeń nie jest stała, rozkład czasu poprawnej pracy można aproksymować innymi rozkładem prawdopodobieństwa, np. rozkładem normalnym, logarytm-normalnym, gamma, Weibulla i innym [143]. Równania (5.8) i (5.9) dotyczą sytuacji, w której obiekt był nowy w chwili $t = 0$. W niektórych zastosowaniach istotna jest znajomość prawdopodobieństwa poprawnej pracy w przedziale czasu $(0, t]$, pod warunkiem, że obiekt pracował już poprawnie w przedziale czasu x_0 przed chwilą $t = 0$. Taka wielkość jest oznaczana $R(t, x_0)$ [12], a jej wartość można obliczyć ze wzoru:

$$R(t, x_0) = P(\tau > t + x_0 | \tau > 0) = \frac{R(t + x_0)}{R(x_0)} = \exp - \int_{x_0}^{t+x_0} \lambda(x) dx \quad (5.19)$$

Dla $\lambda(t) = \lambda$ równanie (5.11) redukuje się do równania (5.9), co świadczy o braku pamięci procesu w przypadku stałej intensywności uszkodzeń.

5.2. NIEZAWODNOŚĆ ELEMENTU ODNAWIALNEGO

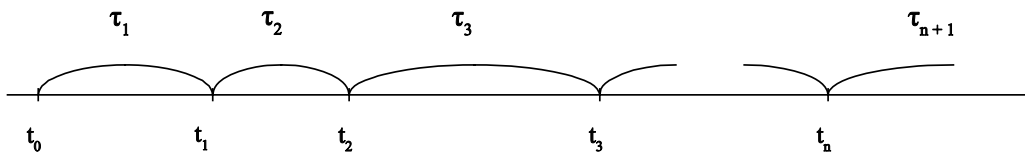
W modelu niezawodności elementu odnawialnego przyjmuje się, że po uszkodzeniu element podlega odnowie, która może polegać na naprawie (regeneracji) elementu

lub jego wymianie na nowy. Niezależnie od sposobu wykonania odnowy przyjmuje się, że element po odnowie ma takie same właściwości jak przed uszkodzeniem (charakteryzuje się takim samym potencjałem eksploatacyjnym). Mówi się w takim przypadku o pełnej odnowie.

Odnowa w sensie eksploatacyjnym jest procesem zachodzącym w czasie i polega na przywróceniu elementowi stanu zdatności. Czas trwania odnowy można traktować w sposób względny i w teorii odnowy rozpatruje się modele odnowy z pomijalnym i niepomijalnym czasem odnowy. Przyjęcie założenia o pomijalności czasu odnowy możliwe jest w sytuacjach, gdy czas odnowy jest znacznie krótszy od okresów między uszkodzeniami $\theta \ll \tau$. Oznacza to natychmiastową odnowę elementu po uszkodzeniu (odnowa z zerowym czasem odnowy).

5.2.1. MODEL PROCESU ODNOWY ELEMENTU Z POMIJALNYM CZASEM ODNOWY

Jeżeli czas odnowy elementu jest pomijalny, to proces odnowy jest ciągiem chwil uszkodzenia danego elementu. Zakłada się, że element rozpoczyna pracę w chwili t_0 . Po przepracowaniu okresu τ_1 element ulega uszkodzeniu i zostaje natychmiast poddany odnowie (wymianie na nowy) w chwili t_1 . Nowy element pracuje przez kolejny okres τ_2 , po czym w chwili t_2 ulega uszkodzeniu itd. (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Schemat procesu odnowy z pomijalnym czasem odnowy

Czas τ_i jest zmienną losową o określonym rozkładzie prawdopodobieństwa $F_i(t)$. W pokazanym schemacie (rys. 5.2) chwile odnowy elementu:

$$t_1 = \tau_1$$

$$t_2 = \tau_1 + \tau_2$$

$$t_3 = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$$

$$t_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$$

nazywane są procesem odnowy.

W analizie procesu odnowy zasadniczym zagadnieniem jest określenie liczby uszkodzeń (odnów) obserwowanych do chwili t . Zmienna losowa wyrażająca liczbę odnów oznaczona jest jako $\nu(t)$. Przyjmuje ona tylko wartości całkowite dodatnie. Jeśli $F_n(t)$ oznacza dystrybuantę zmiennej t_n (czas do wystąpienia n -tego uszkodzenia), to:

$$P\{\nu(t) \geq n\} = P\{t_n < t\} = P\{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n < t\} = F_n(t) \quad (5.20)$$

$$P_n(t) = P\{\nu(t) = n\} = F_n(t) - F_{n+1}(t) \quad (5.21)$$

W szczególnym przypadku $P_0(t) = 1 - F(t)$.

Rozkład zmiennej $\nu(t)$ ma ograniczone zastosowanie ze względu na trudności obliczeniowe związane z koniecznością wyznaczania splotu dystrybuanty $F_n(t)$. Większe znaczenie praktyczne może mieć oczekiwana liczba uszkodzeń (odnów) zaobserwowanych do chwili t , zwana funkcją odnowy $H(t)$:

$$\begin{aligned} H(t) &= E[\nu(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} nP_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} n[F_n(t) - F_{n+1}(t)] \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} nF_n(t) - \sum_{n=2}^{\infty} (n-1)F_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \end{aligned} \quad (5.22)$$

Pochodną funkcji odnowy jest gęstość odnowy $h(t)$ i wyraża ona średnią liczbę uszkodzeń w małej jednostce czasu, począwszy od chwili t . Gęstość odnowy można wyrazić szeregiem:

$$h(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \quad (5.23)$$

gdzie: $f_n(t) = F_n'(t)$

Dla wykładniczej postaci dystrybuanty $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ proces odnowy staje się procesem Poissona. Wówczas rozkład liczby uszkodzeń n w chwili t określony jest zależnością:

$$P_n(t) = P\{\nu(t) = n\} = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (5.24)$$

funkcja odnowy przyjmuje postać:

$$H(t) = \lambda t \quad (5.25)$$

a gęstość odnowy wynosi:

$$h(t) = \lambda \quad (5.26)$$

Stałość gęstości odnowy oznacza stacjonarność strumienia odnowy.

Proces Poissona jest też procesem, do którego zdąża suma wielu niezależnych procesów odnowy. Ma on jeszcze dwie ważne cechy o dużym znaczeniu praktycznym. Strumień Poissona jest określany jako pojedynczy i bez następstw (bez pamięci).

Pojedynczość strumienia oznacza, że prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektu w małym przedziale czasu dąży do 0:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} P\{v(t + \Delta t) - v(t)\} \geq 1 = 0 \quad (5.27)$$

Brak pamięci strumienia jest jego cechą mówiącą o braku wpływu wcześniejszych zdarzeń na zachowanie się strumienia w przyszłości. Liczba uszkodzeń w przyszłości zależy jedynie od długości rozpatrywanego przedziału czasu, a nie jego położenia na osi czasu.

Dla rozkładu normalnego dystrybuanta czasu do n -tego uszkodzenia ma postać:

$$F_n(t) = \Phi\left(\frac{t - nT_0}{\sigma\sqrt{n}}\right) \quad (5.28)$$

gdzie: $\Phi(x)$ jest dystrybuantą rozkładu normalnego

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

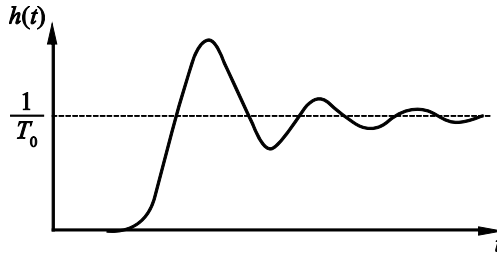
Funkcja odnowy przyjmuje wówczas postać:

$$H(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{t - nT_0}{\sigma\sqrt{n}}\right) \quad (5.29)$$

a gęstość odnowy wyraża się wzorem:

$$h(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi n}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(t-nT_0)^2}{2n\sigma^2}} dx \quad (5.30)$$

Funkcja gęstości odnowy ma wówczas postać oscylacji tłumionej wokół wartości $1/T_0$. Wskazuje to, że gdy $t \rightarrow \infty$, funkcja gęstości stabilizuje się i przyjmuje w nieskończoności wartość $1/T_0$ (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Przebieg funkcji gęstości odnowy dla normalnego rozkładu dystrybuanty czasu do uszkodzenia

Analityczna postać funkcji odnowy nie daje wielu możliwości praktycznego zastosowania, jednak jej asymptotyczne zachowania pozwalają na szacowanie kilku użytecznych charakterystyk [89]. Dla funkcji odnowy $H(t)$ prawdziwa jest zależność:

$$F(t) \leq H(t) \leq \frac{F(t)}{1 - F(t)} \quad (5.31)$$

z której wynika dla początkowego okresu, gdy $F(t) \ll 1$, przybliżona równość:

$$H(t) \approx F(t) \quad (5.32)$$

Dla elementów starzejących się, tzn. charakteryzujących się rosnącą monotonicznie funkcją intensywności

$$\lambda(t) \leq \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

otrzymuje się oszacowanie:

$$H(t) \leq \frac{t}{T_0} \quad (5.33)$$

Stąd dla dowolnej chwili t , dla elementów starzejących się, można zapisać:

$$\frac{t}{T_0} - 1 < H(t) \leq \frac{t}{T_0} \quad (5.34)$$

Asymptotyczne oszacowanie liczby uszkodzeń w długim przedziale czasu $(0, t)$ daje następującą zależność określającą z prawdopodobieństwem $(1 - \alpha)$ możliwą liczbę odnow $\nu(t)$:

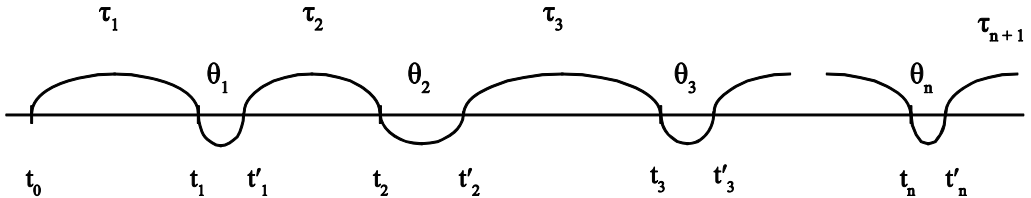
$$\frac{t}{T_0} - u_{\alpha/2} \frac{\sigma\sqrt{t}}{T_0^2} < v(t) < \frac{t}{T_0} + u_{\alpha/2} \frac{\sigma\sqrt{t}}{T_0^2} \quad (5.35)$$

gdzie: $u_{\alpha/2}$ jest kwantylem rozkładu normalnego rzędu $(1 - \alpha/2)$.

5.2.2. MODEL PROCESU ODNOWY ELEMENTU Z NIEPOMIJAŁNYM CZASEM ODNOWY

Założenie o natychmiastowej naprawie elementu nie zawsze może być spełnione ze względu na wartość stosunku czasu naprawy do czasu między naprawami. Przyjmuje się wówczas model odnowy elementu o niezerowym czasie odnowy. Czas odnowy jest tu traktowany jako sumaryczny czas wymagany do przywrócenia stanu zdatności, a w szczególności obejmuje on czas diagnozowania uszkodzenia, rzeczywisty czas naprawy oraz czas kontroli i przekazania elementu do użytkowania.

Element pracuje przez okres τ_1 , uszkodza się w chwili t_1 i poddany zostaje odnowie trwającej okres θ_1 . Cykl powtarza się, przy czym odnowiony element pracuje przez okres τ_2 i zostaje odnowiony w czasie θ_2 itd. (rys. 5.4).



Rys. 5.4. Schemat procesu odnowy ze skończonym czasem odnowy

W podanym schemacie $t_n = \tau_1 + \theta_1 + \tau_2 + \theta_2 + \dots + \tau_{n-1} + \theta_{n-1} + \tau_n$ oznacza chwile uszkodzenia elementu, a chwile $t'_n = \tau_1 + \theta_1 + \tau_2 + \theta_2 + \dots + \tau_{n-1} + \theta_{n-1} + \tau_n + \theta_n$ są chwilami odnowień. Podstawowa analiza modelu wymaga zrobienia kilku założeń:

- zakłada się niezależność zmiennych losowych τ_i i θ_i ,
- można rozpatrywać modele, w których każdy okres zdatności i każdy okres odnowy mają inny rozkład prawdopodobieństwa ($F_i(t) = P\{\tau_i < t\}$, $G_i(t) = P\{\theta_i < t\}$), ale dla uzyskania wyników możliwych do analizy należy przyjąć, że wszystkie okresy zdatności τ_i mają jednakowe rozkłady $F(t) = P\{\tau_i < t\}$, a czas naprawy θ_i ma rozkład $G(t) = P\{\theta_i < t\}$,
- w praktycznych zastosowaniach teorii odnowy ze skończonym czasem odnowy przyjmuje się często założenie o wykładniczym rozkładzie czasu między uszkodzeniami i czasu napraw.

Podstawową miarą oceny niezawodności elementu odnawialnego o skończonym czasie odnowy jest funkcja gotowości $K_g(t)$ (*point availability*) oznaczająca prawdo-

podobieństwo takiego zdarzenia A_n , że obiekt w dowolnej chwili t znajduje się w stanie zdatności ($A_n \mid t'_n < t < t_{n+1}$). Po założeniu niezależności zdarzeń A_n , otrzymano:

$$K_g(t) = \sum_{n=0}^{\infty} P(A_n) \quad (5.36)$$

Praktyczne zastosowanie ma stacjonarna wartość funkcji $K_g(t)$, do której zmierza wartość tej funkcji po czasie dążącym do nieskończoności.

Jeśli $T_1 = E[\tau_i]$, a $T_2 = E[\theta_i]$, to:

$$K_g = \lim_{t \rightarrow \infty} K_g(t) = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \quad (5.37)$$

Wartość współczynnika gotowości oznacza udział czasu przebywania obiektu w stanie zdatności w całym czasie eksploatacji.

W modelowaniu niezawodności elementów logistycznych bierze się pod uwagę zagadnienie rezerwy czasowej. Wówczas poza funkcją gotowości i współczynnikiem gotowości można korzystać także z innych miar gotowości, jak np. [12]:

- gotowość funkcjonalna (*mission availability*),
- gotowość zadaniowa (*work-mission availability*),
- gotowość operacyjna (*joint availability*).

Gotowość funkcjonalna $K_{gf}(T_o, \Theta_f)$ oznacza prawdopodobieństwo, że podczas trwania zadania (misji) o całkowitym czasie T_o każde uszkodzenie zostanie naprawione w przedziale czasu Θ_f . Zakłada się, że obiekt jest nowy w chwili $t = 0$. Gotowość funkcjonalna jest przydatna do zastosowań, w których dopuszcza się przerwę w użytkowaniu obiektu o czasie nie dłuższym niż Θ_f . Przy jej oszacowaniu bierze się pod uwagę wszystkie przypadki, w których wystąpiły dokładnie 0, 1, 2, ... uszkodzenia, przyjmując, że obiekt jest użytkowany do końca zadania (do osiągnięcia czasu T_o). Wówczas:

$$K_{gf}(T_o, \Theta_f) = 1 - F(T_o) + \sum_{n=1}^{\infty} (F_n(T_n) - F_{n+1}(T_o)) (G(\Theta_f))^n \quad (5.38)$$

gdzie: $F_n(T_o) - F_{n+1}(T_o)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia n uszkodzeń, $(G(\Theta_f))^n$ – prawdopodobieństwo, że każda naprawa będzie krótsza niż Θ_f .

Dla stałej intensywności uszkodzeń $\lambda(t) = \lambda$:

$$K_{gf}(T_o, \Theta_f) = e^{-\lambda T_o (1 - G(\Theta_f))} \quad (5.39)$$

Gotowość zadaniowa $K_{gz}(T_o, \Theta_s)$ określa prawdopodobieństwo, że suma czasów naprawy wszystkich uszkodzeń obiektu podczas realizacji zadania o czasie T_o jest mniejsza niż Θ_s . Wówczas, zakładając, że obiekt jest nowy, w chwili $t = 0$:

$$K_{gz}(T_0, \Theta_s) = 1 - F(T_0) + \sum_{n=1}^{\infty} (F_n(T_0) - (F_{n+1}(T_0))) (G_n(\Theta_s))^n \quad (5.40)$$

gdzie: $G_n(\Theta_s)$ – dystrybuanta sumy czasu n naprawy o rozkładzie czasu naprawy $G(t)$.

Wartość gotowości zadaniowej $K_{gz}(t-x, x)$ jest dystrybuantą łącznego czasu przebywania obiektu w stanie naprawy w przedziale czasu $(0, t]$ [12].

Gotowość operacyjna $K_{go}(t, \Delta)$ określa prawdopodobieństwo, że obiekt znajduje się w stanie zdatności w chwili t i $t + \Delta$. Po założeniu, że obiekt jest nowy w chwili $t = 0$ oraz że intensywność uszkodzeń jest stała ($\lambda(t) = \lambda$):

$$K_{go}(t, \Delta) = K_g(t) K_g(\Delta) \quad (5.41)$$

Jeśli przyjąć, że dystrybuanta czasu pracy $F(t)$ i dystrybuanta czasu naprawy $G(t)$ są rozkładami wykładniczymi:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{i} \quad G(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (5.42)$$

to [90]:

- funkcja niezawodności (prawdopodobieństwo, że obiekt nie ulegnie uszkodzeniu w przedziale $[0, t]$; niekiedy używa się oznaczenia $\bar{F}(t)$ dla odróżnienia od funkcji niezawodności elementu nienaprawialnego):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5.43)$$

- niestacjonarny współczynnik gotowości (funkcja gotowości) (prawdopodobieństwo, że obiekt jest zdalny w chwili t):

$$K_g(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (5.44)$$

- niestacjonarny współczynnik niegotowości (prawdopodobieństwo, że obiekt jest uszkodzony w chwili t):

$$K_n(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{(1 - (\lambda + \mu)t)} \quad (5.45)$$

- średnia liczba uszkodzeń w przedziale $[0, t]$:

$$W(t) = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2} e^{(1 - (\lambda + \mu)t)} + \frac{\lambda \mu t}{\lambda + \mu} \quad (5.46)$$

- średnia liczba naprawy w przedziale $[0, t]$:

$$V(t) = \frac{\lambda\mu t}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda\mu}{(\lambda + \mu)^2} \quad (5.47)$$

- średni sumaryczny czas pracy w przedziale $[0, t]$:

$$\bar{U}(t) = \frac{\mu t}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda\mu}{(\lambda + \mu)^2 (1 - e^{-(\lambda + \mu)t})} \quad (5.48)$$

- średni sumaryczny czas naprawy w przedziale $[0, t]$:

$$\bar{D}(t) = t - \bar{U}(t) \quad (5.49)$$

- niestacjonarny współczynnik gotowości operacyjnej (prawdopodobieństwo, że obiekt jest zdalny w przedziale czasu $[t, t + \Delta t]$):

$$K_{go}(t, \Delta t) = K_g(t) e^{-\lambda \Delta t} \quad (5.50)$$

- stacjonarna wartość funkcji gotowości (współczynnik gotowości):

$$K_g = \lim_{t \rightarrow \infty} K_g(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (5.51)$$

- stacjonarny współczynnik niegotowości:

$$K_n = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (5.52)$$

- stacjonarny współczynnik gotowości operacyjnej:

$$K_{go}(\Delta t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-\lambda \Delta t} = K_g e^{-\lambda \Delta t} \quad (5.53)$$

6. MODELE NIEZAWODNOŚCI ELEMENTU LOGISTYCZNEGO

W porównaniu do definicji niezawodności systemu technicznego należy zwrócić uwagę na podstawowe różnice w rozumieniu w logistyce pojęcia niezawodności [152]:

- niezawodność jest rozumiana „wąsko”, tylko jako miara realizacji zadania w czasie, co można porównać do pojęcia nieuszkodzalności,
- w obu zbiorach pojęć: „logistycznym” i „technicznym” korzysta się w podobny sposób z pojęcia gotowości,
- w ujęciu „logistycznym” nie sformułowano odpowiednika charakterystyki obsługiwalności lub naprawialności (nie ocenia się czynności przeciwdziałających pojawieniu się zakłóceń lub usuwaniu skutków tych zdarzeń, brak wskaźników charakteryzujących usuwanie skutków wystąpienia błędu),
- wszystkie miary mają charakter współczynników (wskaźników strukturalnych); nie korzysta się z innych charakterystyk, mimo że oceniane procesy są procesami losowymi.

6.1. MODEL NIEZAWODNOŚCI ELEMENTU NIEODNAWIALNEGO

Główny cel postawiony systemowi logistycznemu dotyczy dostarczenia klientowi danego produktu po spełnieniu wymaganych warunków. Tak rozumiany cel został opisany formułą 7R (*Right product*, *Right quantity*, *Right quality*, *Right place*, *Right time*, *Right customer*, *Right price*) [92, 201]. Niezawodność działania systemu oznacza zatem:

- zapewnienie dostępności właściwych produktów,
- właściwą ilość (kompletną realizację zamówienia),
- właściwą jakość (otrzymanie produktu bez uszkodzenia),

- właściwe miejsce,
- właściwy czas (terminowe wykonanie zadania),
- właściwych odbiorców (dokładną realizację zamówienia),
- właściwą cenę (dokładne zafakturowanie zamówienia).

Ocena niezawodności funkcjonowania systemu logistycznego wysuwa na pierwsze miejsce spośród różnych, wymienionych, charakterystyk czynnik czasu. Miara niezawodności systemu jest wówczas sformułowana jako [230]:

$$R(t) = P(T < t_0) \quad (6.1)$$

gdzie: T – losowy czas realizowanego zadania (np. dostawy), t_0 – założony (zdeteminowany) limit czasu na wykonanie zadania.

Oczywiście błędem w realizacji zadania może być nie tylko opóźnienie chwili dostawy (T_-), ale też zbyt wczesna realizacja zlecenia (T_+), przy możliwych różnych skutkach niedotrzymania terminu dostawy. Można więc zapisać niezawodność systemu jako:

$$R(t) = P\left(t_0 - \frac{\Delta t}{2} \leq T < t_0 + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (6.2)$$

gdzie: Δt – dopuszczalny przedział czasu realizacji zadania, $\Delta t = T_+ - T_-$.

Biorąc pod uwagę wszystkie cechy sformułowane w zasadzie 7R, można ocenić stopień realizacji każdego wymagania indywidualnie [160]:

$$\begin{aligned} P_{cpr} &= \frac{N_{cpr}}{N}; P_{cpl} = \frac{N_{cpl}}{N}; P_{ccu} = \frac{N_{ccu}}{N}; P_{cti} = \frac{N_{cti}}{N}; \\ P_{cql} &= \frac{N_{cql}}{N}; P_{cqt} = \frac{N_{cqt}}{N}; P_{cdo} = \frac{N_{cdo}}{N} \end{aligned} \quad (6.3)$$

gdzie: P_i – prawdopodobieństwo poprawnej realizacji cechy i , N_i – liczba poprawnie zrealizowanych cech i , N – liczba zrealizowanych działań (dostaw), cpr – prawidłowy produkt, cpl – prawidłowe miejsce, ccu – prawidłowy klient, cti – prawidłowy przedział czasu dostawy, cql – prawidłowa jakość produktu, cqt – prawidłowa ilość produktu, cdo – prawidłowa dokumentacja/cena.

Dla tak zdefiniowanych wskaźników częściowych tworzy się wskaźnik syntetyczny określający „perfekcyjną realizację zamówienia” [160]:

$$R_d = P_{cpr} P_{cpl} P_{ccu} P_{cti} P_{cql} P_{cqt} P_{cdo} \quad (6.4)$$

Wzór (6.4) wymaga założenia, że analizowane zdarzenia losowe (błędy, uszkodzenia) są statystycznie niezależne i znaczenie (waga) każdego zdarzenia jest takie samo. Jeżeli jednak poszczególne wymagania mają różne znaczenie dla końcowego

odbiorcy, należy wprowadzić odpowiedni wektor wag cząstkowych w . Wektor wag ma postać:

$$w = [w_{cpr}, w_{cpi}, w_{ccu}, w_{cti}, w_{cgl}, w_{cqt}, w_{cdo}] \quad (6.5)$$

przy czym jego składowe zawierają się w przedziale $<0, 1>$ i spełniają warunek:

$$w_{cpr} + w_{cpi} + w_{ccu} + w_{cti} + w_{cgl} + w_{cqt} + w_{cdo} = 1 \quad (6.6)$$

gdzie: w_i – waga poprawnej realizacji cechy i .

Wówczas:

$$R_d = w_{cpr}P_{cpr} + w_{cpi}P_{cpi} + w_{ccu}P_{ccu} + w_{cti}P_{cti} + w_{cgl}P_{cgl} + w_{cqt}P_{cqt} + w_{cdo}P_{cdo} \quad (6.7)$$

Przykładem wykorzystania formuły (6.4) jest stosowany w praktyce wskaźnik OTIF (*On-time, In-full, Error-free*) [30]. Perfekcyjnie wykonane zamówienie oznacza, że towar został dostarczony bez żadnego opóźnienia, dostarczono wszystkie zamówione części i żadna część nie została w procesie logistycznym uszkodzona. Wartość wskaźnika OTIF można wyznaczyć ze wzoru:

$$OTIF = P_{o-t}P_{i-f}P_{e-f} \quad (6.8)$$

gdzie: P_{o-t} – prawdopodobieństwo dostarczenia dostawy na czas, P_{i-f} – prawdopodobieństwo dostarczenia kompletnej dostawy, P_{e-f} – prawdopodobieństwo dostarczenia dostawy pozbawionej wad.

Niekiedy [92] sformułowane wymagania, dotyczące perfekcyjnej dostawy, są uzupełniane o inne cechy, np. bezbłędne przygotowanie faktury – wymaganie związane z przepływem informacji.

Wskaźniki oceny poszczególnych czynników przyjmuje się w sposób następujący:

- wskaźnik terminowości:

$$\frac{\text{zamówienia zrealizowane terminowo}}{\text{wszystkie przyjęte zamówienia}} \times 100\%$$

- wskaźnik kompletności:

$$\frac{\text{wysłane zamówienia kompletne}}{\text{wszystkie przyjęte zamówienia}} \times 100\%$$

- wskaźnik bezbłędności w dokumentacji:

$$\frac{\text{prawidłowo wystawione dokumenty}}{\text{wszystkie wystawione dokumenty}} \times 100\%$$

- wskaźnik bezszkodowości i bezbłądności dostaw:

$$\frac{\text{zamówienia zrealizowane bez błędów}}{\text{wszystkie przyjęte zamówienia}} \times 100\%$$

Podejście zaprezentowane w formule (6.7) bierze pod uwagę wagi potencjalnych skutków poszczególnych uszkodzeń elementu logistycznego. Ten wskaźnik jest bardziej realistyczny, ponieważ każde uszkodzenie systemu logistycznego powoduje różny efekt dla odbiorcy końcowego. Wskaźnik pozwala na: identyfikację ważności danego składnika/parametru ze względu na osiągi całego analizowanego systemu i wyznaczenie skutków zmiany dowolnego parametru [41]. Jeżeli każde odchylenie od planowanych wartości wynikających z formuły 7R jest rozumiane jako błąd lub uszkodzenie systemu, to kierunek odchylenia od wymagań jest także znaczący.

Omawiany problem jest znany i rozwiązywany np. przy problemach definiowania polityki obsługowej wieloelementowego niejednorodnego systemu. W pracy [10] zasugerowano, że krytyczna analiza bazująca na metodzie FMECA może być bardzo pomocnym narzędziem. Zaprezentowano listę możliwych kryteriów wyznaczenia stopnia krytyczności elementów, która obejmuje:

- bezpieczeństwo,
- ważność urządzenia dla procesu,
- gotowość zapasowych maszyn/elementów wymiennych,
- koszty utrzymania/obsługi,
- trudności w dostępie,
- częstotliwość uszkodzeń,
- czas trwania niezdatności,
- rodzaj maszyny/urządzenia,
- warunki użytkowania,
- skutki rozprzestrzeniania się błędu,
- koszty utraconej produkcji.

Omówiona w pracy [10] analiza elektrowni jako systemu zbudowanego z tysiąca różnych elementów wymagała przyjęcia wagi sześciu wybranych kryteriów:

- bezpieczeństwo – 1,5,
- ważność urządzenia dla procesu – 2,5,
- koszty utrzymania/obsługi – 2,
- częstotliwość uszkodzeń – 1,
- czas trwania niezdatności – 1,5,
- warunki użytkowania – 1.

Wskaźniki uzyskane w tej analizie stanowiły podstawę do opracowania programu utrzymania systemu, pozwalając na skoncentrowanie się na najważniejszych ze względu na niezawodność elementach.

Jednak oceniając wskaźniki dla dowolnego rzeczywistego procesu logistycznego napotykamy istotny brak wystarczających informacji/danych. Przedsiębiorstwa rzadko decydują się na publikowanie danych statystycznych dotyczących błędów, które wystąpiły podczas procesu logistycznego. Ten fakt także powstrzymuje badaczy przed szacowaniem cząstkowych wskaźników wagi dla współczynnika R_d (równanie 6.7). W praktyce przedsiębiorstwa muszą pozyskiwać taką wiedzę mniej pewnymi metodami, jak np. badaniem opinii ekspertów.

Aby wyeliminować takie subiektywne oceny, zaproponowano [87] kilka koncepcji oceny ważności cząstkowych błędów w analizie niezawodności systemu logistycznego. Założono, że miara wag bazuje na modelach wskaźników ważności wykorzystywanych w teorii niezawodności do wyznaczania ważności poszczególnych składników systemu lub odpowiednich zdarzeń.

W inżynierii niezawodności znanych jest kilka analitycznych i doświadczalnych miar, które porządkują komponenty zgodnie z ich ważnością dla systemu. Pozwalają na identyfikację komponentów lub zdarzeń, które wywierają najbardziej istotny wpływ na zachowania systemu pod kątem niezawodności, ryzyka i bezpieczeństwa [49]. Do najczęściej stosowanych modeli należą:

- Wskaźnik ważności Birnbauma. Wprowadzony w 1969 przez Birnbauma opisuje prawdopodobieństwo, że system będzie w stanie zdatności ze względu na krytyczny element i , jeżeli element i jest w stanie zdatności. Wyznacza stopę wzrostu niezawodności systemu ze wzrostem niezawodności komponentu i [229]. Jest definiowany wzorem:

$$I_{i0}^B(t) = \frac{\partial R_s(t)}{\partial R_i(t)} \quad (6.9)$$

gdzie: $R_s(t)$ – niezawodność systemu w chwili t , $R_i(t)$ – niezawodność komponentu i w chwili t .

Wadą wskaźnika Birnbauma jest to, że $I_i^B(t)$ nie zależy od aktualnego poziomu niezawodności komponentu. Stąd dwa komponenty mogą mieć podobne wartości miary $I_i^B(t)$ choć ich aktualne poziomy niezawodności mogą się poważnie różnić [49].

- Krytyczny wskaźnik ważności. Wskaźnik ten jest rozszerzeniem miary Birnbauma. Wyraża prawdopodobieństwo, że komponent i spowodował uszkodzenie systemu, wiedząc, że system jest w stanie niezdatności [229]. Komponent i nie musi być jedynym komponentem w stanie niezdatności, ale przy uszkodzonych wielu komponentach jest tym, który uszkodził się ostatni. Wskaźnik uwzględnia zawodność komponentu:

$$I_i^{CR}(t) = I_i^B(t) \frac{F_i(t)}{F_s(t)} \quad (6.10)$$

gdzie: $F_s(t)$ – zawodność systemu w chwili t , $F_i(t)$ – zawodność komponenty i w chwili t .

- Miara Barlowa–Proschana. Wskaźnik opisuje prawdopodobieństwo, że uszkodzenie i -tego komponentu zbiega się z uszkodzeniem systemu. Jest to ważona średnia miar Birnbauma zależna od zawodności i -tego komponentu w chwili t . Komponent jest bardziej ważny, jeżeli jest bezpośrednią przyczyną uszkodzenia systemu [148]:

$$I_i^{BP} = \int_0^{\infty} I_i^B(t) f_i(t) dt \quad (6.11)$$

gdzie: $f_i(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy i -tego komponentu.

- Wskaźnik ważności diagnostycznej (miara Vesely–Fussella). Wskaźnik opisuje prawdopodobieństwo, że komponent i uległ uszkodzeniu, mimo że system jest w stanie niezdatności. Może być przydatny w diagnozowaniu przyczyn uszkodzeń systemu [229]. Zgodnie z tą miarą, stopień ważności komponentu w systemie zależy od liczby i rzędu przekroju do którego komponent należy. Wskaźnik wyraża ilościowo maksymalne zmniejszenie niezawodności systemu spowodowane przez dany komponent [49]:

$$I_i^{VF}(t) = \frac{R_s(t) - R_s(t; R_i(t) = 0)}{R_s(t)} \quad (6.12)$$

gdzie: $R_s(t; R_i(t) = 0)$ – niezawodność systemu w chwili t o uszkodzeniu danego komponentu i .

- Wartość osiągniętej niezawodności (*Reliability Achievement Worth*). Wskaźnik określa ilościowo maksymalny możliwy wzrost procentowy niezawodności systemu wywołany przez dany komponent [49]:

$$RAW_i(t) = \frac{R_s(t; R_i(t) = 1)}{R_s(t)} \quad (6.13)$$

gdzie: $R_s(t; R_i(t) = 1)$ – niezawodność systemu w chwili t przy poprawnym działaniu danego komponentu i .

- Wartość redukcji niezawodności (*Reliability Reduction Worth*). Miara ta nadaje wartość możliwym przyczynom uszkodzenia/zniszczenia systemu spowodowanego przez dany komponent:

$$RRW_i(t) = \frac{R_s(t)}{R_s(t; R_i(t) = 0)} \quad (6.14)$$

Wszystkie omówione wskaźniki w sposób precyzyjny różnicują znaczenie elementu lub ważność zdarzenia dla systemu. Nie ma jednak prostej reguły wskazującej, który wskaźnik wybrać do dalszej analizy. Podobnie nie ma prostej zasady, który model najlepiej jest zastosować do oceny funkcjonowania procesów logistycznych w przedsiębiorstwie. W przypadku wartościowania niezawodności systemu logistycznego największym problemem może być prawidłowe adaptowanie danych miar na potrzeby logistyki. W tabeli 6.1 zestawiono [87] omówione wskaźniki ważności elementów dla niezawodności systemu. Wskazano na wpływ zmiany niezawodności elementu na wzrost funkcji niezawodności lub funkcji zawodności systemu. Waga (istotność) elementu jest większa, jeżeli jego wpływ na zmianę niezawodności systemu jest większy.

Tabela 6.1. Zestawienie wskaźników ważności

Wpływ niezawodności elementu na niezawodność systemu	Analizowany poziom niezawodności <i>i</i> -tego elementu		
	$R_i(t) = 0$	$R_i(t)$ – funkcja t	$R_i(t) = 1$
$R_s(t)$ wzrasta		$I_i^B(t)$	$RAW_i(t)$
$R_s(t)$ wzrasta	$I_i^{VF}(t)$ $RAW_i(t)$		
$F_s(t)$ wzrasta		$I_i^{CR}(t)$ $I_i^{BP}(t)$	

Tabela 6.2. Postacie niezdatności systemu logistycznego i ich krytyczność dla procesu produkcyjnego

Rodzaj wadliwości procesu zaopatrzenia	Kierunek rozbieżności pomiędzy zamówieniem i dostawą	Konsekwencje
Nieprawidłowy		Może powodować zatrzymanie produkcji – skutki kosztowe i krytyczne
Nieprawidłowe miejsce		Może powodować zatrzymanie produkcji – skutki kosztowe i krytyczne
Nieprawidłowy odbiorca		Może powodować zatrzymanie produkcji – skutki kosztowe i krytyczne
Nieprawidłowy przedział czasu dostawy	Zbyt wcześnie	Większe koszty utrzymania zapasów – skutki kosztowe, niekrytyczne
	Zbyt późno	Może powodować zatrzymanie produkcji – skutki kosztowe i krytyczne
Nieprawidłowa jakość produktu	Lepsza niż zamówiona	Bez skutków
	Gorsza niż zamówiona	Może powodować zatrzymanie produkcji – skutki kosztowe i krytyczne
Nieprawidłowa ilość produktu	Większa niż zamówiona	Bez skutków
	Mniejsza niż zamówiona	Może powodować zatrzymanie produkcji – skutki kosztowe i krytyczne
Nieprawidłowa dokumentacja		Skutki kosztowe

Zawodność systemu logistycznego może powodować dwa rodzaje skutków: tylko straty finansowe (koszty) lub krytyczne – przerwanie realizacji procesu logistycznego. W tabeli 6.2 pokazano analizę [87] możliwych konsekwencji uszkodzenia procesu w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Przedstawiona analiza bezpośrednio wskazuje na różną ważność poszczególnych uszkodzeń procesu zaopatrzenia. Uzasadnia to potrzebę korzystania z omówionych wskaźników ważności poszczególnych uszkodzeń elementu logistycznego.

Niezależnie od rodzaju niepożądanych zdarzeń występujących w trakcie realizacji zadania, wszystkie – poza opóźnieniem wykonania zadania – mogą być naprawione zgodnie z przyjętymi procedurami, np.:

- uzupełnienie brakującej liczby elementów,
- dostarczenie nieuszkodzonych elementów w miejsce tych, które zostały w transporcie uszkodzone,
- dostarczenie prawidłowych elementów zamiast błędnie wyspecyfikowanych.

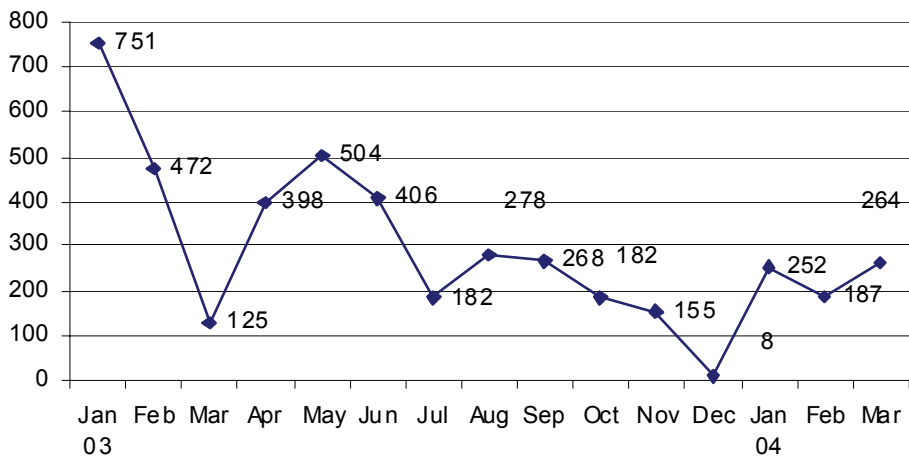
Dokonanie takich poprawek wymaga tylko czasu i jeżeli zostanie zrealizowane w dopuszczalnym limicie czasu nie będzie powodowało uszkodzenia systemu. Jedynym nienaprawialnym uszkodzeniem systemu logistycznego jest pierwotne opóźnienie w wykonaniu zaplanowanego zadania.

6.1.1. PRZYKŁAD OCENY NIEZAWODNOŚCI PROCESU ZAOPATRZENIA

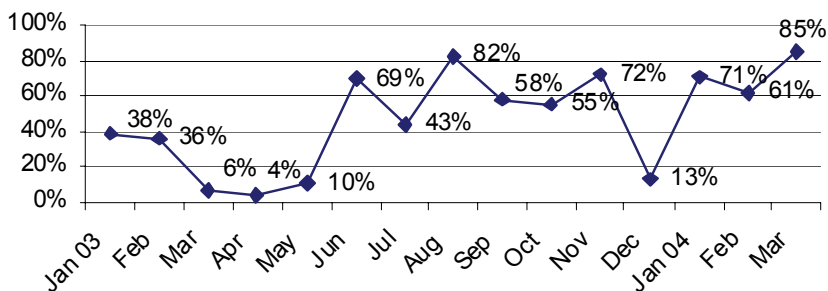
Przykład oceny niezawodności oparto na analizie procesu zaopatrzenia. Badano [160] przedsiębiorstwo produkujące maszyny robocze, w którym elementy układów hydraulicznych i pneumatycznych są dostarczane od jednego dostawcy [130]. Analizie poddano 250 części na podstawie danych zgromadzonych w okresie od stycznia 2003 do kwietnia 2004. Łączną liczbę dostaw danej grupy części pokazano na rysunku 6.1. Liczba dostaw zawiera się w przedziale od 8 w grudniu 2004 r. do 751 w styczniu 2003.

Udział dostaw o właściwej liczbie części dostarczonych na czas pokazano na rysunku 6.2. Widoczna jest duża zmienność w poszczególnych miesiącach – od 4% do 85%. Należy zwrócić uwagę, że w zbiorze danych gromadzone są informacje tylko o tzw. zamkniętych zleceniach, co wprowadza dodatkowe zakłócenia do analizowanych danych.

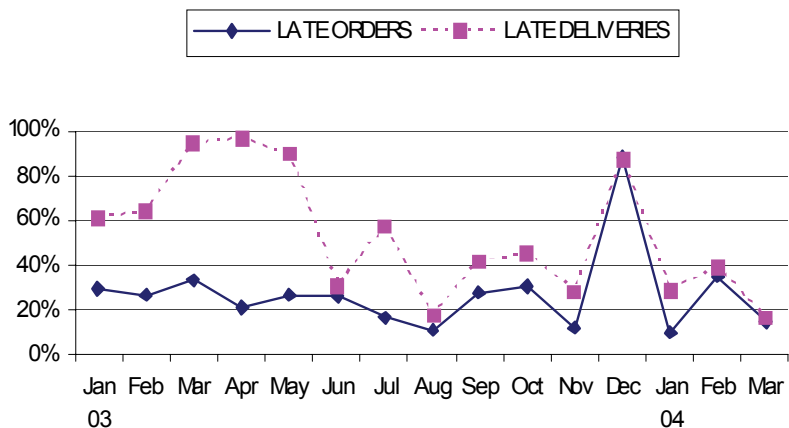
Porównanie tych danych z rysunku 6.3, pokazującego udział opóźnionych zamówień składanych przez producenta, wskazuje na inną sytuację. Można stwierdzić, że od sierpnia 2003 r. opóźnienia w dostawach były spowodowane przede wszystkim przez opóźnienia w składaniu zamówień.



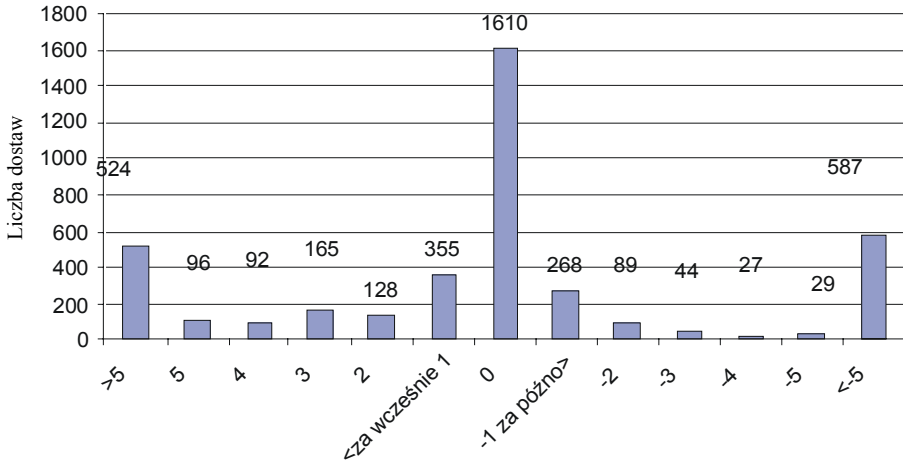
Rys. 6.1. Całkowita ilość dostaw w badanym okresie czasu



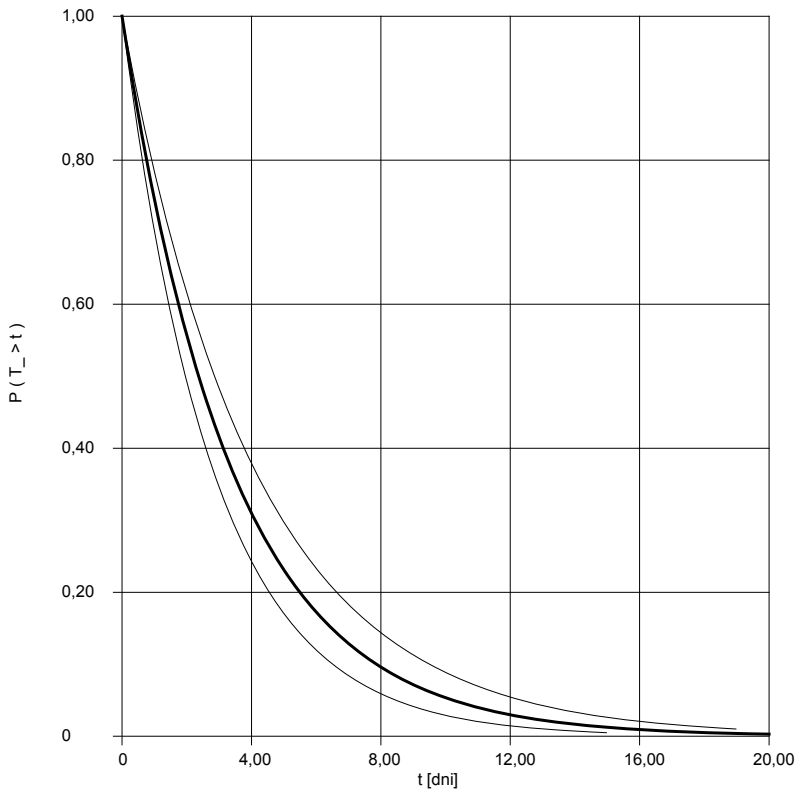
Rys. 6.2. Udział dostaw zrealizowanych we właściwym dniu i właściwej ilości



Rys. 6.3. Udział opóźnionych zamówień i dostaw



Rys. 6.4. Rozkład odchyłek czasu dostawy



Rys. 6.5. Prawdopodobieństwo opóźnienia dostawy elementu

Na rysunku 6.4 pokazano wyniki analizy odchyłek czasu dostawy. Wzięto pod uwagę liczbę dni dostawy zbyt późnej lub zbyt wczesnej. Interesujący jest prawie symetryczny rozkład błędów wskazujący na brak funkcjonowania dodatkowych wymuszeń dyscyplinujących terminowość dostawy.

Przeprowadzona analiza *Missing List* (zestawienie przygotowywane każdego dnia, dotyczące listy elementów niedostarczonych zgodnie z zamówieniem, których brak może spowodować istotne zakłócenia w produkcji) wskazuje (rys. 6.5), że ponad 30% wszystkich analizowanych elementów nie było dostarczonych na czas przynajmniej jeden raz. Rozkład prawdopodobieństwa czasu opóźnienia takich elementów aproksymowano rozkładem Weibula, przy czym prawdopodobieństwo opóźnienia o więcej niż tydzień jest znaczące ($P(T_{-} > 7) = 0,14$).

6.1.2. PRZYKŁAD OSZACOWANIA WSKAŹNIKA OTIF

Przedstawioną metodę (wzór 6.8) wykorzystano do oceny systemu logistycznego, dostarczającego części do produkcji wirnika rozrusznika oraz podzespołów alternatora w przedsiębiorstwie przemysłu motoryzacyjnego [104]. Analizie poddano 7 dostawców oznaczonych kodami: A, B, C, D, E, F, G.

Dokumentację procesu dostawy stanowiły:

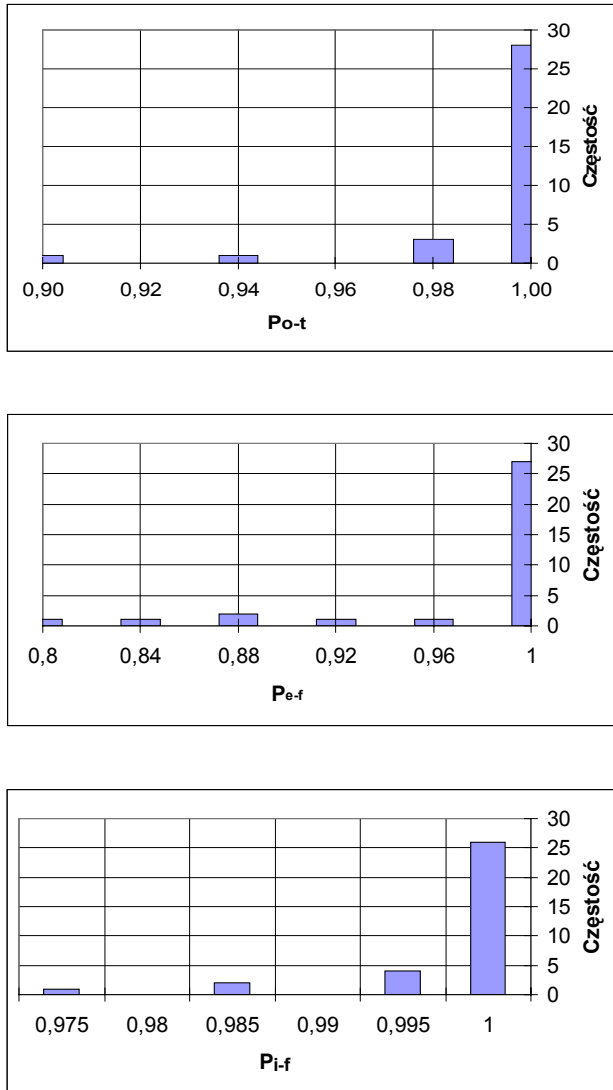
- druk zamówienia tworzony około 4 tygodnie przed datą dostawy i wysyłany do dostawcy faxem,
- druk MDS (*Material Delivery Schedul*) zawierający szczegółową prognozę zamówień na miesiąc następny i ogólną prognozę na następne 3 miesiące,
- faktura wystawiana w chwili przyjęcia zamówienia i odpowiedni druk PZ,
- druk Protokołu Jakości Dostawy; próbka z każdej dostawy sprawdzana według ustalonego planu kontroli jakości.

Kryteria oceny poszczególnych czynników:

- terminowość dostawy – dostawę uważa się za dostarczoną na czas, gdy termin pojawienia się jej w magazynie zakładu nie przekracza z góry ustalonego terminu ($P_{o-t} = 1,0$); w innym przypadku stopień spełnienia kryterium wyraża się ilorazem liczby dni opóźnienia do czasu dostarczenia poprzedniej dostawy (liczba wszystkich dni łącznie z dniami wolnymi od pracy),
- kompletność dostawy – dostawę uważa się za kompletną, jeżeli liczba części dostarczonych dokładnie odpowiada liczbie podanej w zamówieniu ($P_{i-f} = 1,0$); w innym przypadku do obliczenia stopnia spełnienia kryterium wykorzystano iloraz liczby części brakujących w dostawie do liczby części zamówionych,
- jakość dostarczonych części – warunek uważa się za spełniony, jeżeli dostawa jest pozbawiona jakichkolwiek wad jakościowych ($P_{e-f} = 1,0$); jeżeli w dostawie zaobserwowano dowolną niezgodność jakościową, to wartość wskaźnika $P_{e-f} = 0,98$

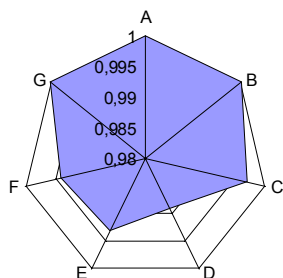
i zmniejsza się proporcjonalnie do stosunku liczby części z wadą jakościową do łącznej liczby części w dostawie.

Przykład oszacowania wskaźników częściowych niezawodności dostawy dla dostawcy C pokazano na rysunku 6.6.

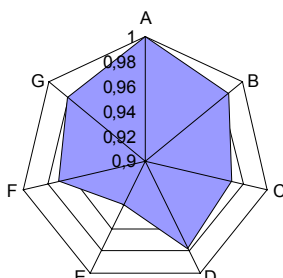


Rys. 6.6. Histogramy częściowych wskaźników dostawy dla dostawcy C

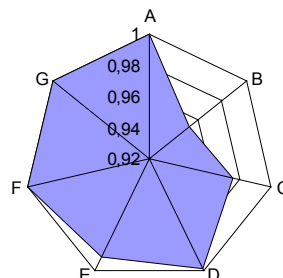
Wartości wskaźników cząstkowych poszczególnych dostawców pokazano na rysunku 6.7, a średnie wartości wskaźników OTIF dla poszczególnych dostawców zestawiono na rys. 6.8.



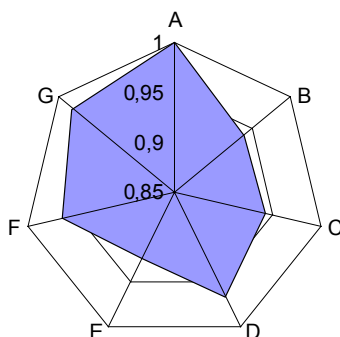
Rys. 6.7a. Rozkład P_{o-t} dla poszczególnych dostawców



Rys. 6.7b. Rozkład P_{i-f} dla poszczególnych dostawców



Rys. 6.7c. Rozkład P_{e-f} dla poszczególnych dostawców



Rys. 6.8. Rozkład wskaźnika OTIF dla poszczególnych dostawców

W omówionym przykładzie tylko jeden dostawca A zrealizował wszystkie zamówienia bezbłędnie. Oceniając dostawców według każdego zamówienia osobno, należy zauważyć, że prawdopodobieństwo dostarczenia perfekcyjnej dostawy jest małe i może wynosić tylko 0,273 (dostawca F) lub 0,544 (dostawca D). Poszczególnym dostawcom można przypisać dominujące błędy (np. dostawca E – niedotrzymywanie terminów dostawy, dostawca B – 73% części odrzuconych ze względu na wady wykonania). Umożliwia to przeprowadzenie oceny *a posteriori* prawidłowości realizowania procesu dostawy przez analizowane firmy oraz eliminację popełnianych błędów i podnoszenie niezawodności dostawy do akceptowanego przez firmę poziomu OTIF = 0,96. Metoda nie daje możliwości przeprowadzenia oceny dla firmy, z którą dopiero rozpoczyna się współpracę.

6.1.3. PRZYKŁAD NIEZAWODNOŚCIOWEJ OCENY PROCESU MAGAZYNOWANIA

Możliwości przeprowadzenia oceny niezawodności systemu zależą od dostępu do informacji identyfikujących funkcjonowanie rzeczywistego systemu [161]. Korzysta się z danych statystycznych gromadzonych w danym systemie i/lub opinii ekspertów. Im więcej danych i im te dane są dokładniejsze, tym przeprowadzona ocena jest bardziej wiarygodna.

Wobec trudności i kosztów w pozyskaniu dostatecznej liczby danych statystycznych, jedną z najczęściej wykorzystywanych metod jest metoda FMECA [138]. Analiza przyczyn i skutków błędów (wad) FMECA to analiza systemu, która pozwala określić błędy, ich skutki dla całego systemu oraz ocenić, czy są one krytyczne. Brane jest pod uwagę znaczenie potencjalnego błędu (Z), możliwości jego wystąpienia (P) oraz jego wykrywalność (W). Podstawę do podejmowania decyzji i działań zapobiegawczych stanowi wskaźnik ryzyka RPN (*risk priority number*):

$$RPN = Z P W \quad (6.15)$$

Dla uproszczenia analizy w stosunku do powszechnie stosowanej skali 10-stopniowej wykorzystuje się czasem [186] skalę progresywną definiującą dla poszczególnych czynników trzy wartości: 3, 5, 15 – tabela 6.3.

Tabela 6.3. Opis parametrów Z, P, W [186]

Ocena	Znaczenie potencjalnego błędu	Prawdopodobieństwo wystąpienia błędu	Wykrywalność błędu
3	Skrajnie niskie	Skrajnie niskie	100 %
5	Średnie	Możliwe	Niewystarczająca
15	Duże	Bardzo prawdopodobne	Niemożliwe

Obliczony wskaźnik RPN obrazuje istotność wystąpieniem danego błędu. W przypadku skali 1–10 będzie się on zmieniał od 1 do 1000, a dla skali progresywnej od 27 do 3375. Korzystając ze wskaźnika RPN , można dokonać hierarchizacji przyczyn błędów – ocenić niezawodność analizowanego procesu.

Dla określonego zakresu badań niezawodności [88] wyróżniono błędy o największym znaczeniu dla procesów magazynowania:

- uszkodzenie elementu:
 - małe walory jakościowe detali,
 - uszkodzenia podczas transportu,
 - uszkodzenia z winy dostawcy, niewykryte podczas kontroli podczas przyjęcia towaru do magazynu,
 - uszkodzenie podczas manipulacji;

- zamiana referencji – przyjęcie do magazynu lub wydanie na produkcję detali o referencji niezgodnej z rzeczywistością:
 - zła etykieta – towar dostarczony z błędną etykietą, niewykrycie różnic podczas przyjęcia do magazynu,
 - brak etykiety – uniemożliwiający właściwą identyfikację towaru,
 - dwie etykiety – dwie różne etykiety na jednym opakowaniu,
 - błąd ludzki – pomyłka podczas przyjęcia/wydania towaru, złe wprowadzenie do systemu lub wyprowadzenie z niego;
- brak – zamówienie na komponent z linii produkcyjnej niezrealizowane lub zrealizowane niekompletnie,
 - zamówienia składane są na podstawie nieaktualnych jeszcze stanów magazynowych,
 - zamówienie złożone zbyt późno (nieprzestrzeżenie czterogodzinnego okresu wyprzedzenia);
- nadwyżka – liczba dostarczonych komponentów większa niż zamówiona,
 - zamówienie złożone zbyt późno – towar nie został przepakowany do mniejszych opakowań i wysłany w opakowaniu zbiorczym,
 - błąd ludzki podczas kompletacji zamówienia;
- jakość opakowań – naruszony materiał opakunkowy,
 - uszkodzenie podczas transportu,
 - uszkodzenie podczas manipulacji,
 - uszkodzenie podczas mycia,
 - opakowanie uszkodzone od dostawcy albo klienta, niewykrycie uszkodzenia podczas kontroli podczas przyjęcia do magazynu;
- opóźnienia – dostawa komponentów o godzinie późniejszej niż zamówiono,
 - uszkodzenie systemu,
 - za późno wysłane zamówienie,
 - uszkodzenie samochodu.

Błędy w procesie magazynowania mogą pojawić się w każdym jego etapie. Dla przeciwdziałania skutkom błędów ważna jest nie tylko samokontrola i wykwalifikowana kadra, ale także sposoby i możliwość naprawy niepożądanych sytuacji. W tabeli 6.4 oprócz potencjalnych błędów, przedstawiono także ich możliwe skutki oraz domniemane przyczyny [186].

Oprócz wymienionych zakłóceń mogą pojawić się także błędy podczas wprowadzania informacji do systemu.

Badania dotyczące realizacji poszczególnych etapów magazynowania zostały przeprowadzone metodą ankietową [186]. Uzyskane w ten sposób informacje stanowiły podstawę do oceny niezawodności procesu magazynowania w przedsiębiorstwie produkującym sprzęt AGD. Wyniki analizy ankiet zestawiono w tabeli 6.6.

Tabela 6.4. Analiza etapów magazynowania pod względem potencjalnych błędów [186]

Etap	Zakłócenie	Możliwy skutek	Możliwa przyczyna
Przyjęcie towaru	Przyjęcie towaru z niepełną dokumentacją	Brak niezbędnych danych dla działów w firmie, np. finanse	Niedokładne sprawdzenie dokumentów przewozowych
	Przyjęcie niewłaściwego towaru	Brak właściwego towaru niezbędnego w procesie produkcyjnym	Złe oznakowanie przez producenta
	Przyjęcie uszkodzonego towaru	Brak materiałów potrzebnych do produkcji wyrobów	Niedostateczna możliwość wykrycia na tym etapie
	Przyjęcie niezgodnej ilości towaru	Brak/nadmiar materiału	Niedokładne przeliczenie przyjmowanej partii
	Złe posortowanie towaru	Składowanie więcej niż jednego materiału w tym samym miejscu	Ułożenie więcej niż jednego rodzaju materiału na tej samej palecie
	Złe oznakowanie towaru	Niezgodność poszczególnych partii materiałów	Błąd osoby przyjmującej dostawę towaru
Kontrola wzorca	Brak oznakowania po przeprowadzeniu kontroli	Zbyt długie oczekiwanie na możliwość rozmieszczenia materiału w magazynie	Błąd osoby przeprowadzającej kontrolę materiałów
Rozmieszczenie towaru w magazynie	Rozmieszczenie niewłaściwego materiału	Niezgodność poszczególnych materiałów pod względem miejsca składowania	Pobranie do rozmieszczenia nieodpowiedniej partii materiałów
	Rozmieszczenie nieodpowiedniej ilości materiału	Niezgodność materiałów pod względem ilości w poszczególnych miejscach składowania	Niewłaściwe rozdzielanie partii materiału
	Rozmieszczenie materiału w niewłaściwym miejscu	Niezgodność poszczególnych materiałów pod względem miejsca składowania	Błąd osoby rozmieszczającej materiał w magazynie
Wydanie materiału z magazynu	Pobranie niewłaściwego materiału	Dostarczenie niewłaściwego materiału	Błąd osoby pobierającej materiał z magazynu
	Pobranie nieodpowiedniej ilości materiału	Brak/nadmiar materiału w miejscu składowania i w miejscu przeznaczenia	Niedokładne przeliczenie pobranej ilości
	Pobranie materiału z niewłaściwego miejsca składowania	Niezgodność poszczególnych materiałów pod względem ilości i miejsca składowania	Błąd osoby pobierającej materiał z magazynu
	Złe skompletowanie partii materiałów	Dostarczenie niewłaściwego materiału	Brak skontrolowania partii przez osobę pobierającą materiał
	Dostarczenie materiałów w niewłaściwe miejsce	Brak materiału w miejscu jego przeznaczenia	Błąd osoby dostarczającej materiał w określone miejsce

cd. tab. 6.4

Wysyłka wyrobów gotowych	Dostarczenie niewłaściwego materiału	Brak właściwego towaru do wysyłki	Pobranie nieodpowiedniego materiału
	Dostarczenie nieodpowiedniej ilości materiału	Nieodpowiednia ilość materiału w partii wysyłkowej	Niedokładne przeliczenie partii materiału
	Złe skompletowanie partii do wysyłki	Wysyłka partii niezgodnej z zamówieniem	Niedokładne sprawdzenie poszczególnych materiałów do wysyłki
	Złe opakowanie	Możliwość uszkodzenia podczas transportu	Niedokładne przygotowanie poszczególnych materiałów do wysyłki
	Niezgodna dokumentacja wysyłkowa	Niezgodność zamówienia z dokumentami przewozowymi	Niedokładne sprawdzenie dokumentacji

Odpowiedzi dotyczące znaczenia, występowalności i wykrywalności potencjalnych błędów zostały przyporządkowane według skali progresywnej. Z przedstawionych danych wynika, że największą uzyskaną wartością wskaźnika *RPN* jest 375, a najmniejszą 27. Potencjalne błędy uporządkowane w kolejności malejącego współczynnika *RPN* zestawiono w tabeli 6.5.

Tabela 6.5. Lista rankingowa błędów [186]

<i>RPN</i>	Błędne postępowanie	Etap procesu magazynowania
375	Przyjęcie uszkodzonego towaru	Przyjęcie towaru
375	Pobranie niewłaściwego materiału	Wydanie materiału z magazynu
375	Złe skompletowanie partii materiałów	Wydanie materiału z magazynu
375	Dostarczenie niewłaściwego materiału	Wysyłka wyrobów gotowych
375	Niezgodna dokumentacja wysyłkowa	Wysyłka wyrobów gotowych
225	Rozmieszczenie materiału w niewłaściwym miejscu	Rozmieszczenie towaru w magazynie
225	Pobranie nieodpowiedniej ilości materiału	Wydanie materiału z magazynu
225	Pobranie materiału z niewłaściwego miejsca składowania	Wydanie materiału z magazynu
225	Złe skompletowanie partii do wysyłki	Wysyłka wyrobów gotowych
135	Przyjęcie niewłaściwego towaru	Przyjęcie towaru
135	Przyjęcie niezgodnej ilości towaru	Przyjęcie towaru
135	Złe oznakowanie towaru	Przyjęcie towaru
135	Rozmieszczenie niewłaściwego materiału	Rozmieszczenie towaru w magazynie
135	Dostarczenie nieodpowiedniej ilości materiału	Wysyłka wyrobów gotowych
125	Dostarczenie materiałów w niewłaściwe miejsce	Wydanie materiału z magazynu
75	Przyjęcie towaru z niepełną dokumentacją	Przyjęcie towaru
75	Brak oznakowania po przeprowadzonej kontroli	Kontrola wzorca
75	Rozmieszczenie nieodpowiedniej ilości materiału	Rozmieszczenie towaru w magazynie
45	Złe opakowanie	Wysyłka wyrobów gotowych
27	Złe posortowanie towaru	Przyjęcie towaru

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że 13 potencjalnych błędów pojawia się niekiedy i tylko 7 z nich charakteryzuje się bardzo dużą wykrywalnością. Natomiast wśród pozostałych możliwość wykrycia jest niewystarczająca. Są to następujące błędy:

- przyjęcie uszkodzonego towaru,
- pobranie niewłaściwego materiału,
- złe skompletowanie partii materiałów,
- dostarczenie materiałów w niewłaściwe miejsce,
- dostarczenie niewłaściwego materiału,
- niezgodna dokumentacja wysyłkowa.

Tabela 6.6. Wyniki przeprowadzonych badań (wg [186])

Numer błędu	Błąd	Znaczenie			Występowalność			Wykrywalność		
		3	5	15	3	5	15	3	5	15
1	Przyjęcie towaru z niepełną dokumentacją		X			X		X		
2	Przyjęcie niewłaściwego towaru			X	X			X		
3	Przyjęcie uszkodzonego towaru			X		X			X	
4	Przyjęcie niezgodnej ilości towaru			X	X			X		
5	Złe posortowanie towaru	X			X			X		
6	Złe oznakowanie towaru			X	X			X		
7	Brak oznakowania po przeprowadzonej kontroli		X			X		X		
8	Rozmieszczenie niewłaściwego materiału			X	X			X		
9	Rozmieszczenie nieodpowiedniej ilości materiału		X			X		X		
10	Rozmieszczenie materiału w niewłaściwym miejscu			X		X		X		
11	Pobranie niewłaściwego materiału			X	X	X		X	X	
12	Pobranie nieodpowiedniej ilości materiału			X	X			X	X	
13	Pobranie materiału z niewłaściwego miejsca składowania			X		X		X		
14	Złe skompletowanie partii materiałów			X	X	X		X	X	
15	Dostarczenie materiałów w niewłaściwe miejsce		X		X	X		X	X	
16	Dostarczenie niewłaściwego materiału			X		X		X	X	
17	Dostarczenie nieodpowiedniej ilości materiału			X	X			X		
18	Złe skompletowanie partii do wysyłki			X		X		X		
19	Złe opakowanie	X				X		X		
20	Niezgodna dokumentacja wysyłkowa			X		X			X	

Oznacza to, że etap wydania materiału z magazynu jest najbardziej zawodny, ponieważ występuje tam najwięcej błędów, których wykrywalność jest na poziomie 50%.

Oprócz wymienionych błędów należy skupić uwagę na dwóch operacjach:

- pobraniu odpowiedniej ilości materiału,
- dostarczeniu odpowiedniej ilości materiału.

Obie czynności są ze sobą powiązane i choć prawdopodobieństwo popełnienia błędu w tych przypadkach zostało ocenione jako skrajnie małe, to przeprowadzona inwentaryzacja w magazynie głównym potwierdziła możliwość pojawienia się i takich zdarzeń.

Pod względem merytorycznym, wyniki z przeprowadzonej ankiety oraz zgromadzone obserwacje w rzeczywistym przedsiębiorstwie, ujawniły niski stopień świadomości pracowników w odniesieniu do możliwości popełniania przez nich błędów. Wiele osób nie zdaje sobie sprawy z odpowiedzialności, jaka na nich spoczywa albo wręcz starają się ukryć swoje pomyłki.

6.2. MODELE NIEZAWODNOŚCI ELEMENTU ODNAWIALNEGO

6.2.1. NIEZAWODNOŚĆ ELEMENTU Z POMIJAŁNYM CZASEM ODNOWY

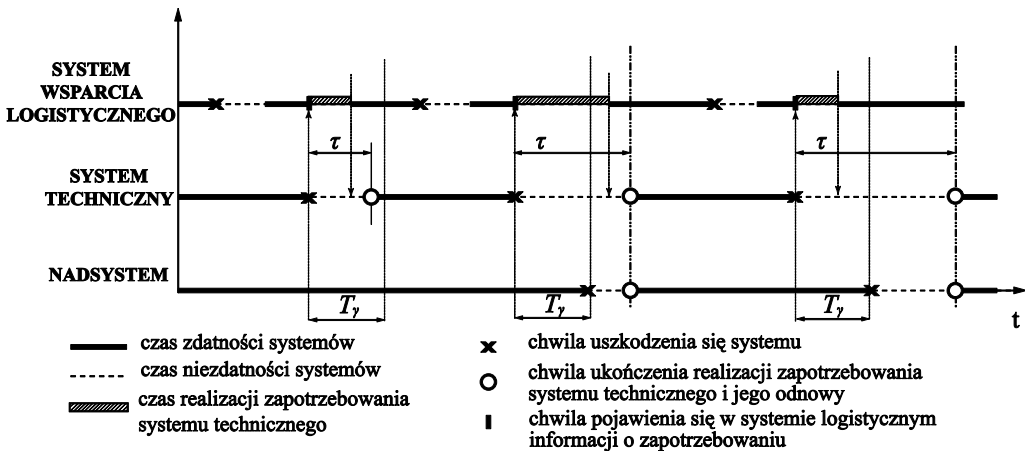
Element systemu logistycznego ma za zadanie prawidłową (zgodną z zasadą 7R) realizację przepływu materiałów od źródła do ujścia. Definiując odnowę lub naprawę elementu logistycznego, trzeba powiązać uszkodzenia elementów technicznych wykonujących dane zadanie z poprawnym działaniem systemu wspierającego. Analizuje się wobec tego nadsystem zbudowany z elementów/systemów technicznych (operacyjnych) i systemów wspierających.

W celu określenia prawdopodobieństwa, że w chwili t element logistyczny będzie znajdował się w stanie niezdatności dla określonej wielkości zapasu w systemie wspierającym, należy stworzyć model opisujący możliwość pojawienia się braku zapasu w pojedynczym cyklu zaopatrzeniowym oraz długość okresu trwania ewentualnego braku w systemie [236]. Należy przeanalizować, jakie jest prawdopodobieństwo, że okres braku niezbędnych elementów wymiennych w systemie wspierającym przekroczy dopuszczalną rezerwę czasu T_r , a w konsekwencji pojawi się niezdatność nadsystemu. Należy także wyznaczyć okres trwania ewentualnej niezdatności nadsystemu.

Założono [236], że elementy zapasowe znajdujące się w systemie wspierającym/logistycznym są traktowane jako rezerwa zimna. Po uszkodzeniu się elementu użytkowanego informacja o zapotrzebowaniu na część wymienną jest przekazywana do systemu wsparcia logistycznego. Przez τ oznaczono czas niezdatności nadsystemu, zdefiniowany przez brak części wymiennych, niezbędnych w procesie przywracania

jego zdadności. W sytuacji gdy niezbędne w procesie odnowy części wymienne znajdują się w systemie wsparcia logistycznego, wówczas czas realizacji zapotrzebowania τ może zostać pominięty. W związku z tym, że liczba części wymiennych w systemie jest ograniczona, operacja wymiany elementu uszkodzonego nie zawsze jest możliwa. Jeżeli ostatni zdadny element z zapasu ulegnie uszkodzeniu przed dostarczeniem nowej partii elementów wymiennych, czas realizacji zapotrzebowania τ jest równy losowej wielkości pozostałego czasu dostawy (licząc od chwili uszkodzenia się elementu logistycznego do chwili realizacji dostawy t_d).

Wobec tego, nadsystem zbudowany z systemu operacyjnego i systemu wspierającego jest uszkodzony, jeżeli system wspierający jest uszkodzony (brak części wymiennych) i czas realizacji dostawy części wymiennych jest dłuższy niż zdefiniowana rezerwa czasowa T_γ (rys. 6.9).



Rys. 6.9. Model nadzsystemu zbudowanego z systemu technicznego (z pomijalnym czasem odnowy) oraz systemu wsparcia logistycznego [236]

Zmienna losowa τ może przyjąć wartość zerową ($\tau = 0$) w dwóch przypadkach:

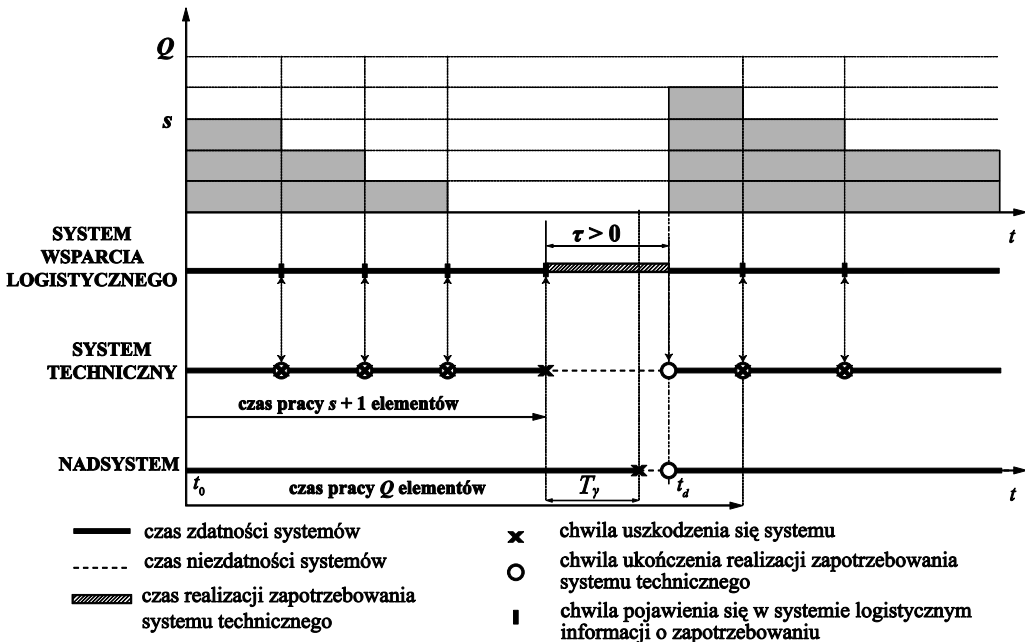
- gdy elementy wymienne niezbędne w procesie odnowy systemu technicznego znajdują się w systemie wsparcia logistycznego,
- gdy dostawa nowych elementów wymiennych zrealizowana jest w tej samej chwili, w której nastąpi uszkodzenie ostatniego elementu pracującego w systemie technicznym (przed dostawą zapasów części wymiennych nie było).

Wartość maksymalną τ można przyjąć w przypadku, gdy uszkodzenie ostatniego zdadnego elementu wymiennego występuje natychmiast po złożeniu zamówienia, dostawa zaś zostanie zrealizowana w czasie nieskończenie odległym od chwili t_0 .

Jeżeli dostawa nastąpi w okresie obejmującym zdefiniowaną rezerwę czasu, to nadsystem pozostaje w stanie zdadności. Gdy natomiast czas niezdadności systemu logistycznego będzie dłuższy niż określona rezerwa czasowa (przeznaczona na przy-

wrócenie zdatności systemu wspieranego), wówczas wystąpi niezdatność nadsystemu. Przez ζ oznaczono czas niezdatności nadsystemu, zdefiniowany jako przekroczenie dopuszczalnej rezerwy czasowej, przeznaczony na przywrócenie zdatności systemowi technicznemu. Zmienna ζ teoretycznie może przyjąć wartość minimalną ($\zeta = 0$), w przypadku gdy chwila dostawy części wymiennych do systemu logistycznego będzie jednocześnie chwilą przekroczenia dopuszczalnej rezerwy czasowej przeznaczony na usunięcie niezdatności systemu logistycznego. Jednocześnie wartość maksymalną zmienna ζ może przyjąć w przypadku, gdy nowa dostawa zostanie zrealizowana w czasie nieskończenie odległym od chwili przekroczenia dopuszczalnej rezerwy czasowej T_7 przez realizowany proces logistyczny.

Tak zdefiniowany model nadsystemu (z uwzględnieniem metody sterowania zapasami) przedstawiono na rysunku 6.10.



Rys. 6.10. Uproszczony model nadsystemu z uwzględnieniem wielkości zapasów elementów wymiennych w funkcji czasu ($Q = 5, s = 3$) [236]

Zastosowanie modelu „stałej wielkości zamawiania”, jako normy sterowania zapasami elementów w systemie wsparcia logistycznego, pozwala na zdefiniowanie zachowania się nadsystemu podczas pojedynczego cyklu zaopatrzenia:

- w chwili gdy poziom zapasów w systemie wsparcia logistycznego osiąga wielkość poziomu zamawiania s , generowane jest nowe zamówienie, którego realizacja trwa losowy odcinek czasu,

- do chwili realizacji nowej dostawy do systemu wsparcia logistycznego, system techniczny może wykorzystać (wymienić) jedynie określoną liczbę elementów wymiennych, znajdujących się w zapasie systemu wspierającego,

- od chwili nowej dostawy części wymiennych elementy są wykorzystywane zgodnie z pojawiającym się zapotrzebowaniem aż do chwili zmniejszenia stanu zapasu ponownie do poziomu zamawiania, wyznaczającego początek nowego cyklu zaopatrzeniowego,

- maksymalna liczba elementów, które może wykorzystać system techniczny w czasie jednego cyklu, równa jest wielkości dostawy Q .

Analityczny model niezdatności nadsystemu oparty jest na wyznaczeniu dwóch charakterystyk, opisujących prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności systemu wsparcia logistycznego (braku niezbędnych części wymiennych) oraz prawdopodobieństwo, że czas przywrócenia stanu zdatności systemu technicznego przekroczy dopuszczalną rezerwę czasową T_y .

W przypadku systemów z rezerwą zimną czas ich pracy jest sumą czasu pracy elementów (np. [57]):

$$T^n = T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n \quad (6.16)$$

Po założeniu, że czas pracy elementów jest niezależną zmienną losową, rozkład czasu pracy systemu jest splotem rozkładów czasu pracy elementów, zgodnie ze wzorem [57]:

$$F^{s+1}(t) = \int_0^t F^s(t-x)dF(x) \quad (6.17)$$

W związku z tym, dystrybuenta rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca losowy czas przejścia do stanu niezdatności systemu logistycznego, po założeniu ciągłości zmiennych, może być wyznaczona jako [57]:

$$\Psi(\tau) = F^{s+1}(t)(E(t+\tau) - E(t)) \quad (6.18)$$

gdzie: $F^{s+1}(t)$ – kompozycja rozkładu prawdopodobieństwa opisującego czas poprawnej pracy kolejnych $s + 1$ – elementów ($(s + 1)$ -krotny splot funkcji), $E(t)$ – dystrybuenta rozkładu prawdopodobieństwa czasu dostawy części wymiennych do systemu wsparcia logistycznego.

Znając prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności systemu logistycznego, należy określić prawdopodobieństwo, że omawiany nadsystem znajduje się w stanie niezdatności, spowodowanym brakiem części wymiennych w systemie wsparcia logistycznego, przez okres dłuższy niż założona rezerwa czasowa.

Po założeniu, że zmienna ξ określa losowy okres niezdatności nadsystemu, dystrybuanta, opisująca rozkład prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu, może być określona wzorem [212]:

$$B(\xi) = \Phi(t)(\Psi(t + \xi) - \Psi(t)) \quad (6.19)$$

gdzie: $\Phi(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa opisująca okres nadmiaru czasowego, $\Psi(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas realizacji zapotrzebowania systemu technicznego w niezbędne części wymienne.

Jednocześnie, gęstość rozkładu prawdopodobieństwa opisująca okres niezdatności nadsystemu, zgodnie z [212], można określić jako:

$$b(\xi) = \int_0^{\infty} \varphi(t)\psi(t + \xi)dt \quad (6.20)$$

gdzie: $\varphi(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa opisująca okres rezerwy czasowej, $\psi(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas reakcji systemu logistycznego.

Wówczas prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności nadsystemu w czasie pojedynczego cyklu zaopatrzenia, wynikające z braku elementów wymiennych, można m.in. opisać formułą:

$$P_{NN1j} = \int_0^{\infty} b(\tau)d\tau \quad (6.21)$$

6.2.2. NIEZAWODNOŚĆ ELEMENTU Z NIEPOMIJALNYM CZASEM ODNOWY

W praktyce często nie można pominąć czasu trwania operacji odnowy, prowadząc analizę niezawodności obiektu lub systemu.

W sytuacji gdy czas odnowy elementu technicznego jest znacznie dłuższy w stosunku do czasu jego zdatności, należy uwzględnić, że czas odnowy będzie zależał zarówno od czasu realizacji zapotrzebowania w niezbędne części wymienne τ , jak i od losowego czasu odnowy T_r systemu wspieranego. W tym przypadku uwzględnienie czasu wymian elementów powoduje, że:

- chwila pojawienia się uszkodzenia systemu wsparcia logistycznego nastąpi później niż w modelu nadsystemu, w którym pomija się czas odnowy elementu technicznego,

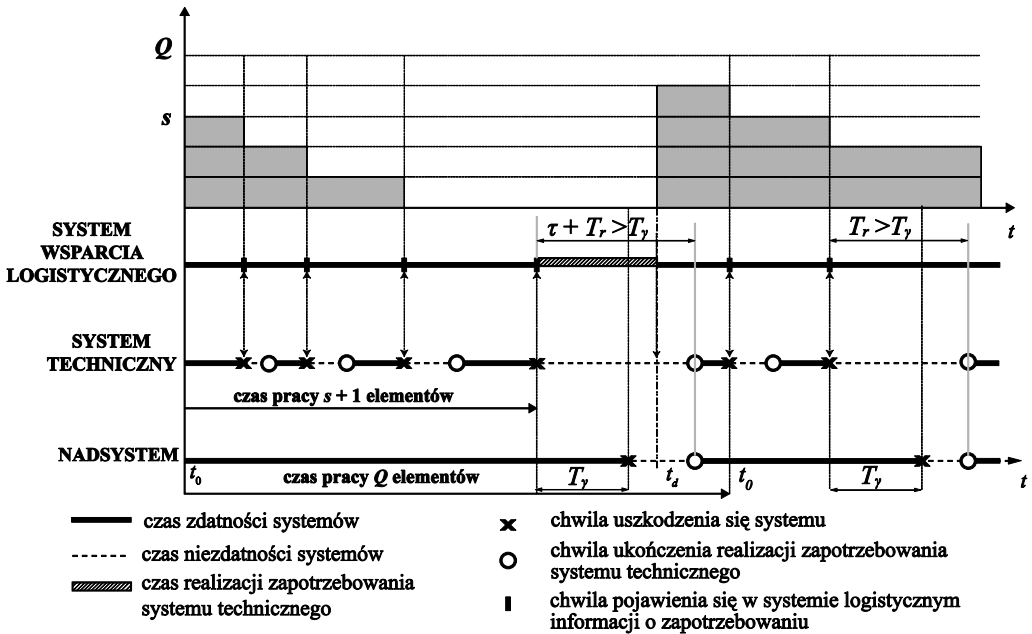
- nadsystem może przebywać w stanie niezdatności obejmującej zarówno możliwy czas niezdatności systemu wsparcia, jak i czas odnowy elementu technicznego.

Wówczas nadsystem z rezerwą czasową może przejść w stan niezdatności, jeżeli:

- czas dostawy elementów wymiennych, niezbędnych w procesie odnowy elementu technicznego, przekroczył dostępną rezerwę czasową (okres niezdatności nadsystemu obejmuje pozostały czas dostawy elementów wymiennych oraz czas odnowy elementu technicznego, licząc od chwili przekroczenia dopuszczalnej rezerwy T_γ);

- czas odnowy systemu wspieranego przekroczy dostępną rezerwę czasową (okres niezdatności nadsystemu obejmuje pozostały czas odnowy elementu technicznego, licząc od chwili przekroczenia dopuszczalnej rezerwy T_γ).

Funkcjonowanie tak zdefiniowanego nadsystemu zostało pokazane na rysunku 6.11.



Rys. 6.11. Model nadsystemu z niepomiąlnym czasem odnowy systemu technicznego ($Q = 5, s = 3$) [236]

Wystąpienie uszkodzenia systemu wsparcia powoduje, że dystrybucja rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca czas realizacji zapotrzebowania na części wymienne przez system wsparcia logistycznego, może zostać opisana zmodyfikowaną formułą [236]:

$$\Psi(\tau) = U(t)(E(t + \tau) - E(t)) \quad (6.22)$$

gdzie: $U(t)$ – kompozycja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa opisującego czas poprawnej pracy oraz czas odnowy kolejnych $s + 1$ elementów systemu technicznego ($(s + 1)$ -krotny spłot funkcji).

Rozkład $U(t)$ opisany jest wzorem [57]:

$$U(t) = \int_0^t F^{s+1}(t-x) dG^{s+1}(x) \quad (6.23)$$

Rozkład $F^{s+1}(t)$ oraz $G^{s+1}(t)$ można wyznaczyć ze wzoru:

$$G^{s+1}(t) = \int_0^t G^s(t-x) dG(x) \quad (6.24)$$

gdzie: $G^{s+1}(t)$ – kompozycja rozkładu prawdopodobieństwa, opisującego czas wymiany kolejnych $s + 1$ -elementów ($(s + 1)$ -krotny splot funkcji).

Zakładając, że zmienna losowa ξ_1 opisuje okres niezdatności nadsystemu uzależniony od czasu odnowy systemu logistycznego τ , jak również od losowego czasu odnowy T_r systemu technicznego, dystrybuantę funkcji prawdopodobieństwa, opisującą okres niezdatności analizowanego nadsystemu, można opisać wzorem [212]:

$$B_1(\xi_1) = \int_0^{\xi_1} B(\xi_1 - x) dG(x) \quad (6.25)$$

gdzie: $B(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca okres niezdatności nadsystemu wynikającej tylko z braku elementów wymiennych, $G(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas odnowy systemu technicznego.

W rozpatrywanym modelu [236] nadsystem w trakcie jednego cyklu zaopatrzeniowego $(Q - 1)$ -razy przejdzie w stan niezdatności spowodowany jedynie zbyt długim czasem naprawy. Przez $w(\xi_1)$ oznaczono funkcję gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, opisującą okres niezdatności nadsystemu z powodu przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej przez czas naprawy:

$$w(\xi_1) = \int_0^{\infty} f_2(t) g(t + \xi_1) dt \quad (6.26)$$

gdzie: $f_2(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, zmiennej losowej definiującej czas do chwili pojawienia się i -tego uszkodzenia nadsystemu w jednym cyklu zaopatrzenia:

$$f_2(t) = \begin{cases} \int_0^t f(x)\varphi(t-x)dx & \text{dla } i = 1 \\ \int_0^t f_{21}(x)\varphi(t-x)dx & \text{dla } i = 2, 3, \dots, s \\ \int_0^t f_{22}(x)\varphi(t-x)dx & \text{dla } i = s + 2, s + 3, \dots, Q \end{cases} \quad (6.27)$$

gdzie: $f_{2j}(t)$ – funkcje gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, zmiennej losowej definiującej czas poprawnej pracy oraz czas odnowy do chwili i -tego uszkodzenia systemu technicznego:

$$f_{21}(t) = \int_0^t f^i(x)g^{i-1}(t-x)dx \quad (6.28)$$

$$f_{22}(t) = \int_0^t f_{21}(x)\psi(t-x)dx \quad (6.29)$$

Jednocześnie, w jednym cyklu zaopatrzenia nadsystem jeden raz przejdzie w stan niezdatności, spowodowany przez brak części wymiennych i/lub zbyt długi czas odnowy systemu technicznego. W związku z tym, biorąc pod uwagę wszelkie możliwe przejścia nadsystemu w stan niezdatności w trakcie jednego cyklu zaopatrzenia, gęstość prawdopodobieństwa opisującą okres niezdatności nadsystemu można przedstawić jako:

$$b_2(\xi_1) = \frac{1}{Q}b_1(\xi_1) + \frac{Q-1}{Q}w(\xi_1) \quad (6.30)$$

gdzie: $b_1(\xi_1)$ – gęstość prawdopodobieństwa opisująca okres każdorazowej niezdatności nadsystemu podczas jednego cyklu zaopatrzenia.

Prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności w jednym cyklu zaopatrzenia można wyznaczyć zgodnie ze wzorem [236]:

$$P_{NNj} = \int_0^{\infty} b_2(t)dt \quad (6.31)$$

6.2.3. FUNKCJA GOTOWOŚCI NADSYSTEMU Z REZERWĄ CZASOWĄ

Biorąc pod uwagę definicje gotowości omówione w rozdziale 5, po założeniu, że wszystkie elementy pracujące w systemie są opisane identycznymi funkcjami rozkładu prawdopodobieństwa czasu pracy oraz czasu naprawy, gotowość systemu (obiektu) $A(t)$ można określić następującą funkcją [98]:

$$A(t) = 1 - F(t) + \int_0^t [1 - F(t-x)] dH(x) \quad (6.32)$$

gdzie: $F(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu pracy obiektu/systemu, $H(t)$ – funkcja odnowy systemu.

Zgodnie z założeniami modelu nadsystemu z rezerwą, czas odnowy nadsystemu obejmuje pozostały czas przywrócenia zdadności elementu technicznego, licząc od chwili przekroczenia ustalonej dostępnej rezerwy czasowej do chwili zakończenia operacji wymiany elementu/elementów uszkodzonych.

Wówczas po założeniu, że czas odnowy systemu technicznego jest pomijalnie mały, funkcja gotowości może zostać opisana zmodyfikowaną formułą (6.32):

$$A(t) = 1 - F_s(t) + \int_0^t [1 - F_s(t-x)] h(x) dx \quad (6.33)$$

gdzie: $F_s(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu pracy systemu, $h(t)$ – gęstość odnowy systemu.

Biorąc pod uwagę specyfikę omawianego nadsystemu z rezerwą czasową (przede wszystkim, uwzględniając możliwość pojawienia się braku części wymiennych oraz niezdatności nadsystemu), funkcja gęstości odnowy $h(t)$ jest zmienna w ciągu badanego cyklu zaopatrzenia:

- do chwili wykorzystania wszystkich elementów wymiennych znajdujących się w zapasie:

$$h_1(t) = \sum_{i=1}^s f_s^i(t) \quad (6.34)$$

- z chwilą, kiedy wszystkie elementy wymienne zostaną wykorzystane, nadsystem może przejść w stan niezdatności z powodu przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej przez proces realizacji zapotrzebowania systemu technicznego:

$$h_2(t) = \int_0^t f_s(t-x) b(x) dx \quad (6.35)$$

Drugi okres obejmuje czas poprawnej pracy $(s + 1)$ -wymiany elementu technicznego. W tym okresie nadsystem może przejść w stan niezdatności z powodu braku części wymiennych i/lub zbyt długiego czasu wymiany uszkodzonego elementu.

Trzeci okres obejmuje czas od chwili przybycia nowej dostawy części wymiennych do systemu logistycznego do chwili, w której poziom zapasów w systemie wspierającym osiągnie ponownie poziom zamawiania s . Gotowość zależy od:

- czasu poprawnej pracy $(Q - (s + 1))$ -elementów wymiennych oraz czasu ich wymiany,
- czasu realizacji zadania logistycznego.

W rezultacie z chwilą rozpoczęcia cyklu zaopatrzenia:

$$h_1(t) = \sum_{i=1}^s f_r^i(t) \quad (6.38)$$

gdzie: $f_r(t)$ – kompozycja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa funkcji $m(t)$ oraz $w(t)$, wyznaczana zgodnie ze wzorem:

$$f_r(t) = \int_0^t m(t-x)w(x)dx \quad (6.39)$$

gdzie: $m(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa pojawienia się uszkodzenia nadsystemu, wyznaczana na podstawie formuły:

$$m(t) = \left[\int_0^t f(t-x)\varphi(x)dx \right] \int_t^\infty g(x)dx \quad (6.40)$$

Z chwilą kiedy wszystkie elementy zapasowe nadsystemu w badanym cyklu zaopatrzenia zostaną wykorzystane i ostatni z nich ulegnie uszkodzeniu, nadsystem może przejść w stan niezdatności dodatkowo spowodowany przez brak części wymiennych:

$$h_2(t) = \int_0^t m(t-x)b_2(x)dx \quad (6.41)$$

Chwila każdego kolejnego uszkodzenia się systemu i jego odnowy może zostać przesunięta w czasie, co odzwierciedla gęstość odnowy $h_3(t)$:

$$h_3(t) = \sum_{i=s+2}^Q \int_0^t f_r^i(t-x) \psi(x) dx \quad (6.42)$$

Funkcja gęstości odnowy nadsystemu z rezerwą czasową przyjmuje wówczas postać zgodnie ze wzorem (6.37), a funkcja gotowości jest wyznaczana zgodnie ze wzorem (6.33).

Analizując stacjonarne zachowanie się nadsystemu z rezerwą czasową, współczynnik gotowości w jednym cyklu zaopatrzenia można przedstawić za pomocą następujących wzorów [165]:

- dla nadsystemu z pomijalnym czasem odnowy:

$$A = 1 - \frac{E[\xi]}{QE[T_o] + E[\tau]} \quad (6.43)$$

- dla nadsystemu w z niepomijalnym czasem odnowy:

$$A = 1 - \frac{E[\xi_1]}{Q(E[T_o] + E[T_r]) + E[\tau]} \quad (6.44)$$

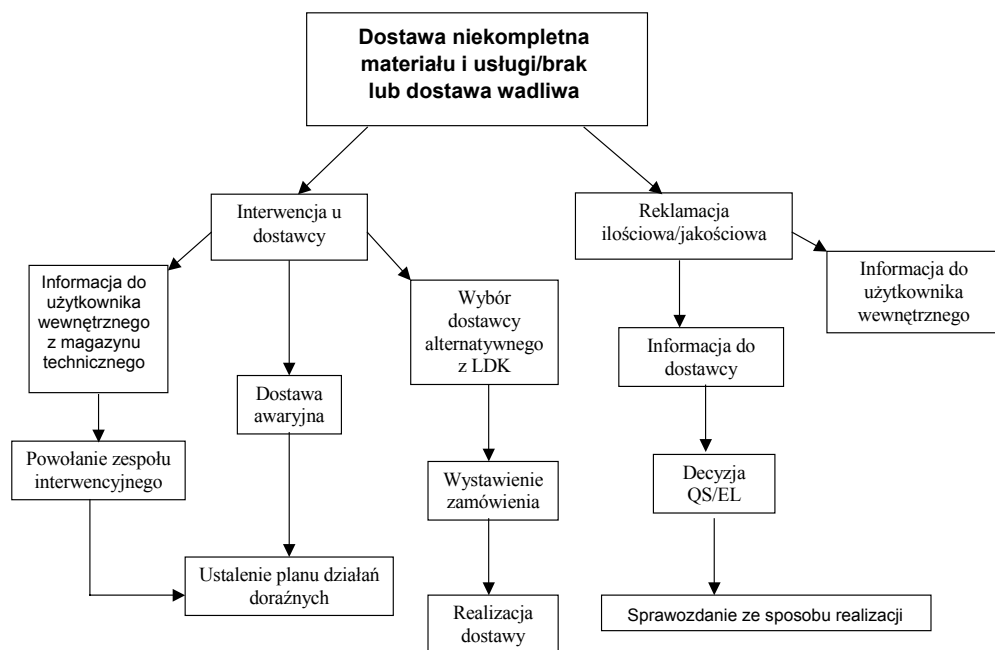
6.2.4. PRZYKŁAD PROCEDUR ODNOWY ELEMENTU LOGISTYCZNEGO

Zapobieganie pojawianiu się błędów i podnoszenie niezawodności elementu logistycznego wymaga m.in. sformułowania procedur postępowania w przypadku pojawienia się błędu i konieczności jego usunięcia/naprawy. Przykład takiej procedury (plan awaryjny dostaw materiałów i usług [111]) opracowanej dla przedsiębiorstwa przemysłu motoryzacyjnego pokazano na rysunku 6.13. Stosuje się ją w razie obiektywnych trudności w zapewnieniu terminowej dostawy. Istotnymi elementami tego planu są: analiza dokumentacji związanej z dostawami, ocena jakości, rozchód, uwagi z produkcji. W rezultacie stwierdzono, że problem należy rozwiązywać dwoma drogami:

- interwencja u dostawcy i próba polubownego rozwiązania problemu,
- oficjalna reklamacja ilościowa lub jakościowa.

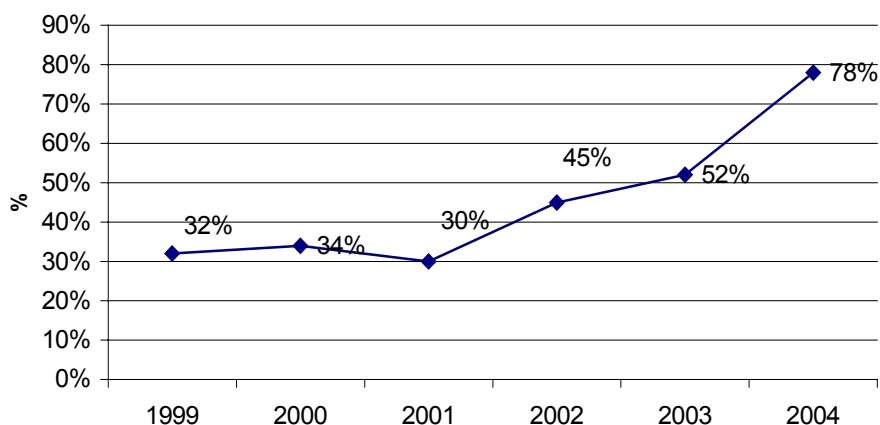
Konsekwencje takiego działania mogą być różne:

- zrozumienie problemu i szukaniu drogi do jego rozwiązania,
- zerwanie umowy o współpracę.



Rys. 6.13. Plan awaryjny dostaw materiałów i usług [111]

Efektywność wdrożonego sposobu przeciwdziałania błędom wyraża się m.in. wzrostem prawidłowych dostaw – udział takich dostaw dla analizowanego przedsiębiorstwa pokazano na rysunku 6.14. Widoczny jest istotny wzrost prawidłowo zrealizowanych zadań w procesie dostawy.



Rys. 6.14. Udział dostaw we właściwym dniu i we właściwej ilości (średnia roczna) [111]

7. MODELE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU TECHNICZNEGO

Modelowanie niezawodności systemu wymaga, zgodnie z rozdziałem 3, zdefiniowania pojęcia jego struktury niezawodności. Struktura ta wyraża zależność uszkodzeń systemu od uszkodzeń jego elementów. Jeżeli modelem matematycznym systemu jest para uporządkowana $\langle N; \phi \rangle$, to:

- N oznacza zbiór liczb naturalnych przyporządkowanych poszczególnym elementom systemu,
- ϕ jest funkcją określającą stan systemu zależnie od stanu jego elementów (ϕ nazywa się strukturą systemu).

Strukturę niezawodnościową systemu trzeba odróżnić od innych struktur tego systemu, np. od jego struktury funkcjonalnej, która dotyczy tego, w jaki sposób współdziałają elementy podczas wykonywania zadań nałożonych na system [98]. Należy również zaznaczyć, że struktura niezawodnościowa systemu zależy od [89]:

- struktury funkcjonalnej systemu, m.in. od tego w jaki sposób elementy systemu są połączone konstrukcyjnie,
- zadania, które ma dany system wykonać.

Strukturę niezawodności złożonych systemów technicznych można analizować różnymi metodami. Najczęściej korzysta się [143] ze schematu blokowego i zapisu analitycznego. W przypadku wielu struktur złożonych nie można przedstawić ich struktury za pomocą schematu blokowego – wprowadza się wówczas pojęcie pseudostruktury [89] i korzysta z tzw. ścieżek zdatności i przekrojów niezdatności.

W omawianych modelach najczęściej trzeba założyć, że każdy element systemu może być w jednym z dwu możliwych stanów: w stanie zdatności i w stanie niezdatności. Zakłada się również, że system może być tylko w stanie zdatności lub w stanie niezdatności i że zależy to wyłącznie od stanu elementów systemu. Wówczas dla elementu x_i ($i = 1, 2, \dots, n$):

$$x_i = \begin{array}{l} 0 - \text{element niezdatny} \\ 1 - \text{element zdalny} \end{array} \quad (7.1)$$

Stan systemu jest w pełni określony przez stan jego elementów:

$$\varphi(x) = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7.2)$$

gdzie: $\varphi(x)$ – strukturalna funkcja systemu.

$$\varphi_i = \begin{cases} 0 & \text{– system niezdatny} \\ 1 & \text{– system zdatny} \end{cases} \quad (7.3)$$

W tak zdefiniowanej klasie binarnych, w sensie niezawodnościowym, systemów analizuje się przede wszystkim tzw. systemy o strukturach koherentnych (monotonicznych). System ma strukturę koherentną, jeżeli [89]:

- $\varphi(\mathbf{1}) = 1$, gdzie $\mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)$, tzn. system jest zdatny, gdy wszystkie elementy systemu są zdatne,

- $\varphi(\mathbf{0}) = 0$, gdzie $\mathbf{0} = (0, 0, \dots, 0)$, tzn. system jest uszkodzony, gdy wszystkie elementy systemu są uszkodzone,

- $\varphi(x) \geq \varphi(y)$, gdy $x \geq y$, gdzie $x \geq y$ oznacza, że $x_i \geq y_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), tzn. uszkodzenie dowolnego elementu nie poprawia niezawodności systemu.

Wśród wielu struktur niezawodności można wyróżnić struktury podstawowe, które można zredukować do struktury szeregowej i równoległej oraz struktury złożone (np. [12]).

Do modelowania systemu logistycznego zostaną wykorzystane modele niezawodności systemu odnawialnego. Opis niezawodności systemu z uwzględnieniem wielu uszkodzeń i odnów jest na ogół dokonywany dla kilku założeń, m.in. [12]:

- każdy element jest w stanie użytkowania, jeżeli tylko nie jest w stanie obsługiwanego lub oczekiwania na obsługiwanie,

- podczas obsługiwanego nie mogą wystąpić dalsze uszkodzenia elementów systemu,

- obsługi są wykonywane przez jedną ekipę zgodnie z przyjętą strategią obsług,

- elementy rezerwowe są naprawiane bez przerywania użytkowania systemu,

- element po naprawie jest tak dobry (niezawodny) jak nowy,

- czas poprawnej pracy i czas naprawy są niezależnymi ciągłymi zmiennymi losowymi ze skończoną wartością oczekiwaną i wariancją,

- pomija się obsługi profilaktyczne, przełącznik jest idealny, wsparcie logistyczne jest nieograniczone.

Biorąc pod uwagę problemy niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania systemów logistycznych najczęściej (np. [257]) stosuje się modele Markowa lub semi-Markowa. Można wówczas zdefiniować dodatkowe punkty na osi czasu pozwalające na uwzględnienie losowych zdarzeń ograniczających ciągły przepływ towarów (np. uszkodzenia środków transportu lub urządzeń przeładunkowych, błędy w przepływie informacji) oraz zamodelowanie negatywnych skutków takich zdarzeń dla otoczenia systemu transportowego (zagadnień bezpieczeństwa).

7.1. PROCES MARKOWA

Zastosowanie procesów Markowa (np. [67]) pozwala na wyznaczenie prawdopodobieństwa znajdowania się systemu w ustalonej chwili czasu w dowolnym z analizowanych stanów. Metoda polega na opisanu stochastycznego procesu uszkodzeń i napraw odpowiednim układem równań różniczkowych, których rozwiązanie pozwala określić rozkład prawdopodobieństwa przebywania w poszczególnych stanach procesu oraz prawdopodobieństwo zmian stanu.

Proces Markowa jest procesem stochastycznym, w którym dla dowolnego ciągu parametrów $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ oraz dowolnych wartości x_0, x_1, \dots, x_n prawdopodobieństwo warunkowe [67]:

$$\Pr [X(t_n) < x_n | X(t_{n-1}) = x_{n-1}, \dots, X(t_0) = x_0] = \Pr [X(t_n) < x_n | X(t_{n-1}) = x_{n-1}] \quad (7.4)$$

zależy wyłącznie od stanu procesu w chwili poprzedzającej.

Punktem wyjścia oceny niezawodności systemu opisanego grafem stanów niezawodnościowych jest rozwiązanie układu równań stanu. Prawdopodobieństwo i -tego stanu można określić za pomocą prawdopodobieństwa przejścia na podstawie twierdzenia o prawdopodobieństwie zupełnym [261]:

$$P_i(t+u) = \sum_{r=0}^{r=N} P_r(t) P_{ri}(u); \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (7.5)$$

Zależności takie noszą nazwę układu równań stanu procesu stochastycznego $Z(t)$ i opisują niezawodnościowe zachowanie systemu.

Ogólną metodą rozwiązania jest przekształcenie równania stanu do postaci różniczkowej, gdy $u \rightarrow 0$. Odejmując obustronnie $P_i(t)$ oraz dzieląc przez u , otrzymujemy:

$$\frac{P_i(t+u) - P_i(t)}{u} = \sum_{r=0}^{r=N} P_r(t) \frac{P_{ri}(u) - P_i(t)}{u}. \quad (7.6)$$

Ogólne rozwiązanie tego układu równań, gdy $u \rightarrow 0$, jest możliwe tylko wtedy, gdy istnieją skończone granice:

$$q_{ij} = \lim_{u \rightarrow 0} \frac{1}{u} P_{ij}(u), \quad i \neq j \quad (7.7)$$

oraz

$$q_{ii} = \lim_{u \rightarrow 0} \frac{1}{u} (P_{ii}(u) - 1)$$

nazywane intensywnościami przejścia ze stanu Z_i do stanu Z_j oraz intensywnościami pozostania w stanie Z_i . Ponieważ suma prawdopodobieństwa przejścia ze stanu Z_i do wszystkich stanów jest równa 1, dlatego

$$\sum_{j=0}^{i=N} q_{ij} = \lim_{u \rightarrow 0} \frac{1}{u} \sum_{j=0}^{j=N} (P_{ij}(u) - 1) = 0. \quad (7.8)$$

Sens fizyczny intensywności przejścia zależy od przyczyny zmiany stanu z Z_i na Z_j . Jeżeli przyczyną jest uszkodzenie elementu, to intensywność przejścia jest określona przez intensywność uszkodzenia tego elementu. Jeżeli natomiast przyczyną zmiany stanu jest naprawa elementu, to intensywność przejścia q_{ij} jest określona przez intensywność naprawy. Niekiedy jednak wyznaczenie q_{ij} nie jest tak oczywiste i wówczas należy najpierw wyznaczyć prawdopodobieństwo przejścia $P_{ij}(u)$, uwzględniając wszystkie konieczne warunki takiego przejścia, a następnie skorzystać z definicji o istnieniu skończonych granic układu równań.

Suma intensywności przejścia ze stanu Z_i do wszystkich możliwych stanów systemu jest zawsze równa 0, dlatego q_{ij} można wyznaczyć na podstawie zależności (7.8). Wszystkie pozostałe intensywności przejścia q_{ij} :

$$q_{ii} = - \sum_{i \neq j} q_{ij} \quad (7.9)$$

Jeżeli istnieją wszystkie intensywności przejścia q_{ij} , to układ równań stanu można przekształcić do postaci różniczkowej

$$\frac{d}{dt} P_i(t) = \sum_{r=0}^{r=N} P_r(t) q_{ri}; \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (7.10)$$

W celu uproszczenia dalszych zapisów definiuje się [67] wektor prawdopodobieństwa stanu:

$$\mathbf{P}(t) = [P_0(t), P_1(t), \dots, P_N(t)] \quad (7.11)$$

oraz kwadratową macierz intensywności przejścia:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{00} & q_{01} & \dots & q_{0N} \\ q_{10} & q_{11} & \dots & q_{1N} \\ q_{20} & q_{21} & \dots & q_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{N0} & q_{N1} & \dots & q_{NN} \end{bmatrix}. \quad (7.12)$$

Układ równań różniczkowych można zapisać w postaci macierzowej:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t) \times \mathbf{Q} \quad (7.13)$$

Jednoznaczne rozwiązanie układu równań wymaga znajomości początkowego rozkładu procesu zmian stanu systemu.

Najprostszą i najogólniejszą metodą rozwiązywania równania z warunkiem początkowym jest wykorzystanie przekształcenia Laplace'a:

$$\mathbf{P}^*(s) = \alpha[\mathbf{P}(t); s] = \int_0^{\infty} \mathbf{P}(t) e^{-st} dt \quad (7.14)$$

Rozwiązanie operatorowe ma wtedy postać:

$$\mathbf{P}^*(s) = \mathbf{P}(0^+) \times [s\mathbf{I} - \mathbf{Q}]^{-1} \quad (7.15)$$

W celu wyznaczenia rozwiązania w dziedzinie czasu należy dokonać przekształcenia odwrotnego. Wyznaczony jako rozwiązanie układu rozkład prawdopodobieństwa $P_i(t)$ przebywania w i -tym stanie niezawodnościowym stanowi podstawę do wyznaczenia wszystkich miar niezawodnościowych.

Pierwszym etapem takiej oceny jest wyznaczenie miar podstawowych, czyli funkcji niezawodności $R(t)$ dla systemów nienaprawialnych lub funkcji gotowości $K_g(t)$ dla systemów naprawialnych. Ponieważ stany systemu są rozłączne, miary te będą równe sumie prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie sprawności.

Korzystając z twierdzenia ergodycznego (np. [261]), można wyznaczyć także rozkład graniczny procesu. Jeżeli ${}_t \lim_{\infty} P_j(t) = P_j$, to:

$${}_t \lim_{\infty} \frac{d}{dt} P_j(t) = 0. \quad (7.16)$$

Wynika z tego, że gdy $t \rightarrow \infty$ układ równań różniczkowych stanu przybiera postać układu równań liniowych ze względu na P_i . Odpowiednio równanie wektorowe można wówczas zapisać w postaci:

$$\mathbf{P} \times \mathbf{Q} = \mathbf{0}. \quad (7.17)$$

Ponieważ układ równań jest nieoznaczony, więc w celu wyznaczenia rozwiązania należy dowolne z równań tego układu zastąpić warunkiem normującym:

$$\sum_{i=0}^{i=N} P_i = 1. \quad (7.18)$$

Jeżeli $Z_+ \subset Z$ oznacza zbiór stanów zdadności, a $Z_- \subset Z$ zbiór stanów niezdadności, to na podstawie rozkładu stacjonarnego procesu zmian stanu systemu naprawialnego można wyznaczyć współczynnik gotowości $K_g(t)$ na podstawie zależności:

$$K_g(t) = \sum_{\{i: Z_i \in Z_+\}} P_i(t) = 1 - \sum_{\{j: Z_j \in Z_-\}} P_j(t) \quad (7.19)$$

Dla systemów nienaprawialnych, wyznaczenie charakterystyk stacjonarnych nie ma sensu, gdyż $R(t) \rightarrow 0$, gdy $t \rightarrow \infty$.

7.2. PROCESY SEMIMARKOWSKIE

Procesy semimarkowskie są procesami stochastycznymi. Niech [67] S oznacza zbiór dyskretny (skończony lub przeliczalny) i niech $R_+ = [0, \infty)$ oraz $N_0 = \{0, 1, 2, \dots\}$. Przyjęto, że $\xi_n, \mathcal{G}_n, n = 0, 1, 2, \dots$ są zmiennymi losowymi określonymi na wspólnej przestrzeni probabilistycznej (Ω, Φ, P_ξ) o wartościach w zbiorach S oraz R_+ odpowiednio. Dwuwymiarowy ciąg losowy $\{\xi_n, \mathcal{G}_n\}, n = 0, 1, 2, \dots$ nazywa się markowskim procesem odnowy, jeżeli dla dowolnych $i_0, \dots, i_{n-1}, i \in S, t_0, \dots, t_n \in R_+, n \in N_0$:

$$1. \quad \begin{aligned} & P\{\xi_{n+1} = j, \mathcal{G}_{n+1} \leq t \mid \xi_n = i, \mathcal{G}_n = t_n, \dots, \xi_0 = i_0, \mathcal{G}_0 = t_0\} \\ & = P\{\xi_{n+1} = j, \mathcal{G}_{n+1} \leq t \mid \xi_n = i\} = Q_{ij}(t) \end{aligned} \quad (7.20)$$

$$2. \quad P\{\xi_0 = i_0, \mathcal{G}_0 = 0\} = P\{\xi_0 = i_0\} = p_{i_0} \quad (7.21)$$

Markowski proces odnowy jest jednorodnym dwuwymiarowym łańcuchem Markowa, którego prawdopodobieństwo przejścia $Q_{ij}(t)$ zależy wyłącznie od dyskretnej współrzędnej. Macierz funkcyjną:

$$\mathbf{Q}(t) = [Q_{ij}(t) : i, j \in S] \quad (7.22)$$

nazywa się jądrem odnowy.

Z definicji tej również wynika [67], że ciąg $\{\xi_n : n = 0, 1, 2, \dots\}$ jest jednorodnym łańcuchem Markowa o prawdopodobieństwach przejścia:

$$p_{ij} = P\{\xi_{n+1} = j \mid \xi_n = i\} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t) \quad (7.23)$$

Niech:

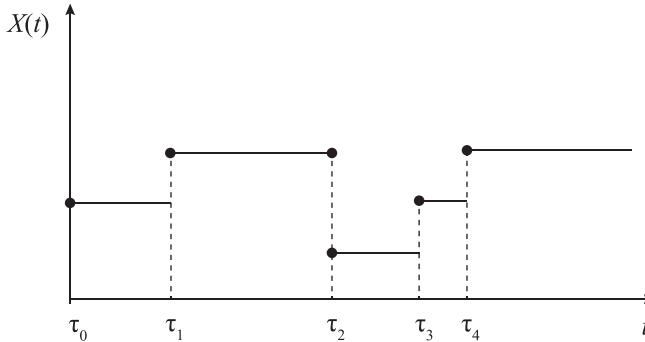
$$\begin{aligned}\tau_0 &= \mathcal{G}_0 = 0, \\ \tau_n &= \mathcal{G}_1 + \dots + \mathcal{G}_n, \\ \tau_\infty &= \sup \{ \tau_n : n \in N_0 \}\end{aligned}$$

Wówczas proces stochastyczny $\{X(t): t \geq 0\}$ określony wzorem:

$$X(t) = \xi_n \quad \text{dla } t \in [\tau_n, \tau_{n+1}) \quad (7.24)$$

nazywa się procesem semimarkowskim.

Z równania (7.24) wynika, że realizacje procesu są funkcjami przyjmującymi stałe wartości w przedziałach $[\tau_n, \tau_{n+1})$. Realizację procesu semimarkowskiego przedstawiono na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Realizacja procesu semimarkowskiego [67]

Ponieważ $X(\tau_n) = \xi_n$, więc ciąg zmiennych losowych $\{X(\tau_n): n = 0, 1, 2, \dots\}$ jest łańcuchem Markowa o macierzy prawdopodobieństw przejścia:

$$P = [p_{ij} : i, j \in S]. \quad (7.25)$$

Ciąg zmiennych losowych $\{X(\tau_n): n = 0, 1, 2, \dots\}$ nazywamy łańcuchem Markowa włożonym w proces SM $\{X(t): t \geq 0\}$. Z definicji markowskiego procesu odnowy wynika, że:

$$\begin{aligned} & P\{X(\tau_{n+1}) = j, \tau_{n+1} - \tau_n \leq t / X(\tau_n) = i, X(\tau_{n-1}), \dots, X(\tau_0), \tau_n - \tau_{n-1}, \dots, \tau_1\} \\ &= P\{X(\tau_{n+1}) = j, \tau_{n+1} - \tau_n \leq t / X(\tau_n) = i\} = Q_{ij}(t) \end{aligned} \quad (7.26)$$

Warunek ten oznacza, że stan procesu semimarkowskiego oraz czas jego trwania zależy wyłącznie od stanu poprzedniego, a nie zależy od stanów wcześniejszych i czasów ich trwania.

Podstawowym sposobem definiowania procesu semimarkowskiego jest określenie jądra oraz rozkładu początkowego [65].

Funkcja:

$$F_{ij}(t) = P\{\tau_{n+1} - \tau_n \leq t \mid X(\tau_n) = i, X(\tau_{n+1}) = j\} = \frac{Q_{ij}(t)}{p_{ij}} \quad (7.27)$$

jest dystrybuantą zmiennej losowej T_{ij} oznaczającej czas trwania stanu i , gdy następnym stanem będzie stan j . Z ostatniego wzoru wynika równość:

$$Q_{ij}(t) = p_{ij}F_{ij}(t) \quad (7.28)$$

Funkcja:

$$G_i(t) = P\{\tau_{n+1} - \tau_n \leq t \mid X(\tau_n) = i\} = \sum_{j \in S} Q_{ij}(t) \quad (7.29)$$

jest dystrybuantą rozkładu czasu trwania stanu i . Zmienną losową o rozkładzie określonym przez tę dystrybuantę oznacza się symbolem T_i .

Trzy podstawowe sposoby definiowania procesów semimarkowskich [67]:

- za pomocą pary $(\mathbf{p}, \mathbf{Q}(t))$,

gdzie: \mathbf{p} – rozkład początkowy procesu, $\mathbf{Q}(t)$ – macierz dystrybuant rozkładu czasu przejścia ze stanu i do j ;

- za pomocą trójki $(\mathbf{p}, \mathbf{P}, \mathbf{F}(t))$,

gdzie: \mathbf{p} – rozkład początkowy procesu, \mathbf{P} – macierz prawdopodobieństwa przejścia, $\mathbf{F}(t)$ – macierz dystrybuant rozkładu czasu trwania stanu i , gdy następnym będzie stan j ;

- za pomocą trójki $(\mathbf{p}, \mathbf{e}(t), \mathbf{G}(t))$,

gdzie: \mathbf{p} – rozkład początkowy procesu, $\mathbf{e}(t)$ – macierz prawdopodobieństwa przejścia procesu ze stanu i do j , gdy w stanie i proces przebywa przez czas x , $\mathbf{G}(t)$ – macierz dystrybuant rozkładu czasu trwania stanów.

Między procesem semimarkowskim a jednorodnym procesem Markowa o dyskretnym zbiorze stanów i zbiorze parametrów $T = [0, \infty)$ istnieje ścisły związek. Każdy proces Markowa $\{X(t): t \geq 0\}$ o dyskretnym zbiorze stanów S z przedziałami stałych i prawostronnie ciągłych realizacjach oraz macierzy intensywności zmian stanów $\mathbf{\Lambda} = [\lambda_{ij}: i, j \in S]$ takiej, że $0 < -\lambda_{ii} = \lambda_i < 0$, jest procesem semi-Markowa o jądrze $\mathbf{Q}(t) = [Q_{ij}(t): i, j \in S]$, gdzie:

$$Q_{ij}(t) = p_{ij}(1 - e^{-\lambda_i t}), \quad t \geq 0 \quad (7.30)$$

przy czym:

$$p_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_i} \quad \text{dla } i \neq j \quad \text{oraz } p_{ii} = 0 \quad (7.31)$$

Procesy semimarkowskie stanowią zatem szerszą klasę procesów stochastycznych, zawierającą w sobie procesy Markowa wspomnianego rodzaju.

W modelach niezawodności parametry i charakterystyki procesu semi-Markowa przekładają się na parametry i charakterystyki niezawodności modelowanego obiektu. Do istotnych charakterystyk procesu należy prawdopodobieństwo przejścia zdefiniowane jako prawdopodobieństwo warunkowe:

$$P_{ij}(t) = P\{X(t) = j \mid X(0) = i\}, \quad i, j \in S \quad (7.32)$$

Prawdopodobieństwo spełnia równania Fellera [52]:

$$P_{ij}(t) = \delta_{ij}[1 - G_i(t)] + \sum_{k \in S} \int_0^t P_{kj}(t-x) dQ_{ik}(x), \quad i, j \in S \quad (7.33)$$

Rozwiązanie tego układu można znaleźć [66] posługując się przekształceniem Laplace'a–Stieltjesa. Układ ten poddany transformacji Laplace'a–Stieltjesa przyjmuje postać:

$$\tilde{p}_{ij}(s) = \delta_{ij}[1 - \tilde{g}_i(s)] + \sum_{k \in S} \tilde{q}_{ik}(s) \tilde{p}_{kj}(s), \quad i, j \in S \quad (7.34)$$

gdzie:

$$\tilde{p}_{ij}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dP_{ij}(t), \quad \tilde{q}_{ik}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dQ_{ik}(t), \quad \tilde{g}_i(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dG_i(t)$$

Układ ten w notacji macierzowej ma postać:

$$\tilde{\mathbf{p}}(s) = [I - \tilde{\mathbf{g}}(s)] + \tilde{\mathbf{q}}(s) \tilde{\mathbf{p}}(s) \quad (7.35)$$

Stąd:

$$\tilde{\mathbf{p}}(s) = [I - \tilde{\mathbf{q}}(s)]^{-1} [1 - \tilde{\mathbf{g}}(s)] \quad (7.36)$$

W wielu przypadkach prawdopodobieństwo warunkowe $P_{ij}(t)$ oraz prawdopodobieństwo stanów:

$$P_j(t) = P\{X(t) = j\}, \quad j \in S \quad (7.37)$$

po pewnym czasie stabilizują się i zbiegają do wartości stałych. Prawdopodobieństwo można więc zastąpić prawdopodobieństwem granicznym:

$$P_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{ij}(t), \quad P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P_j(t) \quad (7.38)$$

Jeżeli włożony łańcuch Markowa w proces semimarkowski o skończonym zbiorze stanów S i jądrze typu ciągłego zawiera jedną klasę C stanów powracających dodatnich takich, że dla każdego stanu $i \in S, j \in C, f_{ij} = 1$ oraz dodatnie wartości oczekiwane $E(T_i), i \in S$ są skończone, to istnieje prawdopodobieństwo graniczne i wyraża się ono wzorem:

$$P_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{ij}(t) = P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P_j(t) = \frac{\pi_j E(T_j)}{\sum_{i \in S} \pi_i E(T_i)} \quad (7.39)$$

gdzie prawdopodobieństwo $\pi_j, j \in S$ stanowi rozkład stacjonarny włożonego łańcucha Markowa, a więc rozkład, który spełnia układ równań liniowych:

$$\sum_{i \in S} \pi_i p_{ij} = \pi_j, \quad j \in S, \quad \sum_{i \in S} \pi_i = 1 \quad (7.40)$$

8. MODELE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU LOGISTYCZNEGO

System logistyczny, pod kątem teorii i inżynierii eksploatacji, należy do klasy systemów, których okres eksploatacji składa się z rozdzielnych przedziałów czasu. W każdym z tych przedziałów system logistyczny realizuje różne zadania, których wyniki muszą złożyć się na osiągnięcie celu końcowego. Takie systemy nazywa się w literaturze (np. [18]) systemami o zadaniach (misjach) okresowych (*Phased Mission System PMS*). Ponieważ koncepcja okresowego wykonywania zadań przez system logistyczny dotyczy znacznie szerszego zbioru systemów niż to wynika z pojęcia *mission*, proponuje się w [18] stosowanie nazwy systemu wielofazowe (*Multiple-Phased Systems MPS*).

W systemach wielofazowych poszczególne fazy mogą charakteryzować się wieloma różnymi właściwościami [18]:

- zadanie wykonywane w danej fazie może różnić się od zadań wykonywanych w pozostałych fazach,
- wymagania dotyczące osiągnięć i niezawodności mogą się różnić pomiędzy fazami,
- podczas niektórych faz system może być poddany szczególnie silnym oddziaływaniom otoczenia, co może wywoływać znaczący wzrost intensywności uszkodzeń,
- struktura systemu może zmieniać się w funkcji czasu, w zależności od wymagań funkcjonalnych i niezawodnościowych sformułowanych dla fazy, która jest aktualnie wykonywana,
- prawidłowe wykonanie zadań w danej fazie może przynieść inne efekty dla systemu niż te osiągnięte w innych fazach.

Tak więc, w stosunku do eksploatacji systemu logistycznego określenie systemu wielofazowego wydaje się adekwatne.

Podczas modelowania niezawodności systemu, korzystanie z koncepcji systemu wielofazowego pozwala na lepsze przybliżenie rzeczywistości ze względu na następujące założenia:

- eksploatacyjna struktura systemu nie jest stała, może zmieniać się pomiędzy fazami w zależności od ważności/krytyczności danej fazy,

- historia uszkodzeń lub napraw danego elementu w danej fazie wywiera wpływ na zachowanie systemu w kolejnej fazie, stąd stan komponentu na początku danej fazy zależy od stanu danego komponentu na końcu poprzedniej fazy,

- kryteria definiujące poziom spełnienia wymagań dotyczących osiągnięć i niezawodności w danej fazie mogą różnić się od tych wartości dla kolejnej fazy.

Założenia te są w różny sposób wykorzystywane w modelach znanych z literatury. Znane są dwa rodzaje modeli: modele syntetyczne ujmujące cały okres eksploatacji systemu i modele, w których poszczególne fazy są rozpatrywane oddzielnie.

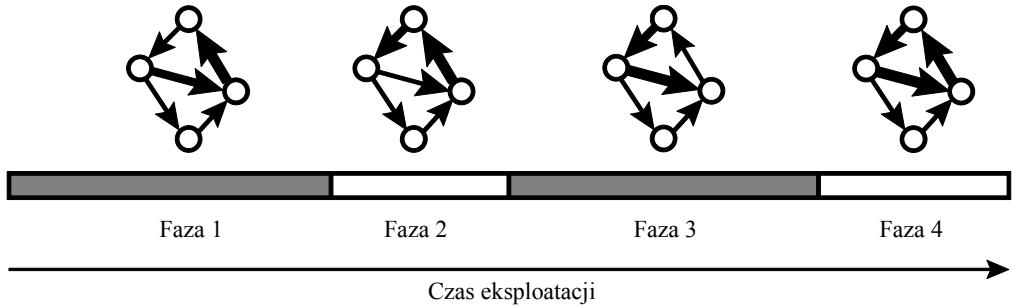
Modele syntetyczne, w których wszystkie fazy są reprezentowane razem (np. [4], [7], [44], [210]), charakteryzują się wieloma zaletami ze względu na możliwość wykorzystania podobieństw pomiędzy fazami w celu otrzymania modelu zwartego, w którym wszystkie fazy są prawidłowo wbudowane. Budowanie takiego syntetycznego modelu może nie być łatwe ani wygodne w tych przypadkach, w których wspomniane różnice przeważają nad podobieństwem pomiędzy poszczególnymi fazami.

Z drugiej strony oddzielne modelowanie każdej fazy (np. [48], [140], [248]) pozwala na natychmiastowe charakteryzowanie różnic pomiędzy fazami, w warunkach różnic intensywności uszkodzeń i różnic wymagań strukturalnych. Każda faza może być rozwiązywana oddzielnie. Otrzymane wyniki są łączone z tymi z innych faz, aby otrzymać całościowy wynik dla systemu. Główna słabość rozdzielnego podejścia do modelowania (niewystępująca w modelach syntetycznych) polega na konieczności określenia zależności pomiędzy fazami, które trzeba wziąć pod uwagę w rozdzielaniu komponentów pomiędzy fazami. Takie podejście wymaga wyraźnie określonego mapowania stanów komponentu na końcu fazy w stosunku do stanu komponentu na początku fazy następnej. Takie zadanie jest koncepcyjnie proste, ale może być niewygodne i na pewno pozostaje potencjalnym źródłem błędów dla złożonych systemów.

8.1. WIELOFAZOWY MODEL NIEZAWODNOŚCI

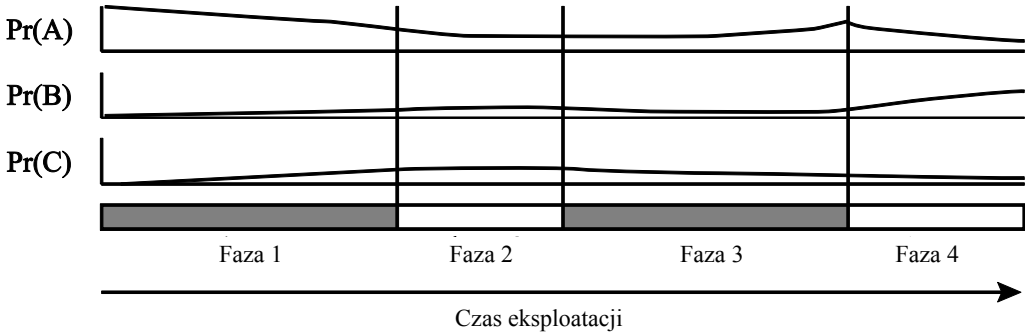
Do modelowania niezawodności systemu logistycznego wykorzystano model Markowa, przyjmując ciągły czas eksploatacji systemu i dyskretne stany niezawodnościowe systemu. Możliwe było wykorzystanie standardowych procedur omówionych w rozdziale 7, adaptowanych na potrzeby modelu wielofazowego systemu. Otrzymana przestrzeń stanów systemu dotyczy w pierwszym kroku stanów poszczególnych faz eksploatacji systemu, a wyniki syntetyczne zależą od przyjętego sposobu łączenia wyników cząstkowych w wynik końcowy. Z otrzymanego modelu można oszacować podstawowe miary oceny niezawodności systemu, takie jak np. prawdopodobieństwo prawidłowego zrealizowania zadania logistycznego, prawdopodobieństwo wystąpienia błędu lub uszkodzenia w funkcji czasu wykonywania zadania, lub średni czas między uszkodzeniami.

Podział czasu eksploatacji systemu pomiędzy poszczególne fazy pokazano na rysunku 8.1. Jak widać na tym przykładzie, struktura systemu (grafy) w poszczególnych fazach jest taka sama, natomiast różne są intensywności przejść między stanami, ilustrowane grubością odpowiednich linii.



Rys. 8.1. Schemat podziału czasu eksploatacji systemu między fazy

Rozwiązanie takiego modelu, na przykład obliczenie prawdopodobieństwa przebywania w poszczególnych stanach w kolejnych fazach, może przebiegać tak jak na rysunku 8.2.

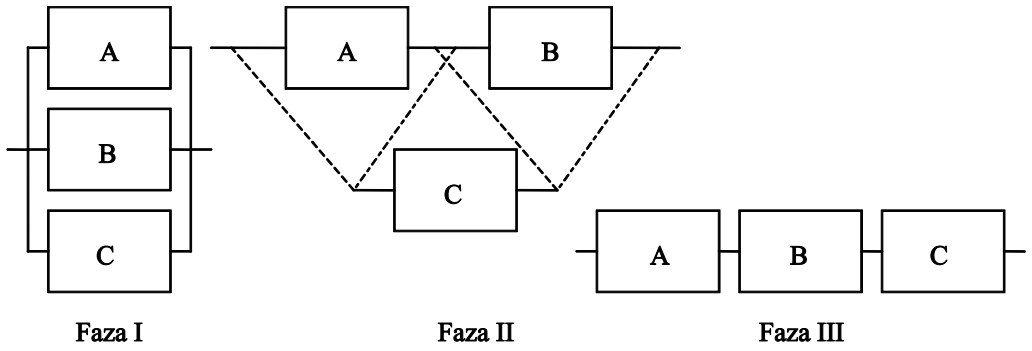


Rys. 8.2. Prawdopodobieństwo przebywania w stanach związanych ze zmianą fazy eksploatacji systemu

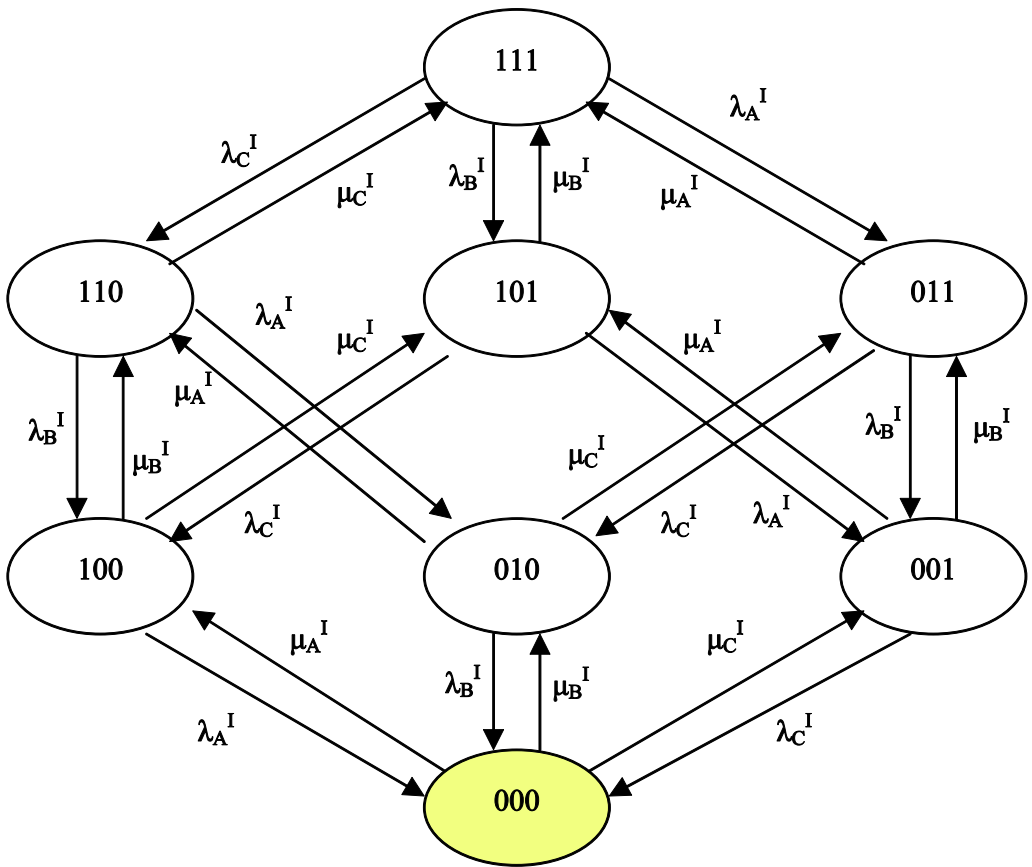
Najtrudniejszą decyzją w procesie modelowania jest wybór sposobu łączenia poszczególnych faz w jeden model i szacowania wartości charakterystyk niezawodności całego systemu.

Analizie zostanie poddany przykładowy system opisany następującymi założeniami:

- system zbudowany z trzech komponentów (A, B, C),
- w czasie eksploatacji system znajduje się kolejno w trzech fazach (I, II, III),
- intensywność uszkodzeń poszczególnych komponentów jest stała w czasie trwania danej fazy eksploatacji, ale może być różna w poszczególnych fazach (λ_i^j , $i = A, B, C, j = I, II, III$),



Rys. 8.3. Schematy blokowe systemu w poszczególnych fazach



Rys. 8.4. Model Markowa dla fazy I

• komponenty mogą być obsługiwane lub naprawiane; intensywność napraw w poszczególnych fazach jest stała, ale także może zmieniać się w kolejnych fazach eksploatacji (μ_i^j , $i = A, B, C, j = I, II, III$),

• struktura niezawodności systemu jest strukturą progową k^j z n ; parametr k zależy od fazy i wynosi: $k^I = 1, k^{II} = 2, k^{III} = 3$, przy $n = 3$.

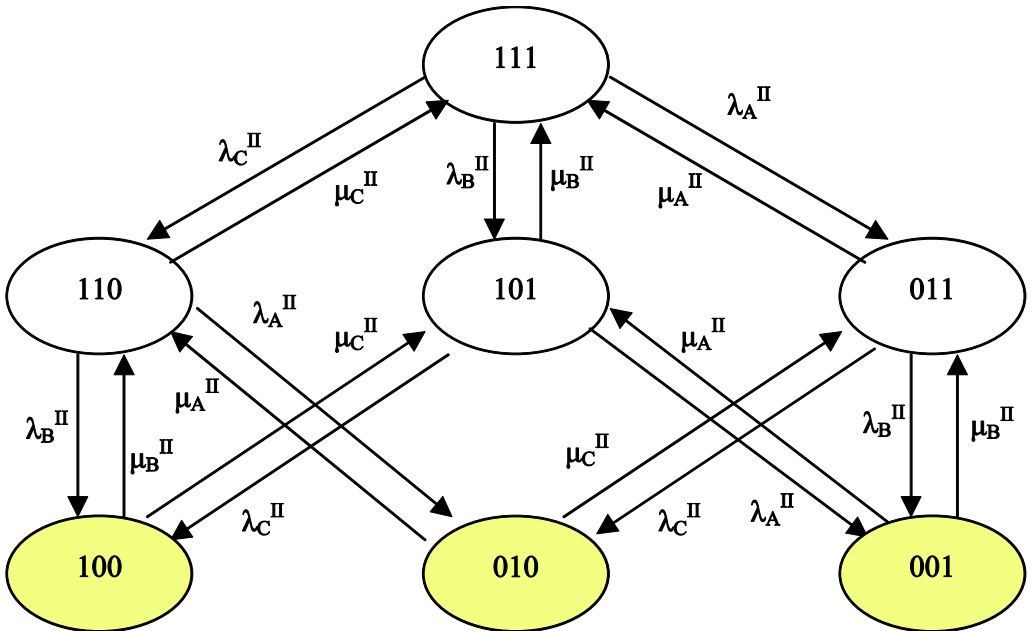
Po założeniu, że elementy systemu są nienaprawialne, struktura blokowa systemu w poszczególnych fazach przedstawia się jak na rysunku 8.3. W fazie II nie jest istotne, który element jest elementem rezerwowym (na rysunku taką rolę pełni element C).

Jeżeli korzystamy z modelu Markowa, grafy stanów dla poszczególnych faz pokazano na rysunkach 8.4–8.6. Stan systemu zapisano w następującej notacji:

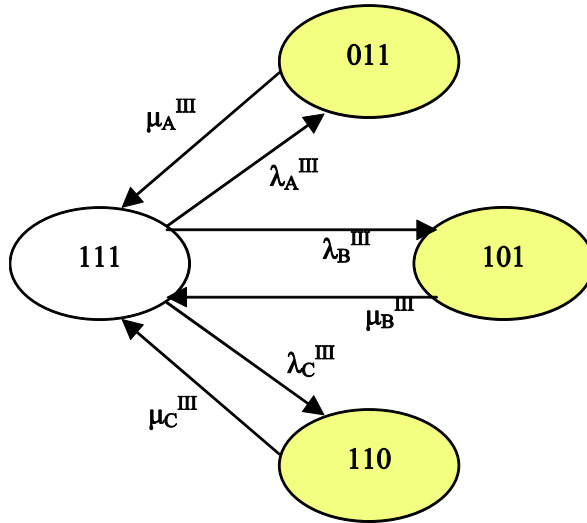
$$S = \langle S_A, S_B, S_C \rangle$$

przy czym: $S_i = 0$ – element niezdatny,
 $S_i = 1$ – element zdalny.

Stany niezdatności systemu w poszczególnych fazach zostały zaciemnione. Należy podkreślić założenie, że podczas naprawy elementów systemu niemożliwe są dalsze uszkodzenia.



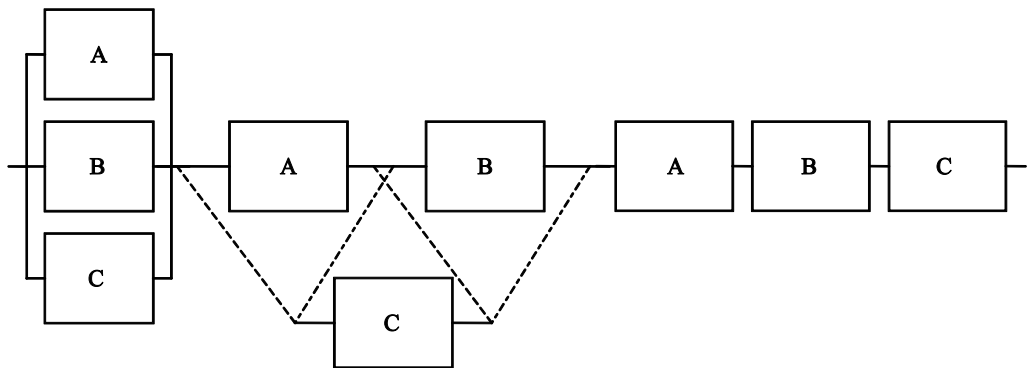
Rys. 8.5. Model Markowa dla fazy II



Rys. 8.6. Model Markowa dla fazy III

„Konserwatywny” model niezawodności

Najprostszym podejściem do łączenia niezawodności faz w niezawodność systemu jest wykorzystanie modelu struktury szeregowej niezawodności systemu, w której elementami struktury będą kolejne fazy eksploatacji systemu. Jest to możliwe, jeżeli komponenty systemu nie charakteryzują się dynamicznymi zmianami właściwości, takich jak błędy przejścia lub niepełna naprawa uszkodzeń [44]. Wówczas otrzymuje się „konserwatywny” oszacowanie funkcji niezawodności systemu (oszacowanie „z dołu”). Przykład takiej struktury pokazana na rysunku 8.7.



Rys. 8.7. Struktura niezawodności systemu – szeregową strukturą faz

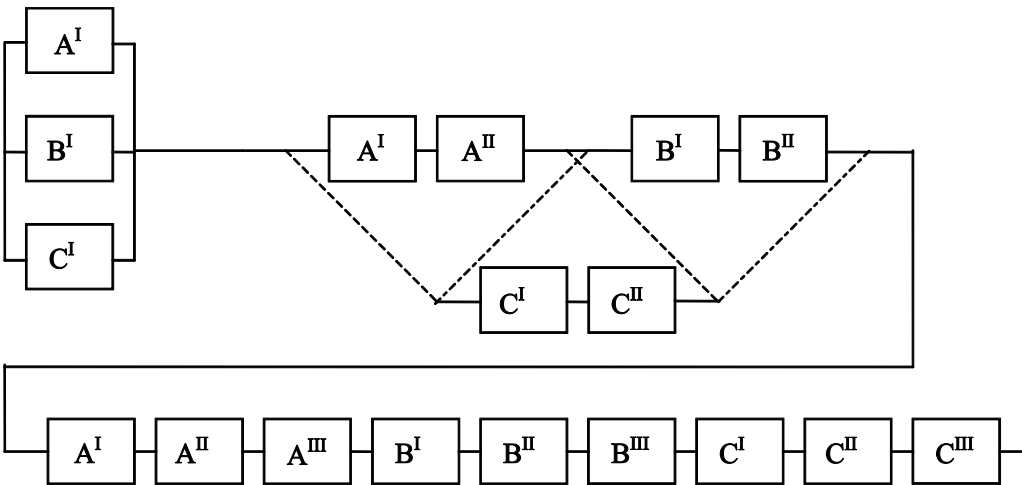
Wyniki obliczeń niezawodności takiego systemu, jeżeli elementy są nienaprawialne, są dokładne, ale prowadzą do oszacowania niezawodności rzeczywistego systemu „z dołu”.

W pracy [48] zaproponowano metodę modelowania pozwalającą na zmniejszenie ważności elementów połączonych szeregowo na końcowy wynik modelowania systemu. Wprowadzono elementy zastępcze o warunkowym prawdopodobieństwie poprawnej pracy:

$$R_i^j(t) = R_i^I(t) R_i^{II}(t) R_i^{III}(t) \quad (8.1)$$

przy czym prawdopodobieństwo poprawnej pracy w fazie J jest warunkowane poprawnym funkcjonowaniem w fazach wcześniejszych ($j = 1, \dots, J - 1$).

Przykład takiej struktury pokazano na rysunku 8.8. Wadą proponowanego podejścia jest wykładniczy wzrost liczby analizowanych elementów. Pewnym rozwiązaniem jest wykorzystanie do analizy systemu metody ścieżek zdatności lub przekrojów niezdatności [43].



Rys. 8.8. Schemat blokowy – struktury zastępcze systemu

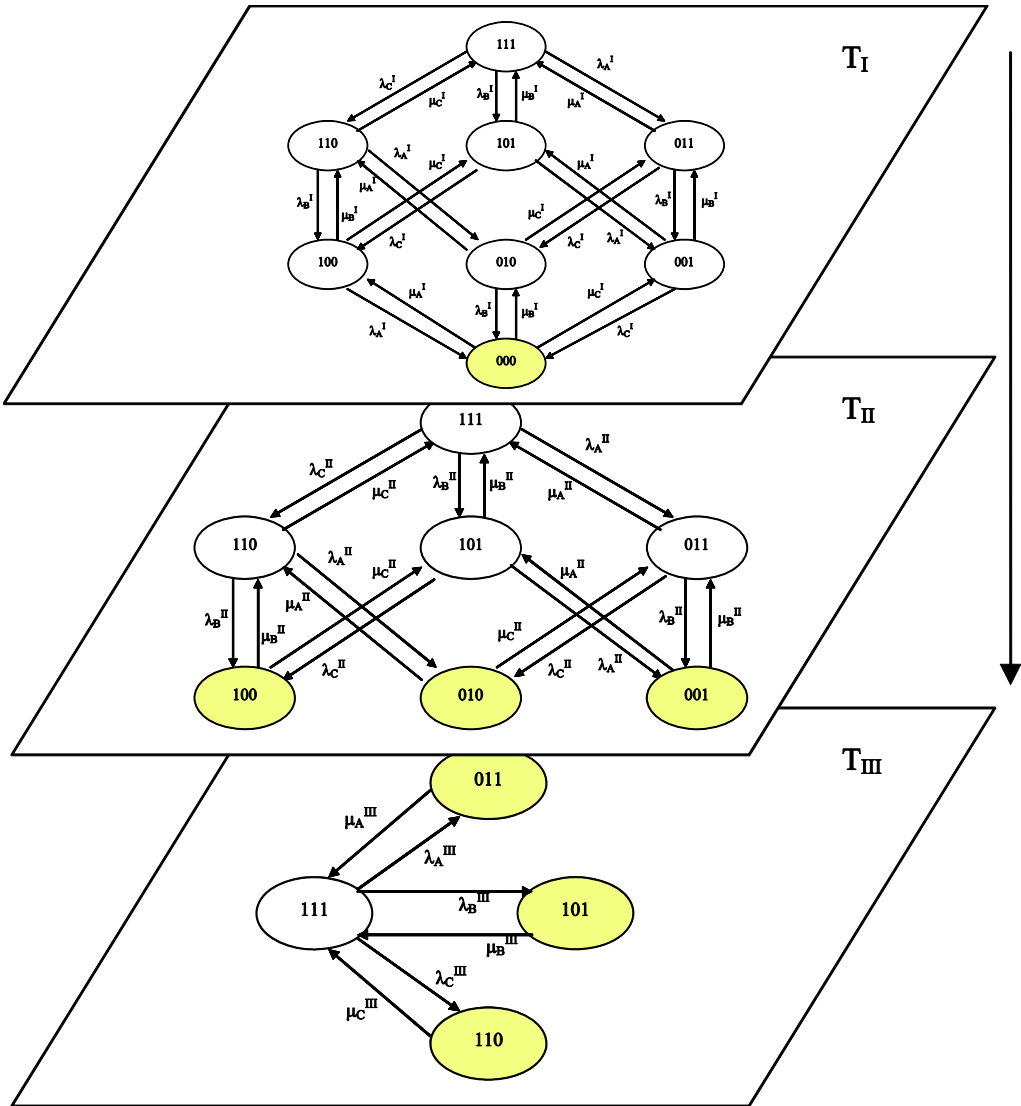
Model Markowa – ustalony czas trwania faz

Jeżeli system wykazuje zachowania zmienne w czasie wykonywania zadania, takie jak, np.:

- zmieniające się prawdopodobieństwo przejść pomiędzy fazami,
- ograniczona liczbą zespołów naprawczych,

wówczas wykorzystanie modelu Markowa może się okazać efektywne do analizy niezawodności tak złożonego systemu.

W proponowanym sposobie modelowania, każda faza eksploatacji systemu logistycznego jest modelowana oddzielnym modelem Markowa. Zakłada się, że końcowy stan niezawodnościowy systemu w fazie j dla fazy $j + 1$ jest stanem początkowym. Schemat postępowania pokazano na rysunku 8.9.



Rys. 8.9. Schemat modelu niezawodności systemu wielofazowego z ustalonym czasem trwania faz

W fazie I, realizowanej przez okres T_I , stanem zdadności są m.in. stany (111), (101), (110), (011) i możliwe jest przejście do fazy II, do analogicznych stanów zdadności. Natomiast stany (100), (010), (001) będą w fazie II stanami niezadności i końcowe prawdopodobieństwo przebywania w tym stanie będzie sumowało się do prawdopodobieństwa uszkodzenia systemu. Oczywiście system może także ulec uszkodzeniu w fazie I – stan (000). Dla fazy III tylko stan zdadności wszystkich elementów (111) jest stanem zdadności.

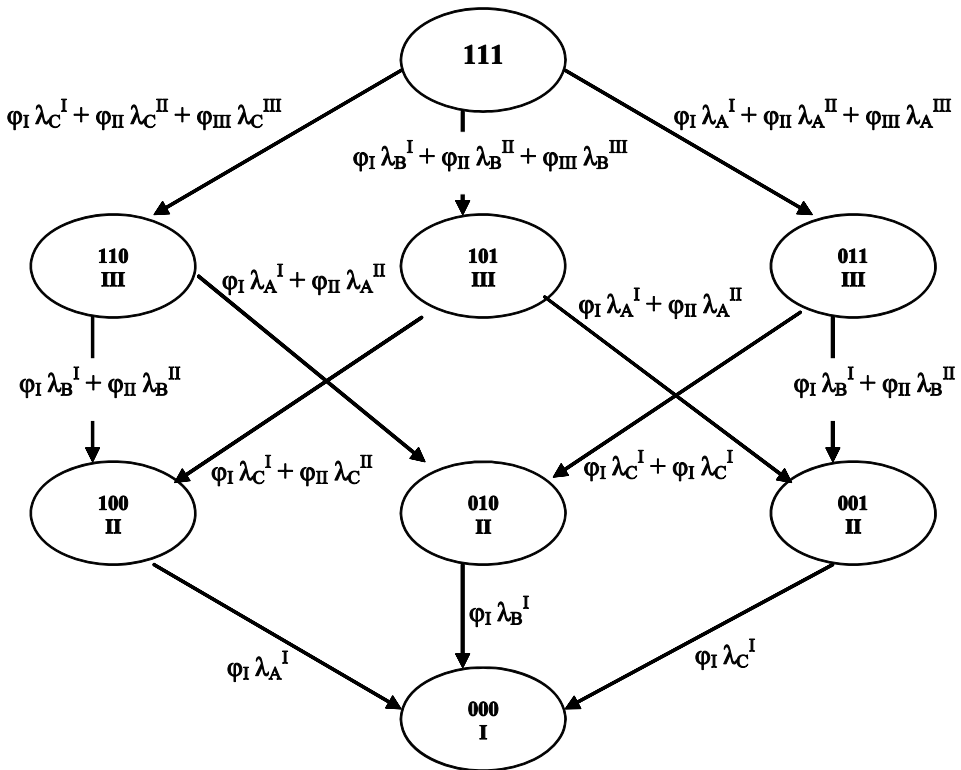
Niedogodności tego sposobu modelowania niezawodności systemu wielofazowego związane są z trudnościami powiązania odpowiadających sobie stanów systemu w poszczególnych fazach. Inne komplikacje powstają (np. [44]), jeżeli dany komponent podlega uszkodzeniom w jednej fazie a nie uszkadza się w innej lub gdy uszkodzenia w jednej fazie nie są diagnozowalne dopóki element nie zostanie użyty w kolejnej fazie.

Syntetyczny model sformułowanego wcześniej podejścia zaproponowano w pracy [44]. Wprowadzono wskaźnik występowania fazy φ_j :

$$\varphi_j = 1, \text{ jeżeli } (T_{j-1} \leq t < T_j)$$

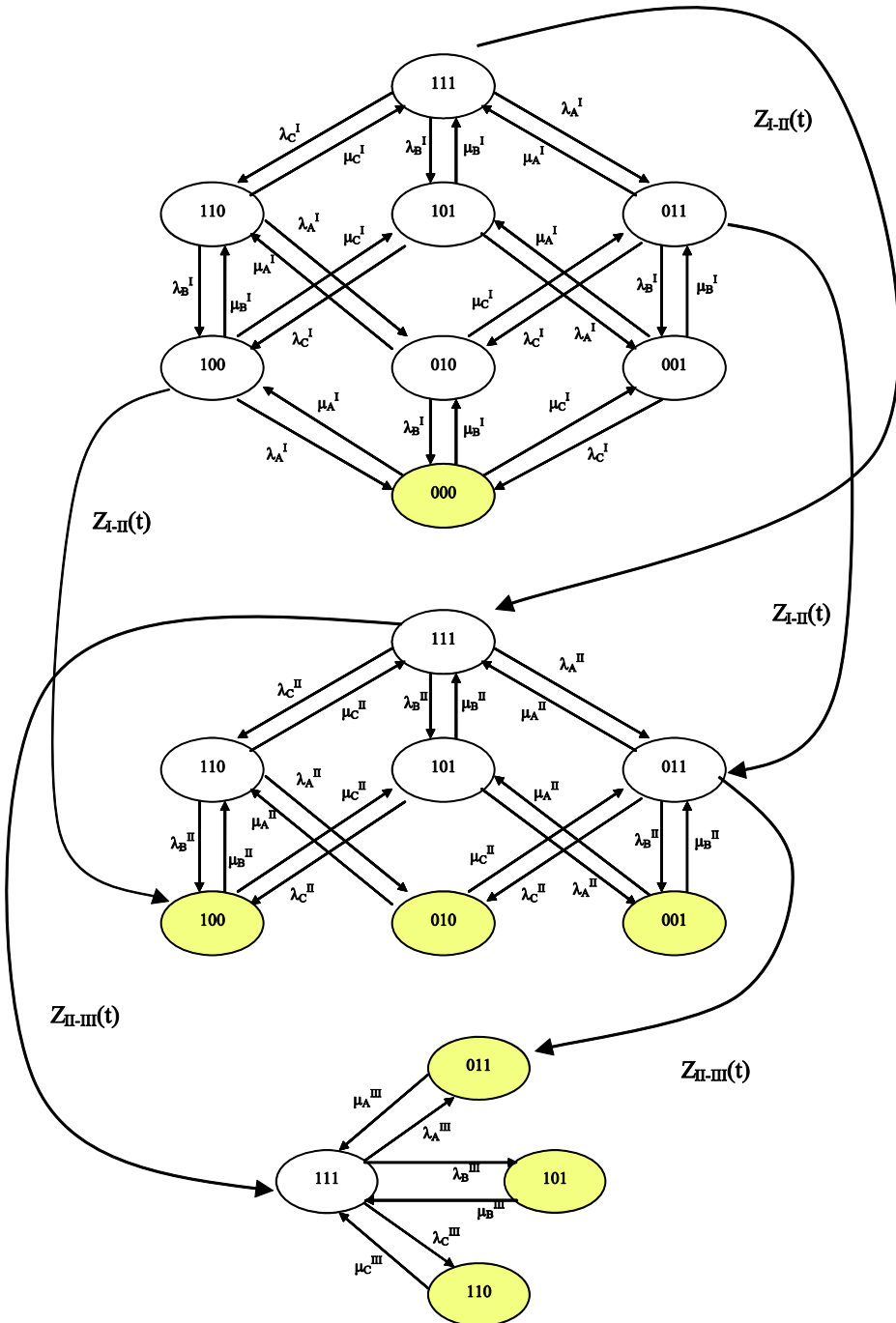
$$0, \text{ jeżeli } t < T_{j-1}, t > T_j$$

gdzie: T_j – chwila czasu końca fazy j .



Rys. 8.10. Model syntetyczny przykładowego systemu wielofazowego

Wskaźnik φ_j określa, które przejście pomiędzy stanami należy do danej fazy j . Użycie tej metody nie zmienia przestrzeni stanów systemu ani nie wymaga wyznaczania nowego prawdopodobieństwa przejścia między stanami. Otrzymany model jest



Rys. 8.11. Schemat modelu systemu wielofazowego z losowymi przejściami między fazami

nadal modelem Markowa, ale nie jest już jednorodny – wartości prawdopodobieństwa przejścia zależą od czasu eksploatacji systemu. Przykład modelu pokazano na rysunku 8.10. Dla uproszczenia rysunku uwzględniono tylko intensywność uszkodzenia elementów; zapis intensywności napraw jest analogiczny. Obok numeru stanu zaznaczono numer fazy, w której dany stan jest stanem niezdatności.

Model Markowa – losowy czas trwania fazy

Jeżeli nie można zdefiniować zdeterminowanego czasu trwania poszczególnych faz eksploatacji systemu i te okresy są zmiennymi losowymi, to do modelowania trzeba wykorzystać niejednorodny proces Markowa. Podejście zaprezentowane w pracy [210] bazuje na rozwiązaniu pojedynczego, niejednorodnego modelu Markowa, w którym koncepcja przejść między stanami została uogólniona, aby uwzględnić zmiany faz.

Dla przykładowego systemu (rys. 8.11 – dla uproszczenia rysunku pokazano tylko wybrane przejścia między fazami dla stanów pełnej zdadności i niektórych stanów przechodzących w stan niezdatności w następnej fazie) modele Markowa dla trzech faz zostały połączone przez przejścia reprezentujące zmiany faz. Przejścia $z(t)$ reprezentują intensywności związane z czasem, w którym zachodzi zmiana fazy. W rezultacie model uwzględnia wszystkie konfiguracje dla wszystkich faz oraz wszystkie możliwości zmiany faz.

Zaletą tego podejścia jest możliwość uwzględnienia zależności zmiany fazy od stanu systemu oraz zależności uszkodzeń i napraw od czasu w poszczególnych fazach. Nie ma również potrzeby uzgadniania prawdopodobieństwa przebywania w stanach pomiędzy fazami.

Wadą metody jest duży stopień skomplikowania modelu. Przestrzeń stanów może być bardzo duża, ponieważ stanowi sumę stanów wszystkich modeli cząstkowych. Ponieważ wielkość przestrzeni stanów w modelach Markowa jest (w najgorszym przypadku) wykładniczą funkcją liczby komponentów, jej przyrost może być krytyczny dla możliwości modelowania.

8.2. PRZYKŁAD ANALIZY MODELU FAZOWEGO NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU

W analizie modelu fazowego przyjęto następujące założenia:

- system jest zbudowany z jednego elementu naprawialnego:

$$F_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}, \quad G_i(t) = 1 - e^{-\mu_i t}$$

- w czasie eksploatacji system znajduje się w dwóch fazach: $i = 1, 2$,
- analizowane są trzy modele systemu wielofazowego:

- model „konserwatywny”,
- model Markowa z ustalonym czasem trwania poszczególnych faz,
- model Markowa z losowym czasem trwania poszczególnych faz.

Model konserwatywny

Przyjęto, że poszczególne fazy eksploatacji systemu tworzą szeregową strukturę niezawodności. Wówczas niezawodność systemu $R(t)$ dana jest wzorem:

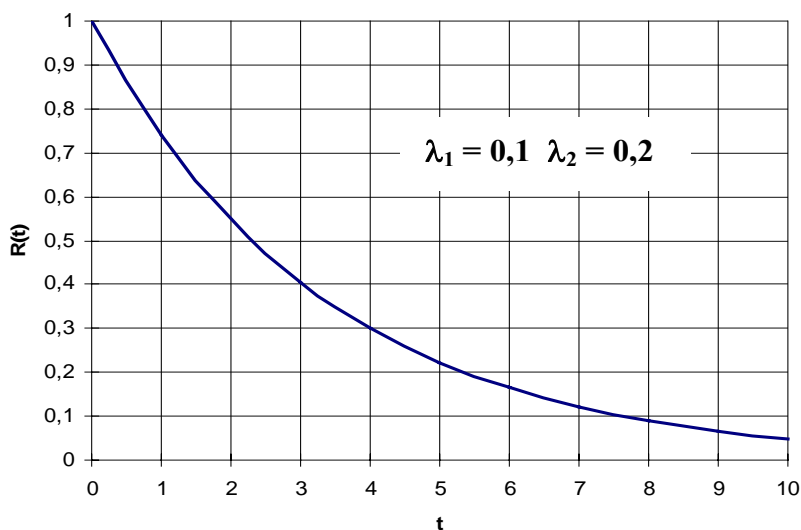
$$A(t) = R(t) = \prod_{i=1}^2 R_i(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (8.2)$$

gdzie: $A(t)$ – funkcja gotowości systemu.

Schemat struktury niezawodności systemu pokazano na rysunku 8.12, a przebieg funkcji niezawodności dla przyjętych wartości intensywności uszkodzeń na rysunku 8.13.



Rys. 8.12. Schemat blokowy analizowanego systemu



Rys. 8.13. Przebieg funkcji niezawodności systemu

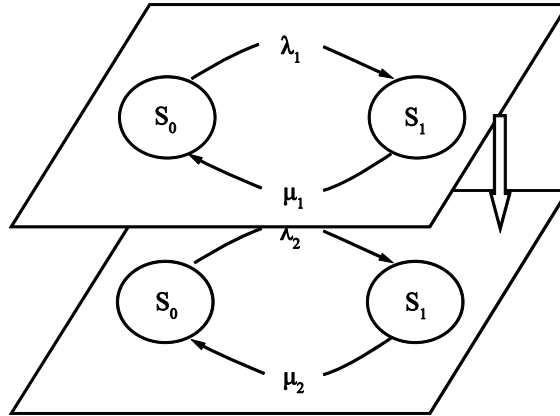
Model Markowa z ustalonym czasem trwania faz eksploatacji

Dla przyjętych założeń, funkcja gotowości systemu naprawialnego dla danej fazy eksploatacji i wynosi:

$$A_i(t) = [\mu_i / (\lambda_i + \mu_i)] + \left[\left(P_i(t_{\text{pocz}}) \lambda_i - (1 - P_i(t_{\text{pocz}})) \mu_i \right) \exp(-(\lambda_i + \mu_i)t) \right] / (\lambda_i + \mu_i) \quad (8.3)$$

gdzie: $P_i(t_{\text{pocz}})$ – prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanie zdatności na początku i -tej fazy eksploatacji.

Schemat modelu pokazano na rysunku 8.14.



Rys. 8.14. Schemat modelu Markowa dla dwóch faz eksploatacji systemu

Na wykresie (rys. 8.15) pokazano przebieg funkcji gotowości dla 1 i 2 fazy eksploatacji analizowanych oddzielnie. Prawdopodobieństwo przebywania w stanie zdatności na początku fazy 2 jest równe prawdopodobieństwu przebywania w stanie zdatności na końcu fazy 1:

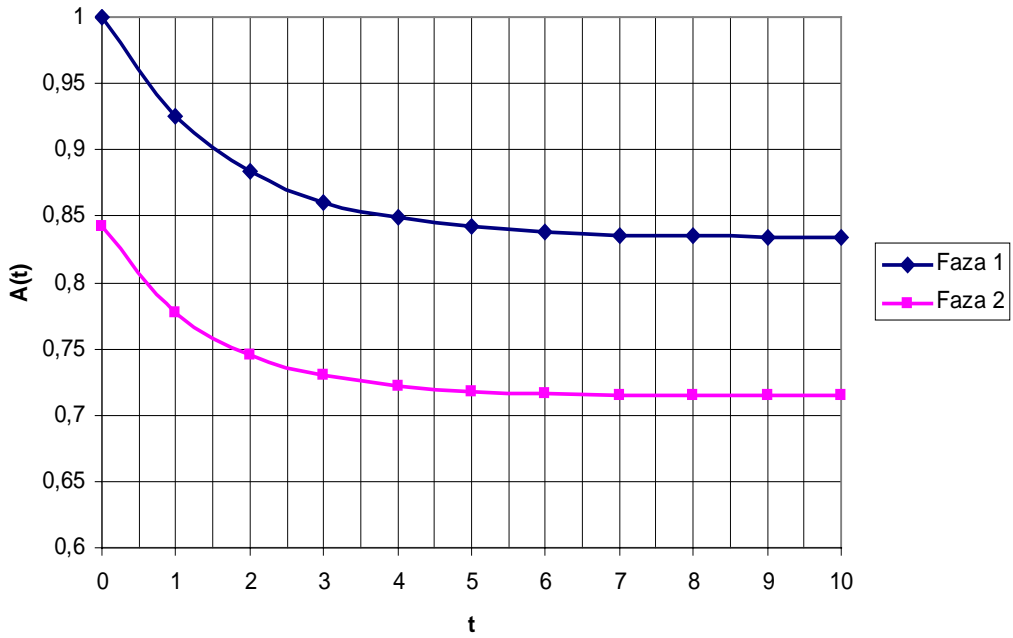
$$A_2(0) = A_1(10)$$

Po przyjęciu, że w ustalonej chwili czasu $t = 5$ następuje zmiana fazy eksploatacji systemu z fazy 1 na fazę 2, przebieg funkcji gotowości ulega zmianie – rys. 8.16.

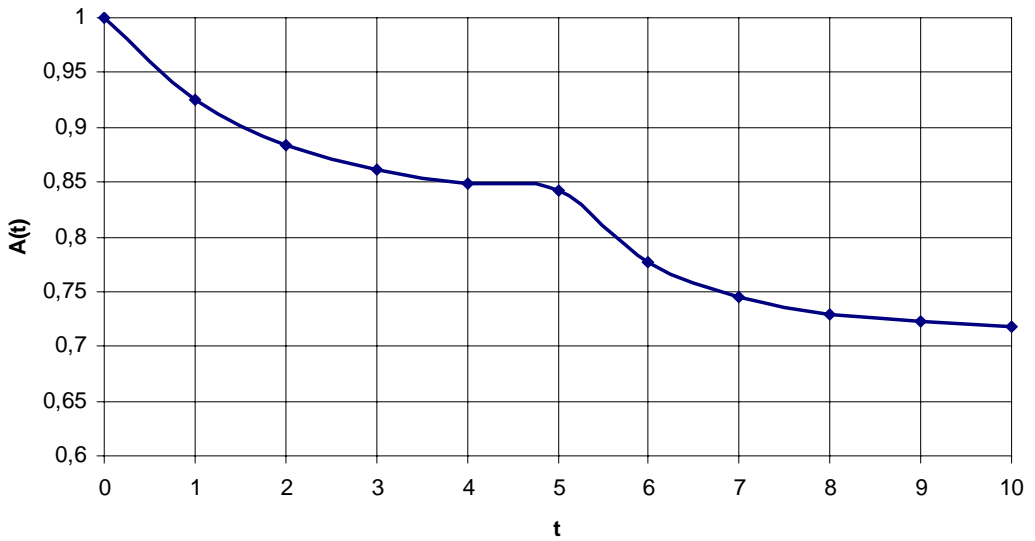
Model Markowa z losowym czasem trwania faz eksploatacji

Czterostanowy model pokazano na rysunku 8.17. Stany S0-1 i S0-2 są stanami zdatności i między nimi występuje możliwość przejścia w chwili zmiany fazy. Stany S1-1 i S1-2 są stanami niezdatności. System charakteryzuje się w obu fazach taką samą intensywnością naprawy, różni się natomiast intensywnościami uszkodzenia.

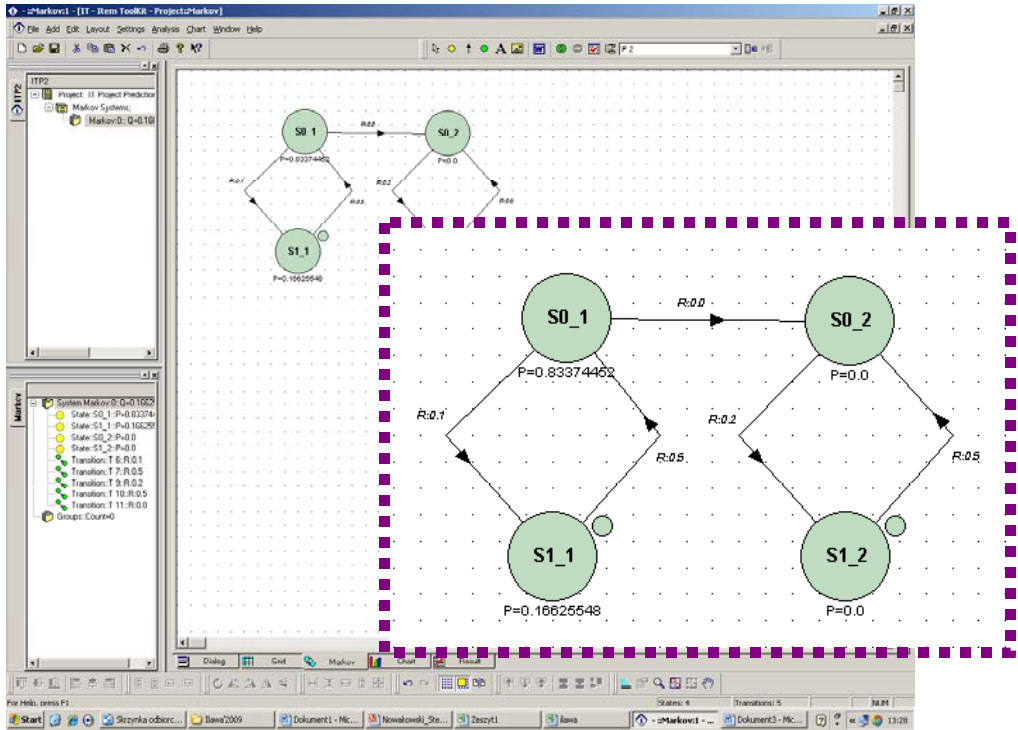
Na rysunku 8.18 pokazano zależność wartości asymptotycznej gotowości systemu od wartości prawdopodobieństwa zmiany fazy eksploatacji – przejścia między stanami S0-1 a S0-2. Dla prawdopodobieństwa $P_{1-2} = 0$ wartość gotowości systemu odpowiada wartości gotowości asymptotycznej fazy 1 – nie nastąpiła zmiana fazy w analizowanym okresie eksploatacji. Analogicznie dla $P_{1-2} = 1$ system wykonuje zadania fazy 2 i osiąga asymptotyczną gotowość tej fazy.



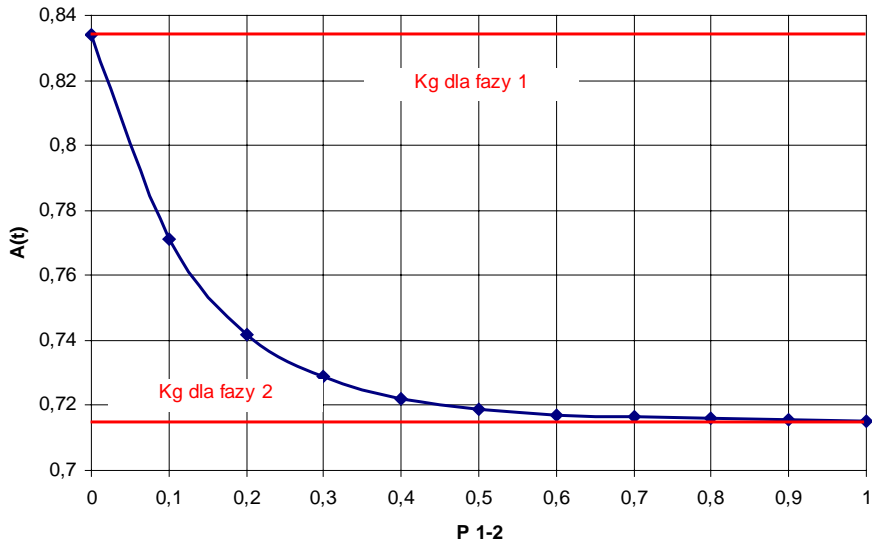
Rys. 8.15. Przebieg funkcji gotowości dla poszczególnych faz eksploatacji systemu



Rys. 8.16. Przebieg funkcji gotowości dla połączonych faz eksploatacji systemu w chwili $t = 5$



Rys. 8.17. Graf modelu niezawodności systemu z losowym czasem trwania faz eksploatacji



Rys. 8.18. Zależność asymptotycznej wartości funkcji gotowości od prawdopodobieństwa przejścia między fazami

Z przytoczonych bardzo prostych przykładów widać możliwości wykorzystania modeli wielofazowych niezawodności do analizy systemów rzeczywistych.

8.3. PRZYKŁAD MODELU NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU TRANSPORTU INTERMODALNEGO

Podkreślono znaczenie systemu transportu intermodalnego w polityce logistycznej Unii Europejskiej (rozdz. 1). Konwencja o międzynarodowym transporcie multimodalnym towarów z 1980 r. stwierdza (np. [115]) m.in., że międzynarodowy transport multimodalny oznacza przewóz towarów z użyciem co najmniej dwóch różnych gałęzi transportu na podstawie umowy o przewóz multimodalny, z miejsca położonego w jednym kraju, gdzie towar przyjął operator transportu multimodalnego, do oznaczonego miejsca przeznaczenia położonego w innym kraju. W literaturze przedmiotu (np. [118]) spotyka się także określenie transport kombinowany (*combined transport*), oznaczające przewóz ładunku środkami transportowymi co najmniej dwóch gałęzi transportu. Podkreśla się [257] techniczno-technologiczny aspekt procesu transportowego. W praktyce można uznać, że transport kombinowany występuje wtedy, kiedy korzysta się z kilku różnych środków transportowych, przy czym najczęściej charakteryzuje się on odrębnością i samodzielnością świadczeń na poszczególnych odcinkach procesu transportowego.

W zrealizowanych pracach badawczych opracowano szereg modeli transportu intermodalnego, m.in. trójfazowy i pięcioletni model bazujący na procesie Markowa oraz pięcioletni model wykorzystujący proces semi-Markowa.

8.3.1. TRÓJFAZOWY MODEL NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU TRANSPORTU INTERMODALNEGO

W modelu transportu intermodalnego główna część przewozu jest dokonana za pomocą kolei, natomiast dowóz i odwóz między nadawcą a terminalem oraz terminalem a odbiorcą jest dokonany pojazdami samochodowymi. Wówczas można wyróżnić trzy fazy transportu [154, 155, 157]. Tak zdefiniowany jeden z podsystemów systemu logistycznego jest (pod kątem modelowania niezawodności) wzorcowym przykładem systemu o zadaniach (misjach) okresowych lub systemu wielofazowego.

Pierwsza faza dotyczy przewozu zintegrowanej jednostki ładunkowej od nadawcy do terminalu usytuowanego niedaleko nadawcy. Faza druga to główna część przewozu wykonana koleją. Jest to przewóz zintegrowanej jednostki ładunkowej pomiędzy ter-

minalami kontenerowymi. Trzecia faza dotyczy dostarczenia przewożonej jednostki ładunkowej z terminalu w pobliżu odbiorcy do odbiorcy.

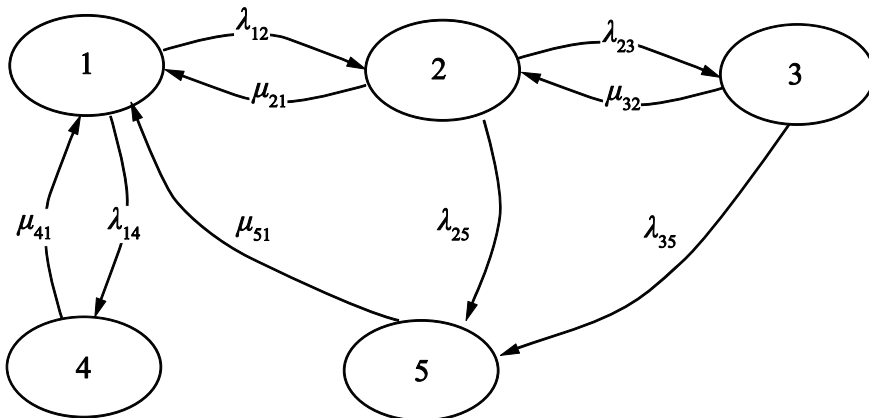
Każda z faz trójfazowego modelu niezawodności transportu intermodalnego ma identyczną strukturę, która składa się z następujących stanów:

- S1 – postój,
- S2 – jazda,
- S3 – przeładunek,
- S4 – obsługa profilaktyczna,
- S5 – uszkodzenie/naprawa.

Każdy ze stanów modelu jest zdefiniowany stanem niezawodności. Relacja między stanami eksploatacyjnymi i niezawodnościowymi została przedstawiona w tabeli 8.1. Trójfazowy model niezawodności transportu intermodalnego jest oparty na procesie Markowa. Na podstawie zdefiniowanych stanów można zbudować graf stanów. Został on przedstawiony na rysunku 8.19.

Tabela 8.1. Stany eksploatacji i niezawodności trójfazowego modelu niezawodności

Nr stanu	Stan eksploatacji	Stan niezawodności
1	Postój	Zdatny
2	Jazda	Zdatny
3	Przeładunek	Zdatny
4	Obsługa profilaktyczna	Niezdatny
5	Naprawa	Niezdatny



Rys. 8.19. Graf fazy transportowej modelu trójfazowego [155]

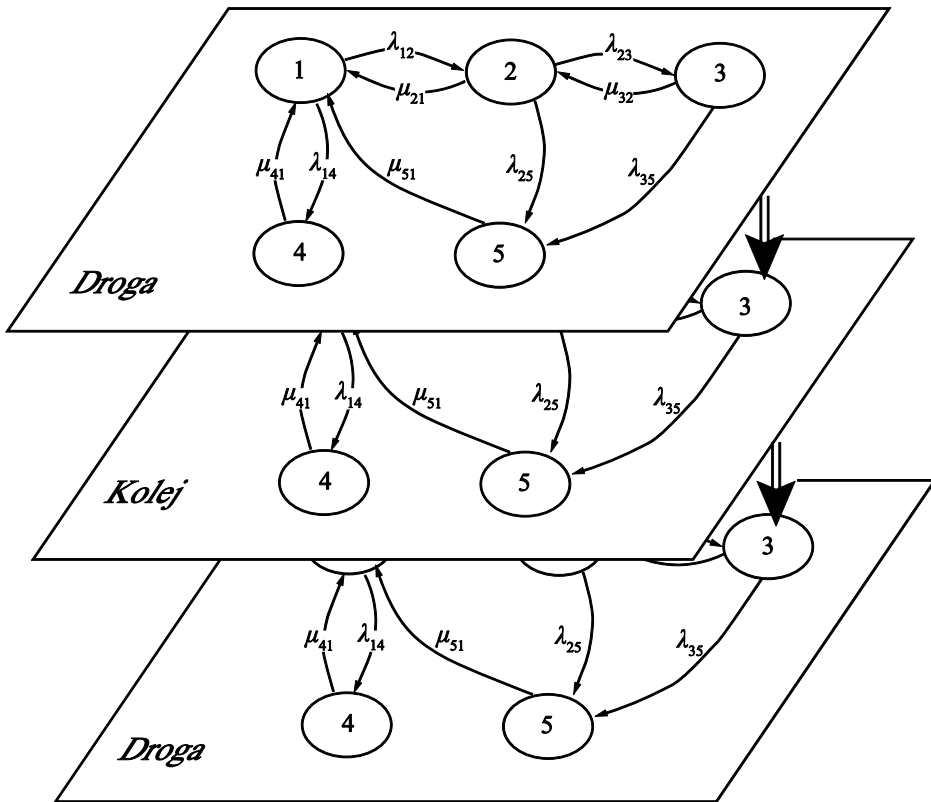
Występują następujące możliwości zmiany stanów:

λ_{12} – intensywność przejścia ze stanu postoju do jazdy,

λ_{23} – intensywność przejścia ze stanu jazdy do przeładunku,

- λ_{14} – intensywność przejścia ze stanu postępu do obsługi profilaktycznej,
- λ_{25} – intensywność przejścia ze stanu jazdy do naprawy,
- λ_{34} – intensywność przejścia ze stanu przeładunku do naprawy,
- μ_{21} – intensywność przejścia ze stanu jazdy do postępu,
- μ_{32} – intensywność przejścia ze stanu przeładunku do jazdy,
- μ_{41} – intensywność przejścia ze stanu obsługa profilaktyczna do postępu,
- μ_{51} – intensywność przejścia ze stanu naprawy do postępu.

Graf stanów odzwierciedla możliwość przejść między stanami pojazdów biorących udział w procesie w jednej z faz transportu kombinowanego. Cały model trójfazowy przedstawiono na rysunku 8.20.



Rys. 8.20. Model trójfazowy [155]

Pojazd oczekuje na zgłoszenie transportowe w stanie 1. Po uzyskaniu zgłoszenia transportowego następuje jazda (stan 2) do miejsca załadunku zintegrowanej jednostki ładunkowej (stan 3). Po załadunku pojazd przemieszcza się (jazda – stan 4) do terminalu kontenerowego, gdzie nastąpi zmiana fazy transportowej przez przeła-

dunek (stan 3). Pojazd przemieszcza się do punktu początkowego, aby ponownie oczekiwać na zgłoszenie transportowe.

Pojazd podlega obsłudze profilaktycznej. Przejście do tego stanu następuje ze stanu postoju. W trakcie wykonywania przewozu pojazd może ulec uszkodzeniu (stan 5). Sytuacja taka może nastąpić w trakcie jazdy bądź w trakcie wykonywania przeładunku. Zarówno po obsłudze profilaktycznej, jak i naprawie pojazd powraca do stanu postoju.

Pojazdy kolejowe podlegają podobnym zależnościom podczas wykonywania operacji w trakcie drugiej fazy transportu, oraz pojazdy samochodowe w trzeciej fazie.

Każda z faz procesu może być opisana następującym układem równań różniczkowych [157]. W fazie pierwszej:

$$\begin{cases} P_1^1(t)' = -(\lambda_{12}^1 + \lambda_{14}^1)P_1^1(t) + \mu_{21}^1 P_2^1(t) + \mu_{41}^1 P_4^1(t) + \mu_{15}^1 P_5^1(t) \\ P_2^1(t)' = \lambda_{12}^1 P_1^1(t) - (\mu_{21}^1 + \lambda_{23}^1 + \lambda_{25}^1)P_2^1(t) + \mu_{32}^1 P_3^1(t) \\ P_3^1(t)' = \lambda_{23}^1 P_2^1(t) - (\mu_{32}^1 + \lambda_{35}^1)P_3^1(t) \\ P_4^1(t)' = \lambda_{41}^1 P_1^1(t) - \mu_{41}^1 P_4^1(t) \\ P_5^1(t)' = \lambda_{25}^1 P_2^1(t) + \lambda_{35}^1 P_3^1(t) - \mu_{51}^1 P_5^1(t) \end{cases} \quad (8.4)$$

$$\text{dla } P_1^1(0) = 1, P_2^1(0) = 0, P_3^1(0) = 0, P_4^1(0) = 0, P_5^1(0) = 0$$

w fazie drugiej:

$$\begin{cases} P_1^2(t)' = -(\lambda_{12}^2 + \lambda_{14}^2)P_1^2(t) + \mu_{21}^2 P_2^2(t) + \mu_{41}^2 P_4^2(t) + \mu_{15}^2 P_5^2(t) \\ P_2^2(t)' = \lambda_{12}^2 P_1^2(t) - (\mu_{21}^2 + \lambda_{23}^2 + \lambda_{25}^2)P_2^2(t) + \mu_{32}^2 P_3^2(t) \\ P_3^2(t)' = \lambda_{23}^2 P_2^2(t) - (\mu_{32}^2 + \lambda_{35}^2)P_3^2(t) \\ P_4^2(t)' = \lambda_{41}^2 P_1^2(t) - \mu_{41}^2 P_4^2(t) \\ P_5^2(t)' = \lambda_{25}^2 P_2^2(t) + \lambda_{35}^2 P_3^2(t) - \mu_{51}^2 P_5^2(t) \end{cases} \quad (8.5)$$

$$\text{dla } \begin{aligned} P_1^2(t_1) &= P_1^1(t_1), P_2^2(t_1) = P_2^1(t_1), \\ P_3^2(t_1) &= P_3^1(t_1), P_4^2(t_1) = P_4^1(t_1), P_5^2(t_1) = P_5^1(t_1) \end{aligned}$$

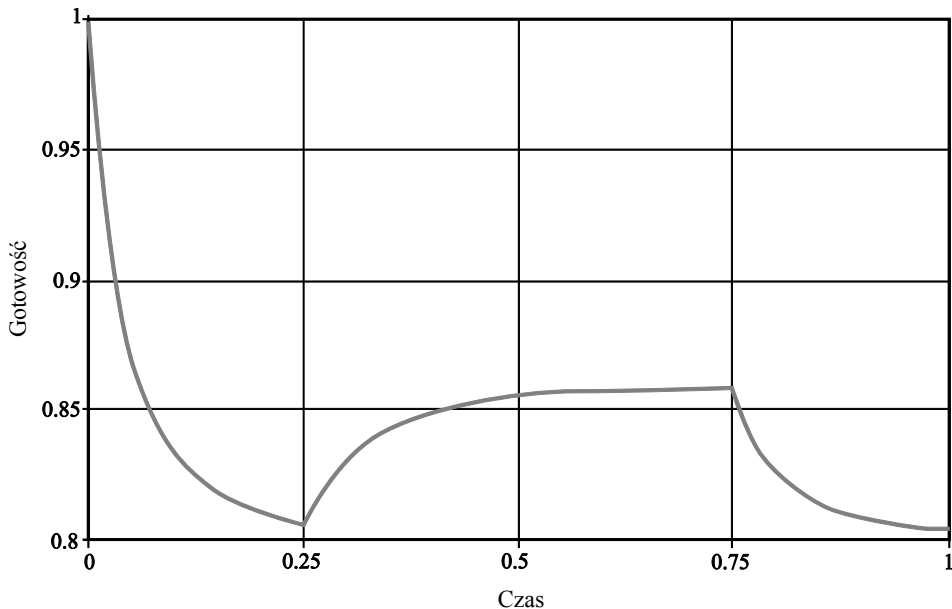
oraz w fazie trzeciej:

$$\begin{cases} P_1^3(t)' = -(\lambda_{12}^3 + \lambda_{14}^3)P_1^3(t) + \mu_{21}^3P_2^3(t) + \mu_{41}^3P_4^3(t) + \mu_{15}^3P_5^3(t) \\ P_2^3(t)' = \lambda_{12}^3P_1^3(t) - (\mu_{21}^3 + \lambda_{23}^3 + \lambda_{25}^3)P_2^3(t) + \mu_{32}^3P_3^3(t) \\ P_3^3(t)' = \lambda_{23}^3P_2^3(t) - (\mu_{32}^3 + \lambda_{35}^3)P_3^3(t) \\ P_4^3(t)' = \lambda_{41}^3P_1^3(t) - \mu_{41}^3P_4^3(t) \\ P_5^3(t)' = \lambda_{25}^3P_2^3(t) + \lambda_{35}^3P_3^3(t) - \mu_{51}^3P_5^3(t) \end{cases} \quad (8.6)$$

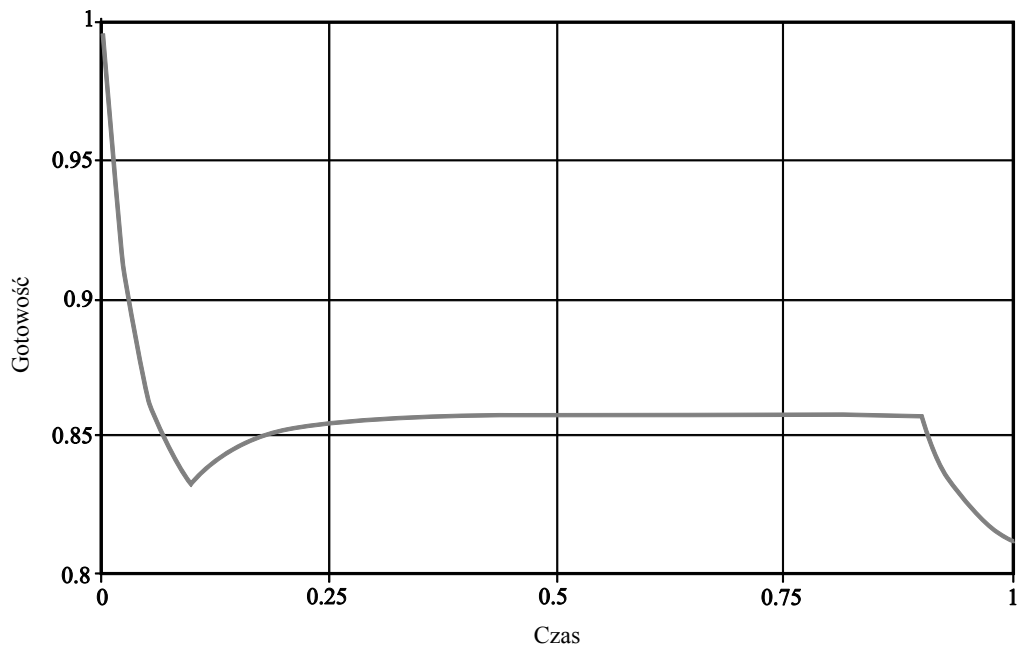
dla $P_1^3(t_1) = P_1^1(t_1), P_2^3(t_1) = P_2^1(t_1),$
 $P_3^3(t_1) = P_3^1(t_1), P_4^3(t_1) = P_4^1(t_1), P_5^3(t_1) = P_5^1(t_1)$

Model systemu intermodalnego został przeanalizowany dla następujących założeń [156]:

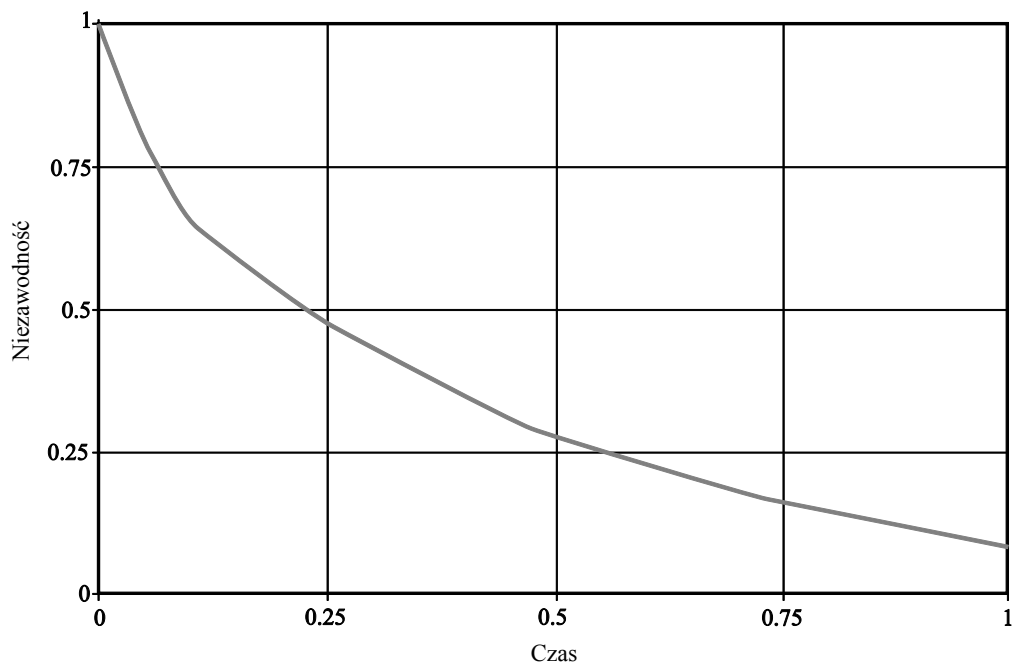
- analizowano jedno zadanie transportowe,
- wzięto pod uwagę trzy fazy transportu o identycznej strukturze,
- intensywność przejść pomiędzy fazami oszacowano na podstawie badań eksploatacyjnych pojazdów samochodowych i pojazdów kolejowych ([251, 253]),
- udział fazy kolejowej przyjęto jako 50% lub 80% całego zadania.



Rys. 8.21. Funkcja gotowości dla 50% udziału fazy kolejowej [157]



Rys. 8.22. Funkcja gotowości dla 80% udziału fazy kolejowej [157]



Rys. 8.23. Funkcja niezawodności dla 80% udziału fazy kolejowej [157]

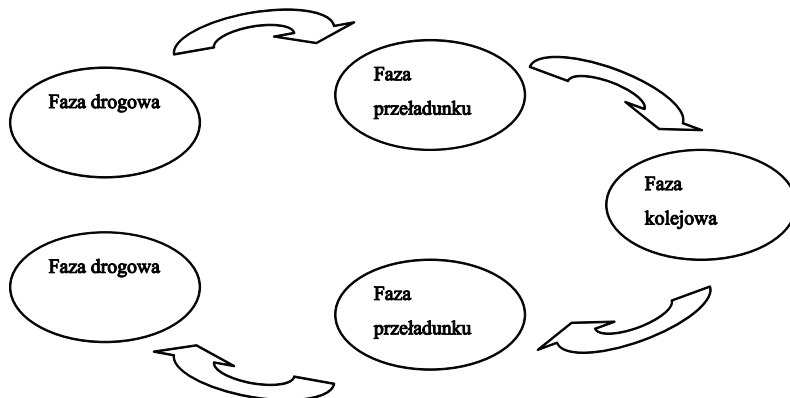
Przykłady otrzymanych wyników obliczeń pokazano na rysunkach 8.21–8.23. Pokazano przebieg funkcji gotowości dla 50% i 80% udziału fazy kolejowej. Na wykresach wyraźnie widoczne są chwile zmiany środków transportu i skutki większej gotowości pojazdów szynowych. Jednocześnie zaznacza się zwiększenie gotowości całego systemu transportu intermodalnego wraz ze zwiększeniem udziału fazy kolejowej. Pod koniec czasu realizacji zadania wartość funkcji niezawodności systemu zmniejsza się prawie do wartości 0 – z prawdopodobieństwem bliskim pewności podczas wykonywania zadania lub misji wystąpi uszkodzenia któregoś z elementów systemu.

8.3.2. PIĘCIOFAZOWY MODEL NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU TRANSPORTU INTERMODALNEGO (PROCES MARKOWA)

Model trójfazowy charakteryzował się kilkoma uproszczeniami, m.in. brakiem fazy przeładunku między poszczególnymi gałęziami transportu oraz identyczną strukturą grafów – modeli poszczególnych faz. Tych ograniczeń nie ma model pięciofazowy, w którym rozpatrywano kolejowo-samochodowy transport intermodalny z dwukrotnym przeładunkiem ([254, 255]). Ogólny schemat pięciofazowego modelu niezawodności transportu intermodalnego przedstawiono na rysunku 8.24.

Przedstawiony model dotyczy intermodalnego transportu kolejowo-samochodowego kontenerów, w którym [257]:

- w fazie I wykonywany jest transport od nadawcy ładunku do terminala kolejowego drogą samochodową,
- w fazie II następuje manewrowanie jednostką ładunkową oraz przeładunek ze środków transportu drogowego na kolejowy,
- w fazie III dokonywany jest transport koleją do terminala w pobliżu miejsca adresata ładunku,
- w fazie IV wykonywany jest przeładunek na gałąź drogową,



Rys. 8.24. Schemat ogólny pięciu faz transportu intermodalnego [254]

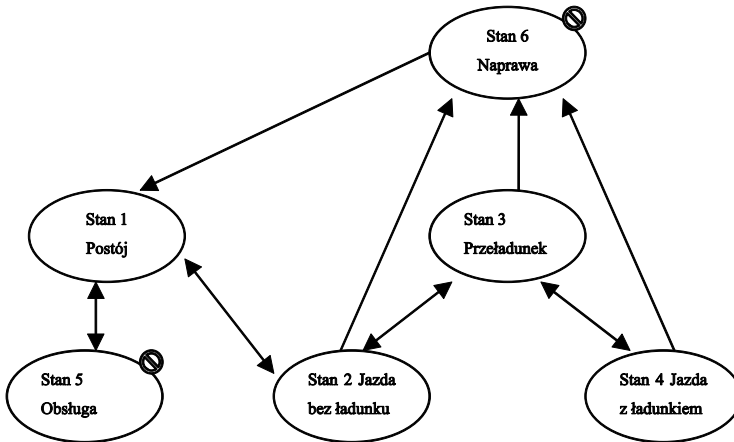
- w fazie V następuje transportowanie ładunku z terminala do miejsca przeznaczenia z użyciem drogowych środków transportu.

Czas trwania kolejnych faz jest określany przez udziały w całym procesie transportowym. Jest to czynnik bardziej istotny niż przebyta droga, ponieważ na terminalu przeładunkowym, transportowana jednostka ładunkowa nie jest przemieszczana na dalekie odległości, natomiast czas przeładunku jest proporcjonalnie duży w stosunku do czasu trwania innych faz.

Charakterystyka fazy „Transport drogowy”

Transport drogowy realizuje przemieszczanie ładunku od nadawcy przesyłki do terminala przeładunkowego oraz od terminala w pobliżu odbiorcy do adresata. Ta część transportu zintegrowanych jednostek ładunkowych może być realizowana samochodem ciężarowym z przyczepą oraz ciągnikiem siodłowym z naczepą. Graf stanów dla fazy I i V przedstawiono na rysunku 8.25. Rozróżnienie stanów pozwala na określenie:

- kiedy zestaw samochodowy jechał z ładunkiem,
- kiedy jechał bez ładunku,
- intensywności uszkodzeń podczas jazdy z ładunkiem,
- intensywności uszkodzeń podczas jazdy bez ładunku,
- intensywności uszkodzeń podczas przeładunku.



Rys. 8.25. Graf stanów w transporcie drogowym [257]

W fazie transportu drogowego pojazdy mogą znajdować się w następujących stanach:

Stan 1 – postój, obejmuje:

- postój organizacyjny,
- postój u nadawcy lub adresata w oczekiwaniu na przeładunek,
- postój na terminalu w oczekiwaniu na zgłoszenie transportowe.

Stan 2 – jazda bez ładunku, obejmuje:

- przejazd do nadawcy nieobciążonym pojazdem w celu podjęcia ładunku,

- przejazd po odstawieniu ładunku u adresata do kolejnego nadawcy nieobciążonym pojazdem,

- przejazd powrotny na terminal nieobciążonym pojazdem,
- jazdę manewrową.

Stan 3 – postój przeładunkowy, obejmuje:

- załadunek u nadawcy,
- przeładunek na terminalu nadania,
- przeładunek na terminalu odbioru,
- rozładunek u adresata.

Stan 4 – jazda z ładunkiem, obejmuje:

- dojazd od nadawcy na terminal załadowanym pojazdem,
- dojazd z terminalu do adresata załadowanym pojazdem.

Stan 5 – obsługa profilaktyczna, obejmuje:

- przygotowanie technologiczne,
- postój obsługowy,
- obsługę techniczną.

Stan 6 – naprawa, obejmuje:

- nieplanowaną obsługę po uszkodzeniu pojazdu, mającą na celu przywrócenie stanu zdatności; uszkodzenie dotyczy całych zestawów drogowych.

Na podstawie grafu stanów, przedstawionym na rysunku 8.25, można wyznaczyć macierz prawdopodobieństwa przejść między stanami:

$$\mathbf{P}^d = \begin{bmatrix}
 -(\lambda_{12}^d + \lambda_{15}^d) & \lambda_{12}^d & 0 & 0 & \lambda_{15}^d & 0 \\
 \mu_{21}^d & -(\mu_{21}^d + \lambda_{23}^d + \lambda_{26}^d) & \lambda_{23}^d & 0 & 0 & \lambda_{26}^d \\
 0 & \mu_{32}^d & -(\mu_{32}^d + \lambda_{34}^d + \lambda_{36}^d) & \lambda_{34}^d & 0 & \lambda_{36}^d \\
 0 & 0 & \mu_{43}^d & -(\mu_{43}^d + \lambda_{46}^d) & 0 & \lambda_{46}^d \\
 \mu_{51}^d & 0 & 0 & 0 & -\mu_{51}^d & 0 \\
 \mu_{61}^d & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{61}^d
 \end{bmatrix} \quad (8.7)$$

Faza transportu drogowego jest wówczas opisana przez układ równań różniczkowych:

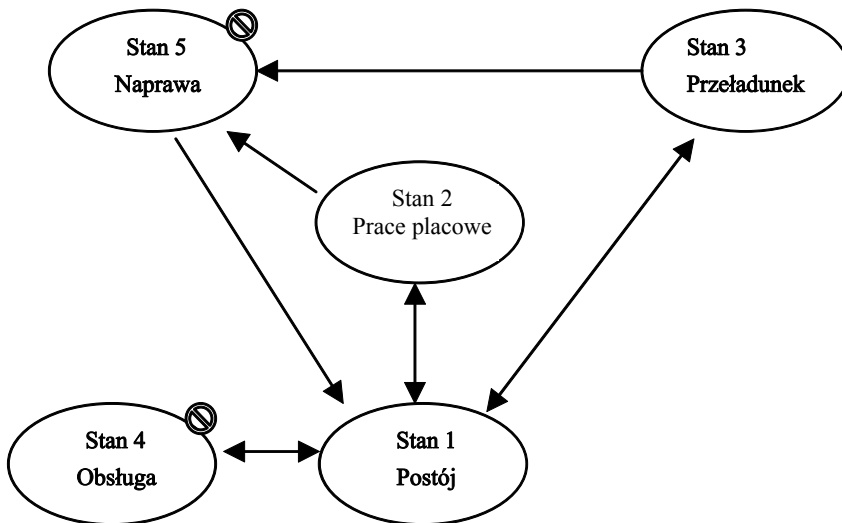
$$\begin{cases}
 P_1^d(t) = -(\lambda_{12}^d + \lambda_{15}^d)P_1^d(t) + \mu_{21}^d P_2^d(t) + \mu_{51}^d P_5^d(t) + \mu_{61}^d P_6^d(t) \\
 P_2^d(t) = -(\mu_{21}^d + \lambda_{23}^d + \lambda_{26}^d)P_2^d(t) + \lambda_{12}^d P_1^d(t) + \mu_{32}^d P_3^d(t) \\
 P_3^d(t) = -(\mu_{32}^d + \lambda_{34}^d + \lambda_{36}^d)P_3^d(t) + \lambda_{23}^d P_2^d(t) + \mu_{43}^d P_4^d(t) \\
 P_4^d(t) = -(\mu_{43}^d + \lambda_{46}^d)P_4^d(t) + \lambda_{34}^d P_3^d(t) \\
 P_5^d(t) = -\mu_{51}^d P_5^d(t) + \lambda_{15}^d P_1^d(t) \\
 P_6^d(t) = -\mu_{61}^d P_6^d(t) + \lambda_{26}^d P_2^d(t) + \lambda_{36}^d P_3^d(t) + \lambda_{46}^d P_4^d(t)
 \end{cases} \quad (8.8)$$

Charakterystyka fazy „Przeładunku”

Przeładunek obejmuje przemieszczanie ładunku na terminalu przeładunkowym oraz rozładunek i załadunek na odpowiednie środki transportu dalekiego. W tej fazie [84] uszkodzeniom mogą ulegać maszyny i pojazdy przemysłowe, jak np. suwnice, wozy wysięgnikowe, wozy widłowe, wozy podsiebierne, żurawie, dźwigi, itp.

Graf stanów przedstawiono na rysunku 8.26. Rozróżnienie stanów pozwala na określenie:

- czasu pracy urządzenia podczas wykonywania przeładunku,
- czasu pracy urządzenia podczas wykonywania prac placowych,
- intensywności uszkodzeń podczas przeładunku,
- intensywności uszkodzeń podczas wykonywania innych prac.



Rys. 8.26. Graf stanów w fazie przeładunku [257]

W fazie przeładunku pojazdy samochodowe oraz kolejowe nie wykonują żadnych czynności i można założyć, że nie podlegają uszkodzeniom. W stanie niezdatności mogą znaleźć się tylko urządzenia przeładunkowe.

W fazie przeładunku urządzenia te mogą znajdować się w następujących stanach:

Stan 1 – postój, obejmuje:

- postój organizacyjny,
- postój w oczekiwaniu na zgłoszenie przeładunkowe.

Stan 2 – prace przeładunkowe, obejmuje:

- prace polegające na zmianie miejsca składowania zintegrowanych jednostek ładunkowych,
- przygotowanie jednostek ładunkowych do załadunku na kolej/drogę.

Stan 3 – przeładunek (na kolej/na samochód), obejmuje:

- rozładunek wagonów kolejowych lub pojazdów drogowych,
- załadunek wagonów kolejowych lub pojazdów drogowych.

Stan 4 – obsługa profilaktyczna, obejmuje:

- przygotowanie technologiczne,
- postój obsługowy,
- obsługa techniczna.

Stan 5 – naprawa, obejmuje:

- nieplanowaną obsługę po uszkodzeniu urządzenia mającą na celu przywrócenie stanu zdatności.

Macierz prawdopodobieństwa przejść ma postać:

$$\mathbf{P}^p = \begin{bmatrix}
 -(\lambda_{12}^p + \lambda_{13}^p + \lambda_{14}^p) & \lambda_{12}^p & \lambda_{13}^p & \lambda_{14}^p & 0 \\
 \mu_{21}^p & -(\mu_{21}^p + \lambda_{25}^p) & 0 & 0 & \lambda_{25}^p \\
 \mu_{31}^p & 0 & -(\mu_{31}^p + \lambda_{35}^p) & 0 & \lambda_{35}^p \\
 \mu_{41}^p & 0 & 0 & -\mu_{41}^p & 0 \\
 \mu_{51}^p & 0 & 0 & 0 & -\mu_{51}^p
 \end{bmatrix} \quad (8.9)$$

a odpowiedni układ równań różniczkowych wynosi:

$$\begin{cases}
 P_1^{p'}(t) = -(\lambda_{12}^p + \lambda_{13}^p + \lambda_{14}^p)P_1^p(t) + \mu_{21}^p P_2^p(t) + \mu_{31}^p P_3^p(t) + \mu_{41}^p P_4^p(t) + \mu_{51}^p P_5^p(t) \\
 P_2^{p'}(t) = -(\mu_{21}^p + \lambda_{25}^p)P_2^p(t) + \lambda_{12}^p P_1^p(t) \\
 P_3^{p'}(t) = -(\mu_{31}^p + \lambda_{35}^p)P_3^p(t) + \lambda_{13}^p P_1^p(t) \\
 P_4^{p'}(t) = -\mu_{41}^p P_4^p(t) + \lambda_{14}^p P_1^p(t) \\
 P_5^{p'}(t) = -\mu_{51}^p P_5^p(t) + \lambda_{15}^p P_1^p(t)
 \end{cases} \quad (8.10)$$

Charakterystyka fazy „Transport kolejowy”

Transport kolejowy obejmuje przemieszczanie ładunku między terminalami. Graf stanów przedstawiono na rysunku 8.27. Rozróżnienie stanów umożliwi określenie:

- podstawowych parametrów eksploatacyjnych pociągu,
- intensywności uszkodzeń podczas pracy,
- intensywności uszkodzeń podczas przeładunku.

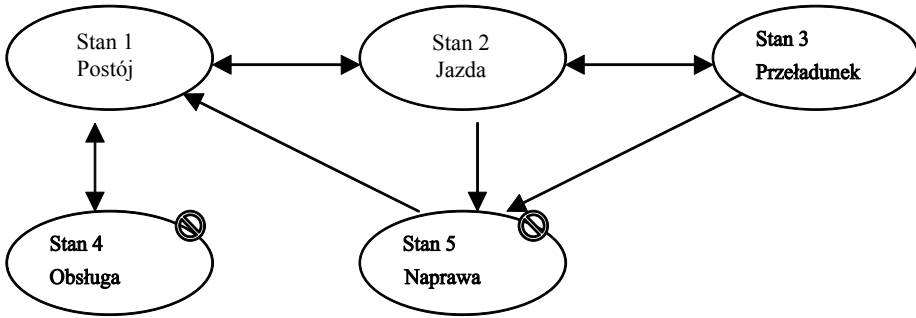
W fazie transportu kolejowego pojazdy mogą znajdować się w następujących stanach:

Stan 1 – postój, obejmuje:

- postój organizacyjny,
- postój na terminalu w oczekiwaniu na przeładunek,
- postój w oczekiwaniu na zgłoszenie transportowe.

Stan 2 – jazda (z ładunkiem lub bez), obejmuje:

- przejazd nieobciążonym pociągiem,



Rys. 8.27. Graf stanów w transporcie kolejowym [257]

- przejazd transportowy między terminalami,
- jazdę manewrową.

Stan 3 – przeładunek (na kolej/na samochód), obejmuje:

- załadunek i rozładunek na terminalach.

Stan 4 – obsługa profilaktyczna, obejmuje:

- przygotowanie technologiczne,
- postój obsługowy,
- obsługę techniczną,

Stan 5 – naprawa, obejmuje:

- nieplanowaną obsługę po uszkodzeniu pojazdu, mająca na celu przywrócenie stanu zdatności.

Odpowiednia macierz prawdopodobieństwa przejścia ma wówczas postać:

$$\mathbf{P}^k = \begin{bmatrix}
 -(\lambda_{12}^k + \lambda_{14}^k) & \lambda_{12}^k & 0 & \lambda_{14}^k & 0 \\
 \mu_{21}^k & -(\mu_{21}^k + \lambda_{23}^k + \lambda_{25}^k) & \lambda_{23}^k & 0 & \lambda_{25}^k \\
 0 & \mu_{32}^k & -(\mu_{32}^k + \lambda_{35}^k) & 0 & \lambda_{35}^k \\
 \mu_{41}^k & 0 & 0 & -\mu_{41}^k & 0 \\
 \mu_{51}^k & 0 & 0 & 0 & -\mu_{51}^k
 \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

Model niezawodności fazy transportu kolejowego jest dany układem równań:

$$\begin{cases}
 P_1^{k'} = -(\lambda_{12}^k + \lambda_{14}^k)P_1^k(t) + \mu_{21}^k P_2^k(t) + \mu_{41}^k P_4^k(t) + \mu_{51}^k P_5^k(t) \\
 P_2^{k'} = -(\mu_{21}^k + \lambda_{23}^k + \lambda_{25}^k)P_2^k(t) + \lambda_{12}^k P_1^k(t) + \mu_{32}^k P_3^k(t) \\
 P_3^{k'} = -(\mu_{32}^k + \lambda_{35}^k)P_3^k(t) + \lambda_{23}^k P_2^k(t) \\
 P_4^{k'} = -\mu_{41}^k P_4^k(t) + \lambda_{14}^k P_1^k(t) \\
 P_5^{k'} = -\mu_{51}^k P_5^k(t) + \lambda_{25}^k P_2^k(t) + \lambda_{35}^k P_3^k(t)
 \end{cases} \quad (8.12)$$

Przedstawiony model pięciofazowy uwzględnia problematykę prac przeładunkowych. Została również zmodyfikowana faza drogową systemu transportu intermodalnego. Modelowanie przeprowadzono według procesu odnowy Markowa, którego podstawowym ograniczeniem jest brak uwzględniania procesów starzeniowych obiektów.

8.3.3. PIĘCIOFAZOWY MODEL NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU TRANSPORTU INTERMODALNEGO (PROCES SEMI-MARKOWA)

Wykorzystanie w pięciofazowym modelu niezawodności systemu transportu intermodalnego procesów semi-Markowa pozwala w pewnym stopniu na uwzględnienie efektów procesów degradacji zachodzących w elementach systemu. Struktura grafów poszczególnych faz pozostała bez zmian. Natomiast model procesu semimarkowskiego [257] wymaga wyznaczenia dla każdej z faz (rozdz. 7):

- jądra odnowy,
- wektora rozkładu początkowego procesu,
- macierzy prawdopodobieństw przejść między stanami.

Model fazy drogowej

Rozpatrywany system działania fazy drogowej może być opisany procesem semimarkowskim $\{X(t): t \geq 0\}$ o skończonym zbiorze stanów $S_d = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. W tym przypadku proces zostanie określony jako macierz:

$$Q^d(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}^d(t) & 0 & 0 & Q_{15}^d(t) & 0 \\ Q_{21}^d(t) & 0 & Q_{23}^d(t) & 0 & 0 & Q_{26}^d(t) \\ 0 & Q_{32}^d(t) & 0 & Q_{34}^d(t) & 0 & Q_{36}^d(t) \\ 0 & 0 & Q_{43}^d(t) & 0 & 0 & Q_{46}^d(t) \\ Q_{51}^d(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{61}^d(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.13)$$

gdzie:

$$Q_{ij}(t) = p_{ij}F_{ij}(t)$$

$$p_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t)$$

$$\frac{Q_{ij}(t)}{p_{ij}} = F_{ij}(t)$$

Niech wektor $\mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6]$ będzie rozkładem początkowym procesu, którego wartość wynosi:

$$\mathbf{p} = [1, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (8.14)$$

Macierz prawdopodobieństwa przejść można zapisać:

$$\mathbf{p}^d = \begin{bmatrix} 0 & p_{12}^d & 0 & 0 & p_{15}^d & 0 \\ p_{21}^d & 0 & p_{23}^d & 0 & 0 & p_{26}^d \\ 0 & p_{32}^d & 0 & p_{34}^d & 0 & p_{36}^d \\ 0 & 0 & p_{43}^d & 0 & 0 & p_{46}^d \\ p_{51}^d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{61}^d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

gdzie:

$$p_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t)$$

Rozkład prawdopodobieństwa procesu semi-Markowa można obliczyć na podstawie rozkładu stacjonarnego włożonego łańcucha Markowa i wartości oczekiwanych trwania stanów procesu. Wówczas układ równań dla prawdopodobieństw stacjonarnych włożonego łańcucha Markowa przyjmuje postać:

$$\begin{cases} \pi_1 = p_{21}\pi_2 + p_{51}\pi_5 + p_{61}\pi_6 \\ \pi_2 = p_{12}\pi_1 + p_{32}\pi_3 \\ \pi_3 = p_{23}\pi_2 + p_{43}\pi_4 \\ \pi_4 = p_{34}\pi_3 \\ \pi_5 = p_{15}\pi_1 \\ \pi_6 = p_{26}\pi_2 + p_{36}\pi_3 + p_{46}\pi_4 \\ 1 = \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 \end{cases} \quad (8.16)$$

Wartości oczekiwane czasu trwania stanów wynoszą:

$$E(T_{d1}) = \int_0^{\infty} td[F_{12}^d(t) + F_{15}^d(t)] \quad (8.17)$$

$$E(T_{d2}) = \int_0^{\infty} td[F_{21}^d(t) + F_{23}^d(t) + F_{26}^d(t)] \quad (8.18)$$

$$E(T_{d3}) = \int_0^{\infty} td[F_{32}^d(t) + F_{34}^d(t) + F_{36}^d(t)] \quad (8.19)$$

$$E(T_{d4}) = \int_0^{\infty} td[F_{43}^d(t) + F_{46}^d(t)] \quad (8.20)$$

$$E(T_{d5}) = \int_0^{\infty} tdF_{51}^d(t) \quad (8.21)$$

$$E(T_{d6}) = \int_0^{\infty} tdF_{61}^d(t) \quad (8.22)$$

Natomiast rozkład graniczny tego procesu semimarkowskiego ma postać:

$$P_{d1} = \frac{\pi_1 E(T_{d1})}{\pi_1 E(T_{d1}) + \pi_2 E(T_{d2}) + \pi_3 E(T_{d3}) + \pi_4 E(T_{d4}) + \pi_5 E(T_{d5}) + \pi_6 E(T_{d6})} \quad (8.23)$$

$$P_{d2} = \frac{\pi_2 E(T_{d2})}{\pi_1 E(T_{d1}) + \pi_2 E(T_{d2}) + \pi_3 E(T_{d3}) + \pi_4 E(T_{d4}) + \pi_5 E(T_{d5}) + \pi_6 E(T_{d6})} \quad (8.24)$$

$$P_{d3} = \frac{\pi_3 E(T_{d3})}{\pi_1 E(T_{d1}) + \pi_2 E(T_{d2}) + \pi_3 E(T_{d3}) + \pi_4 E(T_{d4}) + \pi_5 E(T_{d5}) + \pi_6 E(T_{d6})} \quad (8.25)$$

$$P_{d4} = \frac{\pi_4 E(T_{d4})}{\pi_1 E(T_{d1}) + \pi_2 E(T_{d2}) + \pi_3 E(T_{d3}) + \pi_4 E(T_{d4}) + \pi_5 E(T_{d5}) + \pi_6 E(T_{d6})} \quad (8.26)$$

$$P_{d5} = \frac{\pi_5 E(T_{d5})}{\pi_1 E(T_{d1}) + \pi_2 E(T_{d2}) + \pi_3 E(T_{d3}) + \pi_4 E(T_{d4}) + \pi_5 E(T_{d5}) + \pi_6 E(T_{d6})} \quad (8.27)$$

$$P_{d6} = \frac{\pi_6 E(T_{d6})}{\pi_1 E(T_{d1}) + \pi_2 E(T_{d2}) + \pi_3 E(T_{d3}) + \pi_4 E(T_{d4}) + \pi_5 E(T_{d5}) + \pi_6 E(T_{d6})} \quad (8.28)$$

Graniczny współczynnik gotowości danej fazy można zapisać w następującej postaci:

$$K_d = P_{d1} + P_{d2} + P_{d3} + P_{d4} = \frac{\pi_1 E(T_{d1}) + \pi_2 E(T_{d2}) + \pi_3 E(T_{d3}) + \pi_4 E(T_{d4})}{\pi_1 E(T_{d1}) + \pi_2 E(T_{d2}) + \pi_3 E(T_{d3}) + \pi_4 E(T_{d4}) + \pi_5 E(T_{d5}) + \pi_6 E(T_{d6})} \quad (8.29)$$

Model fazy przeładunku

Analogicznie do modelu fazy drogowej jądro procesu zostało określone przez macierz:

$$\mathbf{Q}^p(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}^p(t) & Q_{13}^p(t) & Q_{14}^p(t) & 0 \\ Q_{21}^p(t) & 0 & 0 & 0 & Q_{25}^p(t) \\ Q_{31}^p(t) & 0 & 0 & 0 & Q_{35}^p(t) \\ Q_{41}^p(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{51}^p(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.30)$$

gdzie:

$$Q_{ij}(t) = p_{ij} F_{ij}(t)$$

$$p_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t)$$

$$\frac{Q_{ij}(t)}{p_{ij}} = F_{ij}(t)$$

Dla wektora rozkładu początkowego procesu:

$$\mathbf{p} = [1, 0, 0, 0, 0] \quad (8.31)$$

macierz prawdopodobieństwa przejścia można zapisać:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & p_{12}^p & p_{13}^p & p_{14}^p & 0 \\ p_{21}^p & 0 & 0 & 0 & p_{25}^p \\ p_{31}^p & 0 & 0 & 0 & p_{35}^p \\ p_{41}^p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{51}^p & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.32)$$

Wówczas wartości oczekiwane czasu trwania stanów wynoszą:

$$E(T_{p1}) = \int_0^{\infty} t d[F_{12}^p(t) + F_{13}^p(t) + F_{15}^p(t)] \quad (8.33)$$

$$E(T_{p2}) = \int_0^{\infty} td[F_{21}^p(t) + F_{25}^p(t)] \quad (8.34)$$

$$E(T_{p3}) = \int_0^{\infty} td[F_{31}^p(t) + F_{35}^p(t)] \quad (8.35)$$

$$E(T_{p4}) = \int_0^{\infty} td[F_{41}^p(t)] \quad (8.36)$$

$$E(T_{p5}) = \int_0^{\infty} tdF_{51}^p(t) \quad (8.37)$$

Rozkład graniczny tego procesu semimarkowskiego ma postać:

$$P_{p1} = \frac{\pi_1 E(T_{p1})}{\pi_1 E(T_{p1}) + \pi_2 E(T_{p2}) + \pi_3 E(T_{p3}) + \pi_4 E(T_{p4}) + \pi_5 E(T_{p5})} \quad (8.38)$$

$$P_{p2} = \frac{\pi_2 E(T_{p2})}{\pi_1 E(T_{p1}) + \pi_2 E(T_{p2}) + \pi_3 E(T_{p3}) + \pi_4 E(T_{p4}) + \pi_5 E(T_{p5})} \quad (8.39)$$

$$P_{p3} = \frac{\pi_3 E(T_{p3})}{\pi_1 E(T_{p1}) + \pi_2 E(T_{p2}) + \pi_3 E(T_{p3}) + \pi_4 E(T_{p4}) + \pi_5 E(T_{p5})} \quad (8.40)$$

$$P_{p4} = \frac{\pi_4 E(T_{p4})}{\pi_1 E(T_{p1}) + \pi_2 E(T_{p2}) + \pi_3 E(T_{p3}) + \pi_4 E(T_{p4}) + \pi_5 E(T_{p5})} \quad (8.41)$$

$$P_{p5} = \frac{\pi_5 E(T_{p5})}{\pi_1 E(T_{p1}) + \pi_2 E(T_{p2}) + \pi_3 E(T_{p3}) + \pi_4 E(T_{p4}) + \pi_5 E(T_{p5})} \quad (8.42)$$

Zgodnie ze zdefiniowanymi stanami zdatności graniczny współczynnik gotowości fazy przeładunku można zapisać jako:

$$K_p = P_{p1} + P_{p2} + P_{p3} = \frac{\pi_1 E(T_{p1}) + \pi_2 E(T_{p2}) + \pi_3 E(T_{p3})}{\pi_1 E(T_1) + \pi_2 E(T_2) + \pi_3 E(T_3) + \pi_4 E(T_4) + \pi_5 E(T_5)} \quad (8.43)$$

Model fazy kolejowej

Jądro procesu dla fazy kolejowej ma postać:

$$\mathbf{Q}^k(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}^k(t) & 0 & Q_{14}^k(t) & 0 \\ Q_{21}^k(t) & 0 & Q_{23}^k(t) & 0 & Q_{25}^k(t) \\ 0 & Q_{32}^k(t) & 0 & 0 & Q_{35}^k(t) \\ Q_{41}^k(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{51}^k(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.44)$$

gdzie:

$$Q_{ij}(t) = p_{ij} F_{ij}(t)$$

$$p_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t)$$

$$\frac{Q_{ij}(t)}{p_{ij}} = F_{ij}(t)$$

Dla wektora rozkładu początkowego procesu:

$$\mathbf{p} = [1, 0, 0, 0, 0]$$

macierz prawdopodobieństwa przejścia można zapisać jako:

$$\mathbf{P}^k = \begin{bmatrix} 0 & p_{12}^k & 0 & p_{14}^k & 0 \\ p_{21}^k & 0 & p_{23}^k & 0 & p_{25}^k \\ 0 & p_{32}^k & 0 & 0 & p_{35}^k \\ p_{41}^k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{51}^k & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.45)$$

Wtedy wartości oczekiwane czasu trwania stanu mają postać:

$$E(T_{k1}) = \int_0^{\infty} t dt [F_{12}^k(t) + F_{15}^k(t)] \quad (8.46)$$

$$E(T_{k2}) = \int_0^{\infty} t dt [F_{21}^k(t) + F_{23}^k(t) + F_{25}^k(t)] \quad (8.47)$$

$$E(T_{k3}) = \int_0^{\infty} td[F_{32}^k(t) + F_{35}^k(t)] \quad (8.48)$$

$$E(T_{k4}) = \int_0^{\infty} td[F_{41}^k(t)] \quad (8.49)$$

$$E(T_{k5}) = \int_0^{\infty} tdF_{51}^k(t) \quad (8.50)$$

Rozkład graniczny procesu semimarkowskiego wynosi:

$$P_{k1} = \frac{\pi_1 E(T_{k1})}{\pi_1 E(T_{k1}) + \pi_2 E(T_{k2}) + \pi_3 E(T_{k3}) + \pi_4 E(T_{k4}) + \pi_5 E(T_{k5})} \quad (8.51)$$

$$P_{k2} = \frac{\pi_2 E(T_{k2})}{\pi_1 E(T_{k1}) + \pi_2 E(T_{k2}) + \pi_3 E(T_{k3}) + \pi_4 E(T_{k4}) + \pi_5 E(T_{k5})} \quad (8.52)$$

$$P_{k3} = \frac{\pi_3 E(T_{k3})}{\pi_1 E(T_{k1}) + \pi_2 E(T_{k2}) + \pi_3 E(T_{k3}) + \pi_4 E(T_{k4}) + \pi_5 E(T_{k5})} \quad (8.53)$$

$$P_{k4} = \frac{\pi_4 E(T_{k4})}{\pi_1 E(T_{k1}) + \pi_2 E(T_{k2}) + \pi_3 E(T_{k3}) + \pi_4 E(T_{k4}) + \pi_5 E(T_{k5})} \quad (8.54)$$

$$P_{k5} = \frac{\pi_5 E(T_{k5})}{\pi_1 E(T_{k1}) + \pi_2 E(T_{k2}) + \pi_3 E(T_{k3}) + \pi_4 E(T_{k4}) + \pi_5 E(T_{k5})} \quad (8.55)$$

Zgodnie z określonymi stanami zdatności, graniczny współczynnik gotowości danej fazy można zapisać w następującej postaci:

$$K_k = P_{k1} + P_{k2} + P_{k3} = \frac{\pi_1 E(T_{k1}) + \pi_2 E(T_{k2}) + \pi_3 E(T_{k3})}{\pi_1 E(T_1) + \pi_2 E(T_2) + \pi_3 E(T_3) + \pi_4 E(T_4) + \pi_5 E(T_5)} \quad (8.56)$$

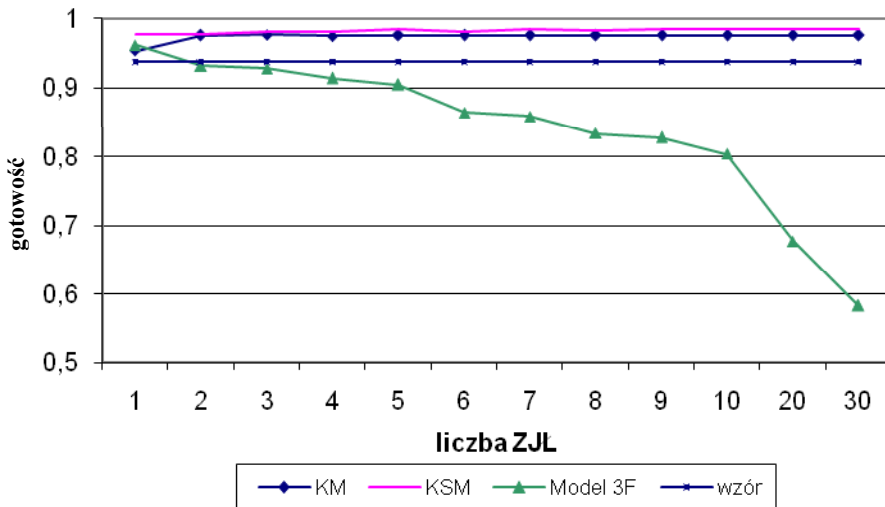
8.3.4. PORÓWNANIE MODELI

W pracy [257] przeprowadzono analizę porównawczą omówionych modeli transportu intermodalnego.

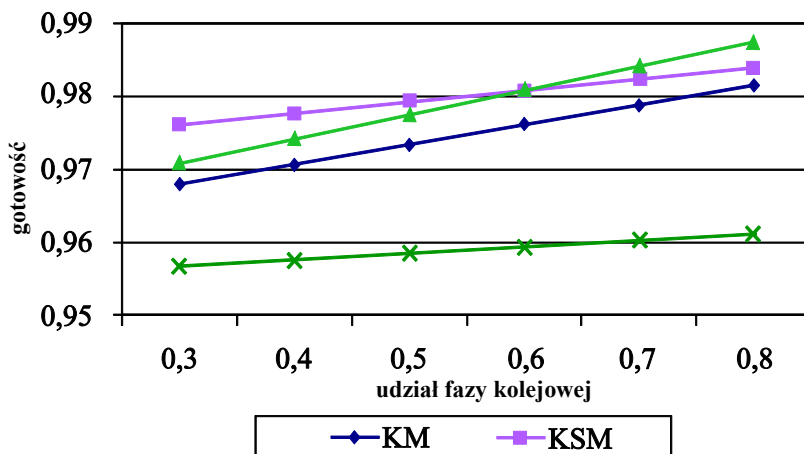
Założono, że prawdopodobieństwo opisujące system charakteryzuje się rozkładem wykładniczym. Wprowadzono to założenie, by była możliwość porównania modeli opisanych procesem markowskim i semimarkowskim. Model pięciofazowy

semimarkowski powinien dawać wyniki takie, jak ten opisany procesem odnowy Markowa.

Przyjęto także, że podstawowym parametrem różnicującym parametry wejściowe do systemu jest liczba zintegrowanych jednostek ładunkowych (ZJŁ), którą dziennie ma obsługiwać system. Od tej wielkości zależy prawdopodobieństwo przejścia między stanami oraz wartości oczekiwane czasu trwania stanów.



Rys. 8.28. Gotowość fazy drogowej [257]
(KM – model Markowa, KSM – model semi-Markowa, 3F – model trójfazowy)



Rys. 8.29. Gotowość systemu przy transporcie jednego kontenera [257]
(KM – model Markowa, KSM – model semi-Markowa)

Dla zgromadzonych danych badawczych ([253], [258]) obliczono charakterystyki niezawodnościowe analizowanych modeli. Między innymi oszacowano gotowość poszczególnych faz systemu, w tym fazy drogowej – rys. 8.28 oraz gotowość całego systemu w zależności od liczby transportowanych kontenerów – rys. 8.29.

Przeprowadzone obliczenia oraz analiza wyników wskazują [257], że model pięcioletni daje wyniki bliższe rzeczywistości niż model trójfazowy. Analiza poszczególnych faz nie daje dużych różnic gotowości w modelach trój- i pięcioletnim, gdy liczba przeładowanych jednostek ładunkowych nie jest większa niż 5–10. Można jednak przyjąć, że model pięcioletni daje wyniki zbliżone bądź równe otrzymanym z danych doświadczalnych.

Dla określonych założeń pracy systemu transportu intermodalnego można uzyskać gotowość systemu na poziomie 0,97–0,99 w zależności od liczby obsługiwanych jednostek ładunkowych oraz udziału czasu trwania fazy kolejowej. Gotowość wzrasta, gdy:

- liczba obsługiwanych zintegrowanych jednostek ładunkowych jest większa,
- udział fazy kolejowej w czasie trwania procesu transportowego jest także większy.

9. PODSUMOWANIE

W pracy skoncentrowano się na zagadnieniach związanych z modelowaniem i oceną niezawodności systemów logistycznych.

Opublikowane niedawno bardzo obszerne badania światowego rynku logistycznego wskazały na kilka trendów na światowym rynku logistycznym. W ocenie respondentów znaczenie logistyki dla efektywnego funkcjonowania firmy będzie zwiększało się w perspektywie lat 2015–2020. Analizując perspektywy wzrostu znaczenia poprawnej realizacji procesów logistycznych w różnych branżach, wskazano przede wszystkim na przemysł elektroniczny i przemysł budowy maszyn. Dość oczywista opinia dotyczy również wzrostu znaczenia poprawnego funkcjonowania systemów logistycznych w handlu wysyłkowym i stosunkowo małego zainteresowania problemem w przemyśle wydobywczym.

W przeprowadzonej analizie i prognozie aktywności logistycznej przedsiębiorstw, niezależnie od obszaru działalności firmy, za najważniejszą właściwość procesu logistycznego uznano niezawodność. Takie preferencje są ważne zarówno obecnie, jak i w perspektywie 2015 roku. W skali od 1 (małe znaczenie) do 5 (duże znaczenie) respondenci ocenili ważność niezawodności procesu od 3,9 do 4,2.

W zakresie działań sformułowanych w polityce logistycznej UE, mających na celu podniesienie jakości i wydajności procesów logistycznych proponuje się kontynuację podjętych wcześniej przedsięwzięć, takich jak ciągła eliminacja „wąskich gardeł” czy propagowanie sprawdzonych rozwiązań. Nowymi elementami polityki transportowej UE są koncepcje wsparcia szkolenia pracowników w sektorze logistyki, działań na rzecz podnoszenia jakości świadczonych usług logistycznych oraz poszukiwania metod oceny i analizy poprawności funkcjonowania procesów logistycznych i transportowych. Opracowane modele i metody oceny funkcjonowania systemów logistycznych mają pozwolić na wykorzystanie ogromnej ilości gromadzonych danych statystycznych. Uważa się, że obecnie nie dają one wiarygodnego obrazu rynku logistycznego w Europie. Należy zatem opracować odpowiednie wskaźniki i inne narzędzia służące pomiarom, aby ocenić sytuację i zmiany, jakim podlega ona w czasie.

Założenia polityki transportowej (logistycznej) Polski precyzują 10 wyzwań warunkujących dalszy rozwój kraju. Do zidentyfikowanych zadań należy zbudowanie odpowiedniego potencjału infrastruktury transportowej i logistycznej. Podkreślono, że

we współczesnej gospodarce cechą charakterystyczną jest synergia czterech kanałów: trzech rodzajów transportu towarów, usług i osób (dróg, kolei, połączeń lotniczych) oraz infrastruktury teleinformatycznej. Łączy się z tym potrzeba komplementarności tworzonych różnorodnych połączeń, wykorzystania funkcji poszczególnych kanałów komunikacji oraz stworzenia warunków dla multimodalności. Podstawą oceny osiągnięcia zadanych celów będzie m.in.: jakość usługi dla klienta oraz efektywność ekonomiczna rozwiązań.

Analiza najlepszych europejskich projektów logistycznych wdrożonych w latach 2009–2010 potwierdza, że w projektach podkreślana jest potrzeba podnoszenia niezawodności systemu logistycznego. Niezawodność jest rozumiana najczęściej jako stopień zaspokojenia potrzeb klienta (słabo rozróżniane są pojęcia: niezawodność, jakość, bezpieczeństwo, ryzyko). Brakuje natomiast bardziej precyzyjnych sposobów pomiaru niezawodności, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia porównywanie wyników poszczególnych badań.

Najnowsze podsumowanie dyskusji dotyczącej sposobów definiowania logistyki wskazuje, że biorąc pod uwagę takie cechy, jak przedmiot, metoda i cele logistyki, można sformułować następującą definicję: logistyka jako dziedzina wiedzy naukowej bada zjawiska i procesy determinujące przepływ dóbr i związanych z nimi informacji oraz dostarcza odpowiednich metod i instrumentów kształtowania tego przepływu zgodnie z ustalonymi celami.

Niezależnie od różnych analizowanych definicji, w pojęciu logistyka pojawiają się następujące wspólne elementy:

- zagadnienie zarządzania (planowania, organizowania, realizacji, kontroli) przepływem surowców materiałów, półproduktów od miejsca zaopatrzenia, poprzez produkcję, po dostawę do konsumenta,
 - problem zwrotnego przepływu odpadów, zużytych lub uszkodzonych elementów, opakowań do miejsca ich ponownego użycia lub utylizacji (kasacji),
 - integracja przepływów materiałowych z przepływem informacji,
 - minimalizowanie kosztów działalności,
 - zapewnienie wystarczającego poziomu obsługi klienta.
- Trzeba pamiętać, że logistyka funkcjonuje na styku:
- techniki – infrastruktura techniczna procesów:
 - transportowych,
 - magazynowych,
 - manipulacyjnych,
 - opakowaniowych;
 - informatyki – infrastruktura informatyczna procesów:
 - sprzętowych,
 - oprogramowania,
 - środków komunikacji;
 - zarządzania – infrastruktura biznesowa procesów:

- strategii i metod skutecznego i efektywnego zarządzania przepływem materiałowym;
- integrowanie przepływu materiałów i informacji w celu wzrostu produktywności przedsiębiorstw oraz ich konkurencyjności na rynku.

Można zatem system logistyczny zdefiniować jako celowo zorganizowany i połączony zbiór elementów (podsystemów), takich jak m.in.: produkcja, transport, magazynowanie – wraz z relacjami między nimi oraz ich właściwościami, warunkującymi przepływ strumieni towarów, środków finansowych i informacji. W ramach systemu logistycznego rozpatruje się najczęściej trzy przekroje (struktury):

- przestrzenny: akcentowany w definicji przez połączenie elementów systemu i przepływ strumieni towarów,
- organizacyjny: definicja mówi o zorganizowaniu elementów systemu,
- informacyjny: w definicji przejawia się w postaci przepływu strumieni finansowych i informacji.

Wśród elementów systemu logistycznego wyróżnia się: węzły i ścieżki sieci zaopatrzeniowej rozpatrywanej w dwóch warstwach – fizycznej (ludzie i zasoby materialne) oraz informacyjnej (ujęcie ilościowe i wartościowe). Wobec tego do najważniejszych elementów systemu logistycznego należą:

- środki techniczne umożliwiające przemieszczenie, przeładunek i magazynowanie towarów w cyklach zaopatrzeniowych (od powstania produktu do konsumenta),
- zintegrowane sieci komputerowe umożliwiające automatyzację i wspomaganie zarządzania i sterowania procesami logistycznymi,
- służby decyzyjne zarządzające fizycznym przemieszczaniem towarów.

Ze względu na ocenę niezawodnościowego funkcjonowania systemu logistycznego należy odnieść się do kryterium efektywnościowego. Kryterium to oznacza, że system logistyczny powinien gwarantować z jednej strony uzyskanie pożądanego efektu – poziomu i jakości obsługi logistycznej, z drugiej natomiast – jego realizacja powinna mieć odpowiednią sprawność (musi istnieć racjonalna relacja między nakładami a efektami systemu i poszczególnych podsystemów). Jako efekty eksploatacji systemu logistycznego należy traktować przejawy realizacji jego celów i zadań, a jako nakłady – określone czynności i przedsięwzięcia podejmowane na rzecz realizacji tych zadań.

Można również zdefiniować system wsparcia logistycznego, który jest określany jako celowo zorganizowany podsystem systemu technicznego, wspierający jego proces podstawowy (eksploatację) przez integrację wszystkich działań związanych z efektywnym i korzystnym przepływem niezbędnych zasobów rzeczowych i informacyjnych oraz wspierający obsługę procesu eksploatacji w zakresie zapewnienia koniecznego dla tego procesu zaplecza logistycznego (wyposażenia wspierającego i kontrolno-pomiarowego). Przedstawiona definicja odnosi się z jednej strony do cyklu istnienia systemu, a z drugiej strony obejmuje zarówno cechy logistyki przedsiębiorstwa, jak i logistyki wojskowej.

Zadania systemu logistycznego realizowane są przez procesy logistyczne, które towarzyszą każdemu procesowi podstawowemu. W obszarze wsparcia systemów technicznych procesy logistyczne mają na celu przede wszystkim:

– zabezpieczenie właściwego funkcjonowania systemu eksploatacyjnego w zasoby i w usługi:

- zapewnienie i naprawa części wymiennych, podzespołów, zespołów i modułów wyposażenia technicznego systemu,
- zapewnienie terminowości obsługi naprawy, zgodnie z wymaganiami i potrzebami zarówno systemu technicznego, jak i systemów obsługowych,
 - utrzymanie środków trwałych w stanie zdolności funkcjonalnej i zadaniowej:
 - zapewnienie niezbędnych maszyn i urządzeń do prawidłowego funkcjonowania zaplecza technicznego w zakresie potrzeb i wymagań systemu obsługowego i przewozowego,
 - realizacja procesów obsługowo-naprawczych maszyn i urządzeń stanowiących wyposażenie jednostek organizacyjnych zaplecza.

System logistyczny realizuje więc przekształcenia ze względu na:

- czas:
 - składowania krótkotrwałego – buforowanie materiałów w podukładach rozdzielających i konsolidujących strumienie materiałowe,
 - składowania długotrwałego – bieżące, zapewniające ciągłość działania układów dystrybucji i produkcji,
 - składowania długotrwałego – rezerwowe, umożliwiające gromadzenie dóbr materialnych w celach strategicznych, obronnych i innych znaczących ze względu na utrzymanie sprawności działania całego systemu.
- miejsce: transport materiałów w różnych postaciach pomiędzy blokami funkcjonalnymi systemu, umożliwiający realizację podstawowych przekształceń w tych blokach; transport może być realizowany przez różne gałęzie transportu oraz ich kombinacje, tak aby zapewnione było efektywne wykorzystanie różnych form transportu.
- postać: czyli szeroko rozumianą zmianę formy fizycznej materiałów ze względu na działania podjęte w blokach funkcjonalnych systemu; w ramach przekształcenia ze względu na postać można mówić o produkcji, która zmienia fizyczną postać materiałów oraz o operacjach zmiany postaci ładunkowej – komisjonowaniu, pakowaniu, przepakowywaniu, a także przeładunkach.

Podstawowym zadaniem elementu logistycznego jest wzajemne powiązanie sekwencji działań, gdy na początku występuje źródło, w którym pojawia się towar, a na końcu ujście, gdzie przesyłany towar jest wchłaniany przez odbiorcę. Taki element logistyczny możemy utożsamiać z elementarnym kanałem dystrybucji. Błędem lub uszkodzeniem elementu systemu logistycznego jest niewykonanie zadania związanego z przepływem towaru lub, w dalszej analizie, także informacji.

Korzystając z przedstawionej koncepcji elementu logistycznego, można zbudować model systemu logistycznego, który wymaga określenia:

- zbioru elementów systemu **E**,
- zbioru właściwości (atrybutów) elementów **A**,
- zbioru relacji między atrybutami (lub elementami) **R**.

Zbiór elementów systemu **E** zawiera elementarne ogniwa łańcucha logistycznego zbudowane, w sensie technologicznym, z węzłów **W** o charakterze źródeł i ujść ładunków, węzłów bufora magazynowego, węzłów informacyjnych oraz łuków **L** łączących odpowiednie węzły.

W analizie wskaźników oceny poszczególnych podsystemów logistycznych formułuje się wskaźniki związane z bezbłędnym realizowaniem zadania przez podsystem. Dla procesu zaopatrzenia są to:

- niezawodność dostawy – pewność realizacji dostawy oznacza prawdopodobieństwo dotrzymania ustalonych terminów dostawy i zgodności dostawy z zamówieniem (stosunek terminowo dostarczonych zamówień do całkowitej liczby zapotrzebowań),

- jakość dostawy – wydanie pożądaných i zamawianých produktów według rodzaju i liczby oraz stanu przesyłki, tj. kompletność, prawidłowość dokumentacji, zgodność opakowania z przepisami i życzeniami zamawiającego, uniknięcie uszkodzeń w czasie transportu i przeładunków (stosunek liczby reklamacji i całkowitej liczby zapotrzebowań),

- elastyczność dostaw (zdolność do dostosowania się do określonych potrzeb klientów) może być określona stosunkiem liczby spełnionych życzeń specjalnych do liczby tych życzeń,

- gotowość do świadczenia dostaw może być wyrażona przez stosunek liczby zapotrzebowań zrealizowanych z magazynu do całkowitej liczby zapotrzebowań.

W procesie produkcji pojawia się:

- udział wadliwej produkcji – wartość wyrobów wadliwych w stosunku do łącznej wartości wyrobów,

- udział przestoju w produkcji – stosunek przestoju w produkcji do czasu pracy ogółem,

- przeciętny okres trwania zatrzymań,

- częstotliwość wypadków i uszkodzeń.

W procesie dystrybucji powtarzają się wskaźniki:

- gotowości dostawczej,

- pewności (niezawodności) dostaw,

- udziału nieprawidłowych lub opóźnionych dostaw,

- udziału zwrotów dostaw,

- udziału powtórnych dostaw,

- udziału reklamowanych dostaw wyrobów.

W fazie transportu ocenia się m.in.:

- niezawodność transportu – stosunek liczby terminowo wykonanych przewozów do liczby przewozów ogółem,

- udział uszkodzeń – stosunek liczby uszkodzonych jednostek transportowych do liczby przewiezionych jednostek transportowych ogółem.

W zakresie gospodarki magazynowej pojawiające się błędy są oceniane m.in. przez:

- wskaźnik bezbłędnych dostaw,

- wskaźnik bezbłędnie wystawionych faktur,

- wskaźnik zamówień zrealizowanych z opóźnieniem,
- wskaźnik zamówień zrealizowanych w niepełnym wymiarze asortymentowym,
- wskaźnik reklamowanych dostaw.

W ujęciu technicznym niezawodność systemu (obiektu technicznego) jest definiowana jako zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi. Stwierdza się, że termin niezawodność powinien być używany tylko do ogólnego nieliczbowego opisu. Natomiast według normy IEC niezawodność jest postrzegana na dwa sposoby: jako właściwość opisywana w kategoriach probabilistycznych (obejmuje zdarzenia i procesy losowe) i w kategoriach deterministycznych.

Podobne rozumienie pojęcia niezawodności systemów w odniesieniu do realizacji zadań logistycznych przeciwstawia niezawodności podatność na zakłócenia (*vulnerability*). System podatny na zakłócenia charakteryzuje się niskim stopniem realizacji zadań, co wyrażone być może przez brak zdolności do obsługi, brak dostępności i zmienność w pewnych okolicznościach, ze względu na brak zabezpieczeń, niski poziom wytrzymałości i elastyczności. Natomiast system odporny na zakłócenia charakteryzuje się wysokim stopniem realizacji zadań, co może być wyrażone przez zdolność do obsługi, dostępność, niezmienną w każdych warunkach, i następuje dzięki odpowiedniemu zabezpieczeniu w razie uszkodzenia, dużej wytrzymałości (trwałości) i elastyczności.

W rozważaniach logistycznych wyróżnić można dwa podstawowe pojęcia dotyczące stanów niezawodnościowych systemu wspierającego: zdalny do zrealizowania zadań, jakie stawia się systemowi logistycznemu oraz stan niezdatności, który może doprowadzić np. do:

- zakłócenia lub wręcz uniemożliwienia podjęcia realizacji bieżącego zadania logistycznego,
- niezdolności do podjęcia realizacji nowych zadań logistycznych.

Obecnie w literaturze zagadnienia nie ma jednoznacznej definicji niezawodności systemu logistycznego. W logistyce cywilnej (biznesowej), niezawodność jest przede wszystkim odnoszona do problemu zapewnienia terminowego i niezakłóconego procesu dostawy zamówionych produktów. Znaczenie pojęcia niezawodności systemu w obszarze logistyki wojskowej jest z kolei definiowane jako jego zdolność do zapewnienia gotowości wszelkich zasobów (np. transportowych, części wymiennych, wyposażenia wspierającego), niezbędnych w procesie realizacji zadań operacyjnych systemu wojskowego. Jednocześnie pojęcie niezawodności systemu wsparcia logistycznego określono jako zdolność systemu wsparcia do niezakłóconej realizacji procesu wspierającego system techniczny w zakresie dostarczenia niezbędnych zasobów logistycznych (części wymiennych, personelu, wyposażenia itp.), w określonym przedziale czasu i dla ustalonych warunkach operacyjnych.

Gotowość systemu logistycznego oznacza dostępność wszelkich niezbędnych zasobów w procesie eksploatacji systemu. Jednocześnie zasoby, w ujęciu ogólnym, definiowane są jako wszelkie elementy (w tym urządzenia, maszyny, części wymienne,

wyposażenie dodatkowe, wspierające i kontrolno-pomiarowe), niezbędne do: wyposażenia, funkcjonowania, utrzymania i wsparcia procesów podstawowych systemu technicznego.

Informacja o przebiegu procesu podstawowego systemu wspieranego pozwala na identyfikację stanów eksploatacji i niezawodności, w jakich może przebywać ten system oraz ustalenie reguł rządzących ich kolejnymi zmianami, co z kolei ma znaczący wpływ na realizację zadań logistycznych. Jednocześnie wiąże się to z właściwym zaprojektowaniem systemu wspierającego pod kątem niezawodności i doboru charakterystyk podsystemów użytkowania i wsparcia.

Rozwiązania organizacyjne w obrębie samego systemu logistycznego decydują o poziomie jego gotowości, poprzez definicję i kontrolowanie poziomu podstawowych parametrów tego systemu, do których należą m.in.:

- poziom gotowości dostaw (organizacja, terminowość i niezawodność dostaw),
- dyspozycyjność niezbędnych części wymiennych, oprzyrządowania do wykonania bieżących napraw,
- efektywność procesów: pakowania, manipulowania, magazynowania i transportowania,
- jakość organizacji procesów administracyjnych (terminowość),
- efektywność pomiaru i kontroli konkretnych parametrów poszczególnych elementów systemu wsparcia logistycznego (niezawodność, właściwy wybór parametrów),
- niezawodność i pewność przepływu informacji.

Proponowany podział wskaźników gotowości systemu logistycznego bazuje na wykorzystaniu czterech podstawowych miar.

Pierwszą grupą wymienionych wskaźników są tzw. współczynniki *braku zdolności systemu logistycznego do realizacji zadań wspierających*, określające procent czasu, w którym system logistyczny nie może realizować zadań wspierających z powodu braku części wymiennych i/lub braku dostępnego wyposażenia, niezbędnego do przeprowadzenia procesu obsługi. Poziom danych wskaźników kształtują przede wszystkim parametry podsystemu zaopatrzenia (organizacja dostaw części wymiennych), gospodarki magazynowej (zarządzanie zapasami) oraz podsystemu dystrybucji.

Kolejnym miernikiem jest *elastyczność wsparcia logistycznego*. Pierwotnie wskaźnik ten był definiowany jako czas niezbędny do uzyskania 20% wzrostu produkcji. Obecnie miernik ten określa czas (liczbę dni), jaki jest niezbędny do osiągnięcia nieplanowanej zmiany w systemie wsparcia logistycznego, wywołanej zmianą parametrów funkcjonowania systemu technicznego lub sieci dostaw zasobów wspierających. Najczęściej w obszarze tym definiuje się wskaźniki:

- elastyczność wsparcia dla istniejącej sieci dostawców – odzwierciedlająca poziom czasu reakcji na zwiększone zapotrzebowanie na zasoby, realizowane przez istniejącą sieć dostawców,
- elastyczność sieci dostaw z nowym dostawcą – definiowana jako czas, niezbędny do pozyskania nowego dostawcy w celu zapewnienia zaopatrzenia w niezbędne zasoby.

Trzecią miarą gotowości systemu logistycznego jest *niezawodność* określana jako zdolność systemu do nieprzerwanej realizacji zadań wspierających. Zagadnienie to obejmuje w systemie logistycznym przede wszystkim:

- niezawodność dostawy – definiowaną jako prawdopodobieństwo dotrzymania ustalonych terminów i zgodność dostawy z zamówieniem,
- niezawodność transportu – określaną jako prawdopodobieństwo terminowego i niezakłóconego uszkodzeniami dostarczenia zamówienia,
- niezawodność infrastruktury logistycznej – obejmującą parametry pracy personelu oraz wyposażenia wspierającego (urządzenia, narzędzia, wyposażenie kontrolno-pomiarowe).

Ostatnią analizowaną miarą jest *czas odpowiedzi systemu logistycznego* (*Logistics Response Time*). Wskaźnik ten definiuje czas, jaki jest niezbędny na realizację procesu wspierającego – od chwili, w której została zidentyfikowana potrzeba logistyczna, do momentu jej zrealizowania. Zwykle wskaźnik ten obejmuje:

- czas niezbędny na zaopatrzenie systemu w nowe obiekty,
- czas dostawy z magazynu do miejsca realizacji obsługi,
- czas niezbędny na zapewnienie m.in. wymaganego wyposażenia wspierającego i kontrolno-pomiarowego oraz odpowiedniego personelu.

W porównaniu z definicją niezawodności systemu technicznego należy zwrócić uwagę na podstawowe różnice w rozumieniu w logistyce pojęcia niezawodności:

- niezawodność jest rozumiana „wąsko”, tylko jako miara realizacji zadania w czasie, co można porównać do pojęcia nieuszkodzalności,
- w obu zbiorach pojęć: „logistycznym” i „technicznym”, korzysta się w podobny sposób z pojęcia gotowości,
- w ujęciu „logistycznym” niesformułowano odpowiednika charakterystyki obsługiwalności lub naprawialności (nie ocenia się czynności przeciwdziałających pojawieniu się błędów, brak wskaźników charakteryzujących usuwanie skutków wystąpienia błędu),
- wszystkie miary mają charakter współczynników (wskaźników struktury); nie korzysta się z innych charakterystyk, mimo że oceniana procesy są procesami losowymi.

Główny cel postawiony systemowi logistycznemu dotyczy dostarczeniu klientowi danego produktu po spełnieniu wymaganych warunków. Tak rozumiany cel został opisany formułą 7R (*Right product, Right quantity, Right quality, Right place, Right time, Right customer, Right price*). Niezawodność działania systemu będzie zatem oznaczać:

- zapewnienie dostępności właściwych produktów,
- właściwą ilość (kompletna realizacja zamówienia),
- właściwą jakość (otrzymanie produktu bez uszkodzenia),
- właściwe miejsce,
- czas (terminowe wykonania zadania),
- właściwy odbiorca (dokładną realizację zamówienia),
- właściwą cenę (dokładne zafakturowanie zamówienia).

Ocena niezawodności funkcjonowania systemu logistycznego wysuwa na pierwsze miejsce spośród różnych wymienionych charakterystyk czynnik czasu. Niezależnie od rodzaju błędów popełnionych w trakcie realizacji zadania, wszystkie poza opóźnieniem wykonania zadania mogą być naprawione zgodnie z przyjętymi procedurami, np.:

- uzupełnienie brakującej liczby elementów,
- dostarczenie nieuszkodzonych elementów w miejsce tych, które zostały w transporcie uszkodzone,
- dostarczenie prawidłowych elementów zamiast błędnie wyspecyfikowanych.

Dokonanie takich poprawek wymaga tylko czasu i jeżeli zostanie zrealizowane w dopuszczalnym limicie czasu, nie będzie powodowało uszkodzenia systemu. Jedynym nienaprawialnym uszkodzeniem systemu logistycznego jest pierwotne opóźnienie w wykonaniu zaplanowanego zadania.

System logistyczny, pod kątem teorii i inżynierii eksploatacji, należy do klasy systemów, których okres eksploatacji składa się z szeregu rozdzielnych przedziałów czasu. W każdym z tych przedziałów system realizuje różne zadania, których wyniki muszą złożyć się na osiągnięcie celu końcowego. Takie systemy nazywa się w literaturze systemami o zadaniach (misjach) okresowych (*Phased Mission System PMS*) lub systemami wielofazowymi (*Multiple-Phased Systems MPS*).

Podczas modelowania niezawodności systemu logistycznego, korzystanie z koncepcji systemu wielofazowego pozwala na lepsze przybliżenie rzeczywistości ze względu na następujące założenia:

- eksploatacyjna struktura systemu nie jest stała, może zmieniać się pomiędzy fazami w zależności od ważności/krytyczności danej fazy,
- historia uszkodzeń lub napraw danego elementu w danej fazie wywiera wpływ na zachowanie systemu w kolejnej fazie, stąd stan komponentu na początku danej fazy zależy od stanu danego komponentu na końcu poprzedniej fazy,
- kryteria definiujące poziom spełnienia wymagań dotyczących osiągnięć i niezawodności danej fazy mogą różnić się tych wartości dla kolejnej fazy.

Do modelowania niezawodności systemu logistycznego wykorzystano model Markowa i semi-Markowa, przyjmując ciągły czas eksploatacji systemu i dyskretne stany niezawodnościowe systemu. Do rozwiązania modelu możliwe było wykorzystanie standardowych procedur modelowania systemów technicznych adaptowanych dla potrzeb modelu wielofazowego systemu. Otrzymana przestrzeń stanów systemu dotyczy w pierwszym kroku stanów poszczególnych faz eksploatacji systemu, a wyniki syntetyczne zależą od przyjętego sposobu łączenia wyników cząstkowych w wynik końcowy. Z otrzymanego modelu można oszacować podstawowe miary oceny niezawodności systemu, takie jak np. prawdopodobieństwo prawidłowego zrealizowania zadania logistycznego, prawdopodobieństwo wystąpienia błędu lub uszkodzenia w funkcji czasu wykonywania zadania oraz średni czas między uszkodzeniami.

Przedstawione modele wykorzystano do modelowania transportu intermodalnego, w którym główna część przewozu odbywa się koleją, natomiast dowóz i dowóz między

nadawcą a terminalem oraz terminalem a odbiorcą pojazdami samochodowymi. Tak zdefiniowany jeden z podsystemów systemu logistycznego jest wzorcowym przykładem (ze względu na modelowanie niezawodności) systemu o zadaniach (misjach).

Omówiony model trójfazowy charakteryzował się wieloma uproszczeniami, m.in. brakiem fazy przeładunku pomiędzy szczególnymi gałęziami transportu oraz identyczną strukturą grafów – modeli poszczególnych faz. Tych ograniczeń nie ma model pięciofazowy, w którym rozpatrywano kolejowo-samochodowy transport intermodalny z dwukrotnym przeładunkiem. Przedstawiony model dotyczy intermodalnego transportu kolejowo-samochodowego kontenerów, w którym:

- w fazie I wykonywany jest transport od nadawcy ładunku do terminala kolejowego drogą samochodową,
- w fazie II następuje manipulacja jednostką ładunkową oraz przeładunek ze środków transportu drogowego na kolejowy,
- w fazie III dokonywany jest transport koleją do terminala w pobliżu miejsca adresata ładunku,
- w fazie IV wykonywany jest przeładunek na gałąź drogową,
- w fazie V następuje transportowanie ładunku z terminala do miejsca przeznaczenia z użyciem drogowych środków transportu.

Model pięciofazowy uwzględnia problematykę prac przeładunkowych. Modelowanie przeprowadzono na podstawie procesu odnowy Markowa, którego podstawowym ograniczeniem jest brak uwzględniania procesów starzeniowych obiektów.

Wykorzystanie w pięciofazowym modelu niezawodności systemu transportu intermodalnego procesów semi-Markowa pozwala w pewnym stopniu na uwzględnienie efektów procesów degradacji zachodzących w elementach systemu. Struktura grafów poszczególnych faz pozostała bez zmian.

Przeprowadzone obliczenia oraz analiza wyników wykazały, że model pięciofazowy daje wyniki bliższe rzeczywistości niż model trójfazowy. Dla określonych założeń pracy systemu transportu intermodalnego można uzyskać gotowość systemu na poziomie 0,97–0,99 w zależności od liczby obsługiwanych jednostek ładunkowych oraz udziału czasu trwania fazy kolejowej. Gotowość wzrasta, gdy:

- liczba obsługiwanych zintegrowanych jednostek ładunkowych jest większa,
- udział fazy kolejowej w czasie trwania procesu transportowego jest także większy.

Omówione przykłady przeprowadzonych analiz i ocen różnych systemów logistycznych wskazują na dużą celowość prowadzenia takich prac i możliwości ich praktycznego wykorzystania mimo pominięcia kilku zagadnień. Rozwój opracowanych modeli wymaga dalszych prac naukowo-badawczych dotyczących m.in.:

- niezawodności systemów informatycznych,
- niezawodności człowieka,
- niezawodności systemu: przepływ towarów – przepływ informacji,
- analizy wpływu otoczenia i skutków oddziaływań system logistyczny – otoczenie systemu.

LITERATURA

- [1] Abt S., *Systemy logistyczne w gospodarowaniu. Teoria i praktyka logistyki*, Wyd. Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań 1996.
- [2] Abt S., *Zarządzanie logistyczne w przedsiębiorstwie*, PWE, Warszawa 1998.
- [3] Adamkiewicz W., Hempel L., Podsiadło A., Śliwiński R., *Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1983.
- [4] Alam M., Al-Saggaf U.M., *Quantitative reliability evaluation of repairable phased-mission systems using Markov approach*, IEEE Transactions Reliability, Vol. R-35, 498–503, 1986.
- [5] Ambroziak T., Pyza D., *O pewnym podejściu do oceny operatora usług logistycznych*, Materiały X Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2006.
- [6] Amdersson P., Aronsson H., Storhagen N. G., *Measuring logistics performance*, Engineering Costs and Production Economics, 17, 1989.
- [7] Aupperle B.E., i in., *Evaluation of fault-tolerant systems with non-homogeneous workloads*, [w:] 19th IEEE Int. Fault Tolerant Computing Symp. (FTCS-19), 1989.
- [8] Ballou R.H., *Business logistics/supply chain management*, Pearson Education Inc., New Jersey 2004.
- [9] Bertalanfy von L., *Ogólna teoria systemów*, PWN, Warszawa 1984.
- [10] Bevilacqua M., Braglia M., *The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection*, Reliability Engineering and System Safety 70/2000.
- [11] Birnbaum Z.W., *On the importance of different components in a multi-component system*, Multivariate analysis 2, Academic Press, New York 1969.
- [12] Birolini A., *Reliability Engineering. Theory and Practice*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg 1999.
- [13] Blaik P., *Logistyka*, PWE, Warszawa 2001.
- [14] Blanchard B.S., *Logistics in the context of the system life cycle*, Soletech Vol. 4.11/November 2001.
- [15] Blanchard B.S., *Logistics: A major consideration in the systems engineering process*, Soletech Vol. 4.12/December 2001.
- [16] Blanchard B.S., *Logistics Engineering and Management* (5th Ed), Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River 2004.
- [17] Bolc L., Borodziewicz W., Wójcik M., *Podstawy przetwarzania informacji niepewnej i niepełnej*, PWN, Warszawa 1991.
- [18] Bondavalli A., Chiaradonna S., Di Giandomenico F., Mura I., *Dependability Modeling and Evaluation of Multiple-Phased Systems Using DEEM*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 53, No. 4, 2004.
- [19] Boni M. (red.), *Polska 2030. Priorytety rozwojowe kraju*. Kancelaria Prezesa Rady Ministrów. Zespół Doradców Strategicznych Prezesa Rady Ministrów, Warszawa, lipiec 2009, www.polska2030.pl (20.07.2010).
- [20] Brdulak H., *Innowacyjność w usługach logistycznych*, [w:] Logistyka wobec nowych wyzwań, Biblioteka Logistyka. Polski Kongres Logistyczny Logistics 2010. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2010.
- [21] Bukowski L., *Bezpieczeństwo i niezawodność systemów logistycznych*, Materiały VI Konferencji Logistyki Stosowanej. Total Logistic Management. Prace Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, seria Seminaria i Konferencje, SK 7, Zakopane 2002.
- [22] Bukowski L., Majewska K., *Ocena niepewności w systemach logistycznych*, Wybrane Zagadnienia Logistyki Stosowanej, nr 3 (2006), Oficyna Wydawnicza TEXT, Kraków 2006.
- [23] Bukowski L., *Koncepcja logistyki stosowanej jako inżynierii systemów logistycznych*, Materiały X Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2006.
- [24] Bukowski L., *Problemy oceny jakości systemów logistycznych*, Materiały XI Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2006.

- [25] Bundschuh M., Klabjan D., Thurston D.L., *Modeling robust and reliable supply chains*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- [26] Caban D., Walkowiak T., *Komputerowa symulacja systemu transportu dyskretnego*, [w:] Niezawodność systemów. XXX Zimowa Szkoła Niezawodności, Instytut Technologii Eksploatacji. Radom 2002.
- [27] Catuneanu V. M., Moldovan C., Popentin, Fl., Gheorghin M., *Optimum system availability and spare allocation*, Microelectronic Reliability, Vol. 28, No. 3, 1988.
- [28] Cempel C., *Teoria i inżynieria systemów – zasady i zastosowania myślenia systemowego*, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2008.
- [29] Chaberek M., *Mikro- i makroekonomiczne aspekty wsparcia logistycznego*, Wyd. UG, Gdańsk 2002.
- [30] Christofer M., *Logistyka marketingowa*, PWE, Warszawa 2005.
- [31] Christopher M., *Logistyka i zarządzanie łańcuchem podaży: jak obniżyć koszty i poprawić jakość obsługi*, Wyd. Profesjonalnej Szkoły.
- [32] COM(2001)370. *Biała Księga. Europejska polityka transportowa w horyzoncie do 2010 r.; czas wyborów*, Komisja Wspólnot Europejskich, Bruksela 12/09/2001 – 10 – 08 (tłum. na jęz. polski).
- [33] COM(2006) IP/06/818. *Europa w ruchu: polityka transportowa służąca zrównoważonej mobilności*, Bruksela 22/06/2006 (tłum. na jęz. polski).
- [34] COM(2006)336 wersja ostateczna. Komunikat Komisji do Rady, Parlamentu Europejskiego, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. *Logistyka transportu towarowego w Europie – klucz do zrównoważonej mobilności*, Bruksela 28.6.2006.
- [35] COM(2007)607 wersja ostateczna, Komunikat Komisji Wspólnot Europejskich. *Plan działań na rzecz logistyki transportu towarowego*, Bruksela 18.10.2007.
- [36] Coughlin R. J., *Optimization for spares in a maintenance scenario*, [w:] Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1984.
- [37] Council of Supply Chain Management Professionals. www.cscmp.org. (15.11.2008 r.)
- [38] Czaja P., *Model efektywności systemów eksploatacji transportu sztywno torowego*, Praca doktorska. Raport serii: PRE nr 3/2009, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2009.
- [39] Dietrych J., *System i konstrukcja*, WNT, Warszawa 1985.
- [40] DoD Guide for Achieving Reliability, Availability and Maintainability. Department of Defense, Washington 2005.
- [41] Do Van, P., Barros, A., Berenguer C. 2007, *Importance measure on finite time horizon and application to Markovian multi-state production systems*, In Aven & Vinnem (ed.), Risk, Reliability and Societal Safety; European Safety and Reliability Conference Proceedings, ESREL, Stavanger 2007. London: Taylor & Francis Group.
- [42] DSP Strategy for Supporting and Promoting Logistics Readiness: Interoperability and Logistics Readiness. ITP 2001.
- [43] Dugan J.B., Veeraraghavan M., Boyd M., Mittal N., *Bounded approximate reliability models for fault tolerant distributed systems*, [w:] Proc. 8th Symp. Reliable Distributed Systems, 1989.
- [44] Dugan J.B., *Automated Analysis of Phased-Mission Reliability*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 40, No. 1, April 1991.
- [45] Eisinger S., Huseby A., Sutter E., *Component importance measures in complex systems*, [w:] Materiały konferencji ESREL 2006. Lisbona 2006.
- [46] European Logistic Association. www.elalog.com.
- [47] *Encyklopedia Powszechna*, PWN, Warszawa, 1987.
- [48] Esary J.D., Ziehms H., *Reliability analysis of phased missions*, [w:] Reliability and Fault Tree Analysis. Philadelphia: SIAM, 1975.
- [49] Espiritu J.F., Coit D.W., Prakash U. 2007. *Component criticality importance measures for the power industry*, Electric Power Systems Research 77.

- [50] *Logistyka w Polsce*, Raport 2007, praca zbiorowa pod red. Ireneusza Fechnera i Grzegorza Szyszki. Wydaw. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2008.
- [51] Feliks J., Lichota A., *Niezawodność systemów logistycznych*, Materiały IX Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2005.
- [52] Feller W., *On semi-Markov processes*, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1964, 51, No 4.
- [53] *Logistyka produkcji*, praca zbiorowa pod red. M. Fertscha, Wydawnictwo Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2003.
- [54] Ficoń K., *Procesy logistyczne w przedsiębiorstwie*, Wydawnictwo Impuls Plus Konsulting, Gdynia 2001.
- [55] Fijałkowski J., *Transport wewnętrzny w systemach logistycznych: wybrane zagadnienia*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [56] Gasparski W., Miller D. (red.): *Nauka. Technika. Systemy*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław 1981.
- [57] Gniedenko B.W., Bielajew J.K., Sołowjew A.D., *Modele matematyczne w teorii niezawodności*, WNT, Warszawa 1968.
- [58] Gogała J., Kulczyk J., Kwaśniewski S., Młyńczak M., Nowakowski T., Zajac M., *Analiza i diagnoza intermodalnego transportu w Polsce*, Raporty Inst. Konstr. Eksp. Masz. PWr. 2007, Ser. SPR nr 9.
- [59] Gołąbek A., *Elementy teorii eksploatacji*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1979.
- [60] 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.
- [61] Golemska E., Szymczyk M., *Informatyzacja w logistyce przedsiębiorstw*, PWN, Warszawa 1997.
- [62] Golemska E. (red.) *Kompendium wiedzy o logistyce*, PWN, Warszawa 1999.
- [63] Grajner J., Kwaśniewski S., Nowakowski T., *Miejsce transportu kolejowego w łańcuchach i sieciach dostaw*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [64] Grajner J., Jodejko-Pietruczuk A., Kwaśniewski S., Lewandowski K., Młyńczak M., Nowakowski T., Pisarski P., Wiewiórko B., Wolko P., *Metodyka techniczno-organizacyjnego kształtowania systemu transportu intermodalnego*, Raporty Inst. Konstr. Eksp. Masz. PWr. 2002, Ser. SPR nr 72.
- [65] Grabski F., *Teoria semimarkowskich procesów eksploatacji obiektów technicznych*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Marynarki Wojennej, Gdynia 1982.
- [66] Grabski F., *Semimarkowskie modele niezawodności i eksploatacji*, Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych. Seria: Badania Systemowe, t. 30, Warszawa 2002.
- [67] Grabski F., Jaźwiński J., *Niektóre problemy modelowania systemów transportowych*, Warszawa 2003.
- [68] Grabski F., Jaźwiński J., *Zastosowanie funkcji o losowych argumentach w zagadnieniach logistycznych*, Materiały XI Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2007.
- [69] Gross D., Pinkus C. E., *Designing a support system for repairable items*, Computer & Ops. Res. Vol. 6, 1979.
- [70] Grzywacz W., Wojewódzka-Król K., Rydzkowski W., *Polityka transportowa*, Wydaw. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2000.
- [71] Gutenbaum J., *Modelowanie matematyczne systemów*, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 1992.
- [72] Hernik J., *Jak być niezawodnym?* Logistyka a jakość, nr 2/2004.
- [73] Huang L.-Sh., *SCRM: A Decision Support Method for Improving the Reliability of Supply Chain*, Thesis Id: 089NCU00041015, 2001.
- [74] Hubka V., Eder W.E., *Theory of technical systems: A total concept theory for engineering design*, Springer, Berlin–Heidelberg 1988.
- [75] IEC 1069, *Industrial process measurement and control – evaluation of system properties for the purpose of system assessment*.
- [76] Jacyna I., *Rola transportu w realizacji procesów logistycznych przedsiębiorstwa*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej z. 69, Transport, 2009.

- [77] Jacyna M., Wiśniewski K., *A Static Model for Selecting Technical Facilities of a Logistics Centre Based on the Tasks to Be Performed*, Total Logistics Management, No. 1, 2008.
- [78] Jacyna M., *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [79] Jacyna M., Nowakowski T., Pyza D., Wasiak M., *Selected aspects of model approach to logistics system of Poland*, Logistics and Transport, 2010, nr 1.
- [80] Jarnicki J., Mazurkiewicz J., Zamojski W., *Model systemu transportu dyskretnego*, [w:] Niezawodność systemów. XXX Zimowa Szkoła Niezawodności. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2002.
- [81] Jarnicki J., Walkowiak T., *Badania symulacyjne systemów transportu dyskretnego z uwzględnieniem niezawodności*, [w:] Metody badań przyczyn i skutków uszkodzeń. XXXIII Zimowa Szkoła Niezawodności, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2005.
- [82] Jaźwiński J., Grabski F., Klimaszewski S., *Modelowanie matematyczne procedur logistycznych*, Materiały X Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2006.
- [83] Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K., *Niezawodność systemów technicznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
- [84] Jodejko-Pietruczuk A., Nowakowski T., *Wpływ struktury funkcjonalnej technologii przeładunku na efektywność transportu intermodalnego*, [w:] Nadmiarowość w inżynierii niezawodności. XXXII Zimowa Szkoła Niezawodności. Radom, Instytut Technologii Eksploatacji, 2004.
- [85] Jodejko-Pietruczuk A., *Model procesu zaopatrzenia z uwzględnieniem skutków niezdatności systemu technicznego*, Raporty Inst. Konstr. Ekspł. Masz. PWr., Ser. PRE nr 3, Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wroclaw 2006.
- [86] Jodejko, A., *The model of procurement process taking into account the consequences of a technical system reliability*, [w:] Aven & Vinnem (ed.), Risk, Reliability and Societal Safety; European Safety and Reliability Conference Proceedings, ESREL, Stavanger, Taylor & Francis Group, London 2007.
- [87] Jodejko-Pietruczuk A., Nowakowski T., *Applications of supply process reliability model*, [w:] Safety, reliability and risk analysis: theory, methods and applications, Vol. 2/eds Sebastian Martorell, C. Guedes Soares, Julie Barnett. Taylor & Francis, Leiden, 2008.
- [88] Kaciuba A., *Ocena niezawodności procesu magazynowania w przedsiębiorstwie*, Praca magisterska (niepublikowana). Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2005.
- [89] Karpinski J., Firkowicz S., *Zasady profilaktyki obiektów technicznych*, PWN, Warszawa 1981.
- [90] Karpiński J., Korczak E., *Metody oceny niezawodności dwustanowych systemów technicznych*, Omnitech Press, Warszawa 1990.
- [91] Kisperska-Moroń D., *Model SCOR jako paradygmat pomiaru funkcjonowania łańcuchów dostaw*, Materiały X Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2006.
- [92] Kisperska-Moroń D., Krzyżaniak S. (red.), *Logistyka*, ILiM, Poznań 2009.
- [93] Kisiel P., *Zastosowanie teorii G.J. Klira do identyfikacji obiektów rzeczywistych na przykładzie podsystemu linii walcarki czteroklapkowej*, Materiały IX Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2005.
- [94] Klir G.J., *Generalized information theory: aims, results and open problems*, Reliability Engineering & System Safety, 85 (2004).
- [95] Klir G.J., *Ogólna teoria systemów*, WNT, Warszawa 1976.
- [96] Kołowrocki K., *Reliability of large systems*, Elsevier, 2004.
- [97] Konieczny J., *Inżynieria systemów działania*, WNT, Warszawa 1983.
- [98] Kopociński B., *Zarys teorii odnowy i niezawodności*, PWN, Warszawa, 1973.
- [99] Korzeń Z., *Podstawy logistyki*, Wyd. Politechniki Wrocławskiej IKiEM, Wrocław 1995.
- [100] Korzeń Z., *Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania*, t I, *Infrastruktura, technika, informacja*, Wydawnictwo Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2003.

- [101] Korzeń Z., *Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania*, t. 2: Projektowanie. Modelowanie. Zarządzanie. ILiM, Poznań 1999.
- [102] Kosieradzka A., Lis S., *Produktywność. Metody analizy, oceny i tworzenia programów poprawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [103] Kowalski M., Magott J., Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S., *Analysis of transportation system with the use of Petri nets*, [w:] Proceedings of the Third Summer Safety and Reliability Seminars 2009, SSARS 2009, Gdańsk-Sopot, Poland, 19–25 July 2009. Vol. 2. Gdańsk: Polish Safety and Reliability Association, 2009.
- [104] Krajeński T., *Badanie niezawodności dostaw zewnętrznych*. Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, praca dyplomowa magisterska (nie publikowana), Wrocław 2004.
- [105] Krawczyk S., *Zarządzanie procesami logistycznymi*, PWE, Warszawa 2001.
- [106] Krawczyk S., *Koordinacja procesów w sieciach logistycznych*, Materiały IX Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2005.
- [107] Krawczyk S., *Rola logistyki w tworzeniu wartości*, Materiały X Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2006.
- [108] Kulińska E., *Zarządzanie ryzykiem w łańcuchach dostaw*, Logistyka nr 1/2007.
- [109] Kulczyk J., Kwaśniewski S., Lewandowski K., Nowakowski T., Zajac M., *Model systemu logistycznego Polski jako droga do komodalności transportu w Unii Europejskiej*, Raporty Inst. Konstr. Eksp. Masz. PW. 2010, Ser. SPR nr 31.
- [110] Kulikowski R., *Sterowanie w wielkich systemach*, WNT, Warszawa 1976.
- [111] Kuprowska I., *Metoda podwyższania poziomu niezawodności systemu logistycznego dla produkcji wielkoseryjnej w przemyśle motoryzacyjnym*, Praca doktorska. Raport serii PRE 5/2006, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [112] Kuropas E.: *Ocena efektywności funkcjonowania podsystemu logistycznej obsługi klienta w przedsiębiorstwie produkcyjnym Wrozamet S.A.*, Praca dyplomowa Wydziału Mechanicznego PW. (niepublikowana).
- [113] Kwaśniewski S., Nowakowski T., Zajac M., *Uwarunkowania funkcjonalne i techniczne rozwoju transportu intermodalnego*, Logistyka. 2004 nr 2.
- [114] Kwaśniewski S., Nowakowski T., *Method of multicriterion selection of combined transport technology*, Archives of Transport. 2004, Vol. 16, nr 2.
- [115] Kwaśniewski S., Nowakowski T., *Transport intermodalny w europejskiej polityce transportowej*, Technika Transportu Szynowego, R. 11, nr 1/2, 2005.
- [116] Kwaśniewski S., Nowakowski T., *Program wsparcia transportu intermodalnego w Europie „Marco Polo IP”*, Technika Transportu Szynowego, 2006, R. 12, nr 5.
- [117] Kwaśniewski S., Zajac M., *Transport kombinowany w Polsce po akcesji do Unii Europejskiej*, [w:] Nowa jakość polskiego transportu i logistyki po akcesji do Unii Europejskiej. Pod red. Danuty Rucińskiej i Elżbiety Adamowicz, Fundacja Rozwoju Uniw. Gdań., Gdańsk 2006.
- [118] Kwaśniewski S., Nowakowski T., Zajac M., *Systemy transportowe w łańcuchach logistycznych*, Oficyn Wydaw. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [119] Kwaśniewski S., Nowakowski T., Zajac M., *Analiza niezawodności transportu intermodalnego w Polsce*, Zeszyty Naukowe – Uniwersytet Gdański. Ekonomia Transportu Lądowego, nr 36, 2008.
- [120] Lapide L., *What about measuring supply chain performance?* <http://lapide.ASCET.com> (z dnia 16.11.2008r.).
- [121] Laszlo E., *Systemowy obraz świata*, PIW, Warszawa 1978.
- [122] Lee-Shyang Huang, *SCRM: A Decision Support Method for Improving the Reliability of Supply Chain*, Thesis Id: 089NCU00041015, 2001.
- [123] Lewitowicz J., *Ryzyko w logistyce*, Logistyka nr 5/2007.
- [124] Lewandowski J., Bartczak M., *Wybrane problemy logistyczne w eksploatacji obiektów technicznych*, Materiały XXII Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk 1994, Wydaw. ITE, Radom 1994.

- [125] LG102T4, *Material Readiness Metrics*, Logistics Management Institute 2003.
- [126] LGR803R1, *Supply Chain Management: A Recommended Performance Measurement Scorecard*, Logistics Management Institute, McLean, VA 1999.
- [127] Liberacki B., *Europejska polityka transportowa*, [w:] Uwarunkowania rozwoju systemu transportowego Polski, Bogusław Liberacki, Leszek Mundur (red.), Wydaw. Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2007.
- [128] Limnios N., Oprisan G., *Semi-Markov Processes and Reliability*, Boston, Birkhauser 2001.
- [129] Maciejewski H., Kapton K., *Analiza funkcjonowania systemu transportu dyskretnego z wykorzystaniem metod symulacyjnych*, [w:] Niezawodność systemów. XXX Zimowa Szkoła Niezawodności. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2002.
- [130] Macek M., *Profitability Analysis of Implementing Vendor Managed Inventory for a Selected Group of Items*, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Praca dyplomowa magisterska (niepublikowana), Wrocław 2004.
- [131] Magott J., Nowakowski T., Skrobanek P., Werbińska-Wojciechowska S., *Analysis of logistic support system using Fault Trees with Time Dependencies*, Archives of Transport, Vol. 19, is. 4, 2007.
- [132] Magott J., Nowakowski T., Skrobanek P., Werbińska-Wojciechowska S., *Analysis of possibilities of timing dependencies modeling – example of logistic support system*, [w:] Safety, reliability and risk analysis: theory, methods and applications, Vol. 2, Taylor & Francis, Leiden, 2008.
- [133] Magott J., Nowakowski T., Skrobanek P., Werbińska-Wojciechowska S.: *Logistic system modeling using fault trees with time dependencies – example of tram network*, [w:] Reliability, risk and safety: theory and applications, Vol. 3, Taylor & Francis, London 2010.
- [134] Maternowska M., *Ryzyko zakłóceń: niezawodność/podatność na zakłócenia versus koszty/zyski w łańcuchach dostaw*, Logistyka nr 5/2006.
- [135] Maternowska M., *Ryzyko a niezawodność. Znaczenie poziomu zabezpieczenia czyli jaką wartość ma pewność i niepewność*, Materiały X Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2006.
- [136] Matulewski S., Konecka S., Fajfer A., *Systemy logistyczne*, Wyd. ILiM, Poznań 2007
- [137] Melo M.T., Nikel S., Saldanha da Gama F., *Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning*, Computers & Operations Research 33, 2005.
- [138] Meller A., *Metoda analizy przyczyn i skutków wad (FMEA)*, Przegląd organizacji, nr 2/1994, TNOiK.
- [139] Merkisz J., Nowakowski T., Smalko Z., *Bezpieczeństwo w transporcie – wybrane zagadnienia*, [w:] Uwarunkowania rozwoju systemu transportowego Polski. Pod red. B. Liberadzkiego i L. Mindura. Radom, Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, 2006.
- [140] Meyer J.F., Furchgott D.G., Wu L.T., *Performability evaluation of the SIFT computer*, [w:] 9th IEEE Int. Fault Tolerant Computing Symp. (FTCS-9), June 1979, 43–50.
- [141] Michłowicz E., *Podstawy logistyki przemysłowej*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2002.
- [142] Michłowicz E., *Systemy logistyczne a teoria systemów*, XIII Konferencja Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”. TLM 2009, Zakopane 2009.
- [143] Miądalski J. (red.), *Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne*, Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa 1982.
- [144] Miądalski J. (red.), *Poradnik niezawodności. Inżynieria niezawodności*, Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa 1992.
- [145] MIL-HDBK-502: *Defense Handbook, Acquisition Logistics*, Department of Defense, Washington, D.C. 1997.

- [146] Młyńczak M., Nowakowski T., Restel F., Werbińska-Wojciechowska S., *Problems of reliability analysis of passenger transportation process*. [w:] Reliability, risk and safety: back to the future, Taylor & Francis, London 2010.
- [147] Mynarski S., *Elementy teorii systemów i cybernetyki*, PWN, Warszawa 1979.
- [148] Natvig B., Gasemyr J., *New results on component importance in nonrepairable and repairable systems*, In Risk, Reliability and Societal Safety; European Safety and Reliability Conference Proceedings, ESREL, Stavanger, Taylor & Francis Group, London 2007.
- [149] Nowicka-Skowron M., *Efektywność systemów logistycznych*, Polskie Wydawnictwo Logistyczne, Warszawa 2000.
- [150] Nowakowski T., *Problems of safety and reliability analysis of combined road-rail transportation system*, Systems (Wrocław), Vol. 6, nr 1/2, 2001.
- [151] Nowakowski T., *Model of combined road-rail transportation system: concept of safety and reliability integration*, [w:] Decision making and risk management. European Conference on System Dependability and Safety. ESREL'2002. Lyon 2002.
- [152] Nowakowski T., *Problemy niezawodności funkcjonowania systemów logistycznych*, Inżynieria Maszyn 9(1) 2004.
- [153] Nowakowski T., Zając M., Zając P., *Transport kontenerowy w Polsce*, [w:] XIII Konferencja Naukowa „Dostosowanie polskiego transportu do Unii Europejskiej – sukcesy, porażki, kierunki”. Uniwersytet Gdański 2004.
- [154] Nowakowski T., *Problemy oceny niezawodności i bezpieczeństwa systemów transportu intermodalnego*, Pojazdy Szybowe, nr 2, 2004.
- [155] Nowakowski T., *Reliability model of combined transportation system*, [w:] Probabilistic safety assessment and management. PSAM7-ESREL '04, [7th International conference], Berlin, 2004. Vol. 4, [i in.], Springer, London 2004.
- [156] Nowakowski T., *Problemy modelowania niezawodności systemów logistycznych*, [w:] Systems, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [157] Nowakowski T., Zając M., *Analysis of reliability model of combined transportation system*, [w:] Advances in safety and reliability. Proceedings of the European Safety and Reliability Conference (ESREL 2005), Gdynia-Sopot-Gdańsk, 2005, Vol. 2, Balkema A.A., Leiden 2005.
- [158] Nowakowski T., *Problemy modelowania niezawodności sieci transportowych*, [w:] Strategie i logistyka organizacji sieciowych. Red. nauk. J. Witkowski, Wydaw. AE, Wrocław 2005.
- [159] Nowakowski T., *Problemy modelowania niezawodności systemów logistycznych*, Systems (Wrocław), Vol. 10, nr 1, 2005.
- [160] Nowakowski T., *Analysis of possibilities of logistics system reliability assessment*, [w:] Safety and reliability for managing risk, Vol. 3, Taylor and Francis, Leiden 2006.
- [161] Nowakowski T., *Analiza możliwości oceny niezawodności procesu magazynowania w przedsiębiorstwie*, [w:] Logistyka, systemy transportowe, bezpieczeństwo w transporcie – LOGITRANS: III Konferencja naukowo-techniczna, Szczyrk, 2006. Radom: Wyd. PR, Radom 2006.
- [162] Nowakowski T., Zając M., *Analiza możliwości funkcjonowania technologii transportu intermodalnego w Polsce*, [w:] Transport a Unia Europejska. Polski transport w europejskiej perspektywie. Pod red. D. Rucińskiej i E. Adamowicz, Fundacja Rozwoju Uniw. Gdań., Gdańsk 2006.
- [163] Nowakowski T., *Assessment of reliability of distribution process: Case study*, [w:] Risk, reliability and societal safety. Vol. 3. Application topics, Taylor and Francis, Leiden 2007.
- [164] Nowakowski T., *Problemy oceny niezawodności systemów logistycznych*, [w:] Problemy niezawodności systemów. XXXV Zimowa Szkoła Niezawodności. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom, 2007.
- [165] Nowakowski T., Werbińska S., *Zagadnienie oceny gotowości systemu logistycznego*, Logistyka, nr 5/2007.

- [166] Nowakowski T., *Założenia europejskiej polityki transportowej*, [w:] Rola śródlądowego transportu wodnego w rozwoju regionów Unii Europejskiej, CL Consulting i Logistyka, Oficyna Wydawnicza NDiO, Wrocław 2008.
- [167] Nowakowski T., *Problems of supply process reliability assessment at small and medium-sized enterprises*, Total Logistic Management, nr 1, 2008
- [168] Nowakowski T., *Problemy oceny niezawodności procesów logistycznych – proces zaopatrzenia*, Logistyka, nr 4, 2008
- [169] Nowakowski T., *Zadania systemów logistycznych w utrzymaniu gotowości obiektów technicznych* [w:] Metody utrzymania gotowości systemów, XXXVI Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, 2008. Radom, Instytut Technologii Eksploatacji, 2008.
- [170] Nowakowski T., Werbińska S., *Wybrane problemy oceny łańcucha logistycznego*, [w:] Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej. Wydawnictwa AGH, Kraków 2009.
- [171] Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S., *Models of logistic support systems*, [w:] Proceedings of the Third Summer Safety and Reliability Seminars 2009, SSARS 2009, Vol. 2. Gdańsk: Polish Safety and Reliability Association, 2009.
- [172] Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S., *On problems of multicomponent system maintenance modeling*, International Journal of Automation and Computing, Vol. 6, No. 4, 2009.
- [173] Nowakowski T., Kwaśniewski S., Zajac M., *Problemy logistyczne wywozu surowców skalnych z rejonu Dolnego Śląska a idea komodalności*, Logistyka, nr 4, 2010.
- [174] Nowakowski T. (red.), *Systemy logistyczne*, t. I, Diffin, Warszawa 2010.
- [175] Nowakowski T. (red.), *Systemy logistyczne*, t. II, Diffin, Warszawa 2010.
- [176] Nowakowski T., *Metodyka prognozowania obiektów mechanicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [177] O'Hagen A., Oakley J.E., *Probability is perfect, but we can't elicit it perfectly*, Reliability Engineering & System Safety, 85 (2004).
- [178] Okulewicz J., *Zakres znaczeniowy logistyki współczesnej*, Materiały X Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2006.
- [179] Okulewicz J., *System logistyczny i podmiotowość klienta w kontekście transportu*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z. 60, Warszawa 2007.
- [180] OPNAV Instruction 3000.12A: *Operational availability of equipments and weapons systems*, Department of the Navy, Washington D.C. 2003.
- [181] Oziemski S., *Dualizm w logistyce*, Materiały IX Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2005.
- [182] Oziemski S., *Entropia układów logistycznych*, Materiały X Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2006.
- [183] Oziemski S., *Zastosowanie logistyki do kształtowania niezawodności maszyn*, Problemy Maszyn Roboczych, z. 2, Vol. 2, 1993.
- [184] Pate-Cornel M.E., *Uncertainty in risk analysis: Six levels of treatment*. Reliability Engineering & System Safety, 54 /1996.
- [185] Pawlak Z., *Systemy informacyjne. Podstawy teoretyczne*, WNT, Warszawa 1983.
- [186] Pawlak M., *Ocena niezawodności procesu magazynowania w przedsiębiorstwie*, Praca magisterska (niepublikowana), Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [187] Pfohl H.-C., *Doskonałość łańcucha dostaw w czasach światowego kryzysu gospodarczego*, [w:] Logistyka wobec nowych wyzwań. Biblioteka Logistyka. Polski Kongres Logistyczny, Logistics 2010. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2010.
- [188] Pfohl H.-Ch.: *Systemy logistyczne*, ILiM, Poznań 1998.
- [189] Piasecki S., *Optymalizacja systemów przewozowych*, WKiŁ, Warszawa 1973.

- [190] Plewa M., *Model systemu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji*, Raporty Inst. Konstr. Eksp. Masz. PWr., Ser. PRE nr 3, (Rozprawa doktorska), Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wrocław 2010.
- [191] PN-93/N-50191: *Słownik terminologiczny elektryki. niezawodność, jakość usługi*.
- [192] Pogorzelski W., *Inżynieria Badań Systemowych – Prologema*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [193] Powierża L., *Elementy inżynierii systemów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- [194] Prescott D.R., Andrews J.D., Downes C.G., *Multiplatform phased mission reliability model for mission planning*, Proc. IMechE Vol. 223 Part O: J. Risk and Reliability, 2009.
- [195] Przystupa F., *Diagnozy w systemie technicznym. Od ontologii i aksjologii do praktyki*. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
- [196] Rakowski U.K., *Some notes on Probabilities and non-probabilities reliability measures*, [w:] Proceedings of ESREL'2005, A.A. Balkema Publishers, London 2005.
- [197] Rogowski M., *Analiza procesu dystrybucji na przykładzie przedsiębiorstwa KPM – Meble Kłodzko Sp. z o.o. w Walbrzyskiej Specjalnej Strefie Ekonomicznej Invest – Park*, Praca dyplomowa Wydziału Mechanicznego PWr., 2007 (niepublikowana).
- [198] Ruggiero S., *Performance metrics in the supply chain*, www.unicatt.it/convegno/uclse/paper/Ruggiero.pdf (10.10.2008).
- [199] Rzeszowski P., *Zarządzanie logistyczne w firmie DSV – DFDS Transport na podstawie Systemu Kierowania Magazynem SKM*, Praca dyplomowa Wydziału Mechanicznego PWr. (niepublikowana).
- [200] Sarkar J. Li F., *Limiting average availability of a system supported by several spares and several repair facilities*, Statistics and Probability Letters 76, 2006.
- [201] SCOR – The Supply Chain Operations Reference-model. Supply-Chain Council. www.supply-chain.org, (30.08.2010).
- [202] Seidler J.A., *Fundamental concepts of intelligent info system theory*, [w:] Information Systems Architecture and Technology ISAT'94. Proceedings of 16th Scientific School. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994.
- [203] Sienkiewicz P., *Inżynieria systemów kierowania*. PWE, Warszawa 1988.
- [204] Skowronek Cz., Sarjusz-Wolski Z., *Logistyka w przedsiębiorstwie*, PWE, Warszawa 1999.
- [205] Słowiński B., *Wprowadzenie do logistyki*, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008.
- [206] Słowiński B., *Inżynieria zarządzania procesami logistycznymi*, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009.
- [207] Smalko Z., *Logistyczne aspekty bezpieczeństwa systemów*, Materiały XI Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2007.
- [208] Smalko Z., *Podstawy projektowania niezawodnych maszyn i urządzeń mechanicznych*, PWN, Warszawa 1972.
- [209] Smalko Z., *Modelowanie eksploatacyjnych systemów transportowych*, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1996.
- [210] Smotherman M., Zemoudeh K., *A nonhomogeneous Markov model for phased-mission reliability analysis*, IEEE Transactions Reliability, Vol. 38, 585–590, 1989.
- [211] Sołtysik M., *Zarządzanie logistyczne*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Karola Akademickiego w Katowicach, Katowice 2003.
- [212] Sołowjew A.D., *Analityczne metody w teorii niezawodności*, WNT, Warszawa, 1983.
- [213] Somani A.K., Ritcey J.A., Au S.H.L., *Computational-Efficient Phased-Mission Reliability Analysis for Systems with Variable Configurations*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 41, No. 4, 1992.
- [214] Staniszewski R., *Teoria systemów*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław 1988.

- [215] Stelmaszczyk P., *Biała Księga z 2010 r.: Rola logistyki w przyszłych inicjatywach europejskiej polityki transportowej*, Prezentacja multimedialna na Polskim Kongresie Logistycznym Logistics 2010. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2010, www.logistics.pl.
- [216] Straube F., Cetinkaya B. T., *Trends und Strategien im Logistikmanagement 2008*, Kongressband, 25. Deutscher Logistik-Kongress, Berlin 2008.
- [217] Straube F., Pfohl H.-Chr., *Trends und Strategien in der Logistik – Globale Netzwerke im Wandel*, DVV Media Group GmbH/Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg 2008.
- [218] Subramanian R., Natarajan R., *An n-unit standby redundant system with repair facilities and preventive maintenance*, Microelectron. Reliability, Vol. 22, No. 3, 1982.
- [219] Szczepaniak T., *Transport i spedycja w handlu zagranicznym*, PWE, Warszawa 2002.
- [220] Szklarski L., Kozioł R., *Systemy sterowania procesem technologicznym w górnictwie*, PWN, Warszawa–Kraków 1980.
- [221] Szymonik A., *Niezawodność i podatność obsługowa wyrobów obronnych instrumentami regulacji łańcucha logistycznego*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, Rok XLIX, nr 1 (172), 2008.
- [222] Szymanek A., *Potencjałowa koncepcja bezpieczeństwa w modelowaniu ryzyka i niezawodności łańcuchów dostaw*, Logistyka 2/2010.
- [223] Thomas M. U., *Supply chain reliability for contingency operations*, Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002.
- [224] Topolska K., *Metoda przyspieszonej oceny stanu granicznego elementów mechanicznych*, Raporty Inst. Konstr. Eksp. Masz. PWr., Ser. PRE nr 4. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wrocław 2007.
- [225] Tsitsiashvili G. Sh., *Phase transition in renewal systems with common reserve*. R&RATA # 4 (Vol. 2) 2009.
- [226] Twaróg J., *Mierniki i wskaźniki logistyczne*, IliM, Poznań 2003.
- [227] Ushakov I., *Reliability: past, present, future*. Reliability: Theory & Applications, No. 1, 2006.
- [228] Vassallo W., *Co-modality: a new buzz-word?* [w:] Nowe wyzwania – nowe rozwiązania. Polski Kongres Logistyczny LOGISTICS 2008, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2008.
- [229] Villemeur A., *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment*, Wiley and Sons 1992.
- [230] Wang, N. & Lu, J.C. & Kvam, P., *Multi-scale spatial modeling for logistics system reliability*, www.cpbis.gatech.edu/research/findings/; (30.03.2006).
- [231] Wang K-H., Sivazlian B.D., *Reliability of a system with warm standbys and repairmen*, Microelectronic. Reliability. Vol. 29, No. 5, 1989
- [232] Wang K-H., Hsieh Y., *Reliability of a repairable system with spares and a removable repairman*, Microelectronic. Reliability. Vol. 35, No. 2, 1995
- [233] Weinberg G.M., *Myślenie systemowe*, WNT, Warszawa 1979.
- [234] Werbińska-Wojciechowska S., *Interactions between logistic and operational system – an availability model*, [w:] Risk, reliability and societal safety. Vol. 2, Taylor and Francis, Leiden, 2007.
- [235] Werbińska-Wojciechowska S., *The availability model of logistic support system with time redundancy*, Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability, nr 3, 2007.
- [236] Werbińska-Wojciechowska S., *Model logistycznego wsparcia systemu eksploatacji środków transportu*, Raporty Inst. Konstr. Eksp. Masz. PWr., Ser. PRE nr 3, (Rozprawa doktorska), Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wrocław, 2008.
- [237] Werbińska-Wojciechowska S., *Model of logistic support system with time dependency*, [w:] Safety, reliability and risk analysis: theory, methods and applications. Vol. 3, Leiden: Taylor, Francis, 2008.
- [238] Werbińska-Wojciechowska S., *Simulation-based approach for calculating the reliability of logistic support process*, Journal of KONBiN, Vol. 4, nr 4, 2008.
- [239] Werbińska-Wojciechowska S., *Zagadnienie utrzymania gotowości systemu wsparcia logistycznego z zależnością czasową*, [w:] Metody utrzymania gotowości systemów, XXXVI Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, 2008. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2008.

- [240] Werbińska-Wojciechowska S., *Model niezawodności systemu wsparcia logistycznego*, [w:] Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej, Nr 5, Kraków, Oficyna Wydawnicza Text, 2008.
- [241] Werbińska-Wojciechowska S., *Time dependencies in supply chain performance process*, Logistics and Transport, nr 1, 2010.
- [242] Wiendahl H.-H., Cieminski G.-V., Begemann C., *A Systematic Approach for Ensuring the Logistic Process Reliability of Supply Chains*, Annals of the CIRP 52/1 (2003).
- [243] Wiewiór K., *Ocena funkcjonowania systemu logistycznego na przykładzie przedsiębiorstwa produkcyjnego SKLEJKA – EKO S.A.*, Praca dyplomowa Wydziału Mechanicznego PWr. (niepublikowana).
- [244] Wintgen G., *System cybernetyczny w świetle teorii mnogości*, Problemy Organizacji, z. 2, 1972.
- [245] Witkowski J. (red.), *Logistyka w zarządzaniu przedsiębiorstwem*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu, Wrocław 2002.
- [246] Wojciechowski A., *Logistyka teorią systemowego wsparcia procesów w przedsiębiorstwie*, Materiały IX Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2005.
- [247] Wojciechowski A., *Zastosowanie teorii systemów w praktyce projektowej układów wsparcia logistycznego*, Materiały XI Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane 2007.
- [248] Xing L., Dugan J.B., *Analysis of generalized phased mission system reliability, performance and sensitivity*, IEEE Transactions Reliability, Vol. 51, 199–211, 2002.
- [249] Xing L., *Reliability Evaluation of Phased-Mission Systems With Imperfect Fault Coverage and Common-Cause Failures*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 56, No. 1, March 2007.
- [250] Zając M., Zając P., *Zarządzanie łańcuchem dostaw z wykorzystaniem modelu SCOR*, Logistyka, nr 3, 2004.
- [251] Zając M., *Problemy oceny niezawodności elementów systemu transportu intermodalnego*, [w:] Metody badań przyczyn i skutków uszkodzeń. XXXIII Zimowa Szkoła Niezawodności, Radom 2005.
- [252] Zając M., *Analiza sieci terminalowej transportu kombinowanego w Europie i Polsce*, [w:] Konferencja LogiTrans, Szczyrk 2005.
- [253] Zając M., *Wykorzystanie badań ankietowych do oszacowania niezawodności systemu transportu intermodalnego*, [w:] Niekonwencjonalne metody oceny trwałości i niezawodności. XXXIV Zimowa Szkoła Niezawodności. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2006.
- [254] Zając M., *Analysis of five-phases model of reliability of intermodal transportation*, Journal of KONBiN, Vol. 1, nr 1, 2006.
- [255] Zając M., *Application of a five-phase reliability model of combined transportation system*, [w:] Safety and reliability for managing risk, Vol. 3, Taylor and Francis, Leiden 2006.
- [256] Zając M., *Modelowanie gotowości systemu transportu intermodalnego z zastosowaniem procesów semi-markowskich*, [w:] Problemy niezawodności systemów. XXXV Zimowa Szkoła Niezawodności. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2007.
- [257] Zając M., *Model niezawodności systemu transportu intermodalnego*, Raporty Inst. Konstr. Ekspł. Masz. PWr., Ser. PRE nr 3. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wrocław 2007.
- [258] Zając M., *Wpływ przeladunku na niezawodność systemu transportu intermodalnego*, Systems, Vol. 12, nr 2, Wrocław 2007.
- [259] Zając M., Budny T., *The development of semi-Markov transportation model*, [w:] Safety, reliability and risk analysis: theory, methods and applications, Vol. 4, Taylor & Francis, Leiden 2008.
- [260] Zając M., Budny T., *On determination of some characteristics of semi-Markov process for different distributions of transient probabilities*, Reliability & Risk Analysis: Theory & Applications, Vol. 2, nr 2, 2009
- [261] Zamojski W., *Niezawodność i eksploatacja systemów*, Wyd. PWr., Wrocław 1981.
- [262] Ziemia S., Jarominek W., Staniszewski R., *Problemy teorii systemów*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław 1980.



BIBLIOTEKA GŁÓWNA

354798 15/4

Niniejsza publikacja stanowi podsumowanie prac naukowych skierowanych na badania, ocenę i modelowanie systemów logistycznych.

Dotychczas w badaniach niezawodności systemów technicznych dominowało podejście w sensie rzeczowym. Jednak ocena jakości i niezawodności wykonania zadania logistycznego jest zadaniem bardziej złożonym – wymagane jest spełnienie kilku kryteriów, w tym kryterium zadowolenia klienta. Wobec tego bardziej adekwatne jest podejście w sensie czynnościowym – system logistyczny stanowi zespół czynności związanych z celowym przemieszczaniem i rozmieszczeniem w czasie i przestrzeni ładunków i związanych z nimi informacji.

Książka została podzielona na 7 części merytorycznych. Omówiono: rolę logistyki we współczesnej gospodarce oraz podkreślono oczekiwany przez przedsiębiorców wzrost znaczenia niezawodności procesów logistycznych w przyszłej działalności gospodarczej; przedstawiono sposoby modelowania systemów logistycznych i miary oceny funkcjonowania tej klasy systemów; zaprezentowano różne sposoby rozumienia pojęcia niezawodność systemu logistycznego; scharakteryzowano modele niezawodności: elementu technicznego odnawialnego i nieodnawialnego, elementu logistycznego realizującego elementarne zadanie logistyczne, systemu technicznego zbudowanego z elementów nieodnawialnych (struktury niezawodności) i elementów odnawialnych (model Markowa i model semi-Markowa), systemu logistycznego wykorzystującego modele niezawodności systemów wielofazowych.

Prezentowane pojęcia i modele zostały zilustrowane przykładami oceny niezawodności rzeczywistych obiektów i systemów logistycznych.



**Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w księgarni „Tech”
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel. 71 320 29 35
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl**

ISBN 978-83-7493-594-4