

Politechnika Wroclawska
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Zakład Logistyki i Systemów Transportowych

Rozprawa doktorska

Model logistycznego wsparcia systemu eksploatacji środków transportu

Raport serii: PRE nr 3/2008

Sylwia Werbińska

Promotor:

Dr hab. inż. T. Nowakowski, Prof. nadzw. PWt.

Słowa kluczowe:
niezawodność systemu technicznego
system wsparcia logistycznego
niezawodność procesu zaopatrzenia
modelowanie nadsystemu
rezerwa czasowa

Uwzględnienie zawodności systemu wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego wymaga zdefiniowania podstawowych relacji pomiędzy tej klasy systemami w procesie oceny gotowości realizowanych funkcji. Z tej perspektywy opracowano model nadsystemu z rezerwą czasową w oparciu o procesy odnowy przy wykorzystaniu symulacji komputerowej. Przeprowadzono analizę wrażliwości modelu oraz jego weryfikację w oparciu o dane, uzyskane w procesie eksploatacji systemu rzeczywistego.

Wrocław, 2008

Spis rzeczy:

Spis rzeczy.....	3
Spis ważniejszych oznaczeń.....	7
Streszczenie.....	17
1. LOGISTYKA FUNKCJONOWANIA SYSTEMU TECHNICZNEGO.....	21
2. MODELE LOGISTYCZNEGO WSPARCIA FUNKCJONOWANIA SYSTEMU TECHNICZNEGO.....	29
2.1. Modele zaopatrzenia systemu technicznego w części wymienne.....	35
2.2. Modele z rezerwą strukturalną uwzględniające zdolność obsługową stanowisk remontowych.....	67
2.3. Modele z rezerwą strukturalną uwzględniające problem dostępności ekipy remontowej.....	89
2.4. Pozostałe modele wsparcia logistycznego.....	113
2.4.1. Problem optymalnej organizacji procesu transportowania niezbędnych zasobów logistycznych.....	113
2.4.2. Problem dostępności wyposażenia wspierającego i jej wpływ na charakterystyki niezawodnościowe systemu obsługiwanego.....	115
2.4.3. Problem zawodności przepływu informacji w systemie technicznym.....	117
2.5. Podsumowanie.....	119
3. MODELE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW Z REZERWĄ CZASOWĄ.....	125
4. CEL, ZAŁOŻENIA I ZAKRES PRACY.....	133
4.1. Podstawowe definicje i założenia.....	134
4.1.1. niezawodność systemu technicznego.....	134
4.1.2. niezawodność systemu wsparcia logistycznego.....	135
4.1.3. niezawodność nadsystemu z rezerwą czasową.....	136
5. ANALITYCZNY MODEL SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ.....	139
5.1. Niezdatność nadsystemu z jednoelementowym systemem technicznym, z pomijalnym czasem odnowy.....	140
5.2. Niezdatność nadsystemu z jednoelementowym systemem technicznym, z niepomijalnym czasem odnowy.....	145
5.3. Niezdatność nadsystemu z wieloelementowym systemem technicznym.....	149
5.4. Funkcja gotowości nadsystemu z rezerwą czasową.....	153
5.4.1. Współczynnik gotowości nadsystemu z rezerwą czasową.....	157
5.5. Model logistycznego wsparcia funkcjonowania systemu technicznego.....	158

5.5.1. Funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu z rezerwą czasową.....	158
6. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI ANALITYCZNEGO MODELU SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ.....	161
6.1. Intensywność dostaw elementów wymiennych.....	164
6.2. Intensywność uszkodzeń elementu pracującego systemu technicznego.....	168
6.3. Intensywność wymian elementu pracującego.....	172
6.4. Intensywność długości rezerwy czasowej nadsystemu.....	174
6.5. Koszty jednostkowe eksploatacji nadsystemu.....	177
7. SYMULACYJNY MODEL SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ.....	181
7.1. Zmienne modelu symulacyjnego.....	181
7.2. Algorytm procesu symulacji.....	184
8. ANALIZA ZGODNOŚCI MODELU SYMULACYJNEGO Z WYNIKAMI ANALITYCZNYMI.....	189
8.1. Model nadsystemu z pomijalnym czasem odnowy systemu technicznego przy założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów.....	189
8.2. Model nadsystemu z niepomijalnym czasem odnowy systemu technicznego przy założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów.....	196
9. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI MODELU SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ.....	199
9.1. Parametry charakteryzujące funkcjonowanie systemu wsparcia logistycznego.....	200
9.1.1. Parametry polityki zaopatrzenia.....	200
9.1.1.1. Wielkość partii zamówienia.....	200
9.1.1.2. Poziom zapasu alarmowego.....	204
9.1.1.3. Wielkość zapasu początkowego.....	206
9.1.2. Parametry charakteryzujące proces dostaw.....	206
9.1.2.1. Intensywność rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji dostaw.....	206
9.1.2.2. Wartość oczekiwana czasu realizacji dostaw.....	208
9.2. Parametry charakteryzujące funkcjonowanie systemu technicznego.....	210
9.2.1. Intensywność uszkodzeń elementów systemu technicznego.....	210
9.2.2. Oczekiwany czas pracy elementów systemu technicznego.....	211
9.2.3. Intensywność odnowy elementów systemu technicznego.....	212
9.2.4. Oczekiwany czas odnowy elementów systemu technicznego.....	212

9.2.5. Liczba pracujących elementów w systemie technicznym o strukturze progowej warunkująca zdatność systemu technicznego.....	213
9.3. Parametry charakteryzujące funkcjonowanie nadsystemu.....	214
9.3.1. Intensywność rozkładu prawdopodobieństwa okresu rezerwy czasowej nadsystemu.....	214
9.3.2. Oczekiwana długość rezerwy czasowej nadsystemu.....	215
9.3.3. Koszty jednostkowe eksploatacji nadsystemu.....	215
10. WERYFIKACJA MODELU SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ.....	217
10.1. Opis systemu rzeczywistego.....	217
10.2. Analiza zgodności danych symulacyjnych i rzeczywistych.....	220
11. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	231
Literatura.....	235
Załącznik I. Przykładowy program symulacyjny dla nadsystemu z rezerwą czasową....	249
Załącznik II. Współczynniki gotowości nadsystemu.....	254
Załącznik III. Równania regresji dla parametrów modelu analizowanych w procesie badania wrażliwości modelu symulacyjnego.....	257

Spis ważniejszych oznaczeń:

- A – wskaźnik gotowości systemu
- A_{min} – minimalny poziom gotowości nadsystemu, ustalany ze względu na parametr dostępnej rezerwy czasowej
- A_u – parametr kształtu rozkładu Weibull'a opisującego zmienną u
- $A(t)$ – funkcja gotowości systemu
- B_u – parametr skali rozkładu Weibull'a opisującego zmienną u
- $B(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca okres niezdatności nadsystemu wynikającej tylko z braku elementów wymiennych,
- $b(\xi)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca okres niezdatności nadsystemu wynikającej tylko z braku elementów wymiennych
- $B_1(\xi_1)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej okres niezdatności wynikającej zarówno z braku elementów wymiennych jak i zbyt długiego czasu naprawy nadsystemu
- $b_1(\xi_1)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej okres niezdatności nadsystemu wynikającej zarówno z braku elementów wymiennych jak i zbyt długiego czasu naprawy
- $b_2(\xi_1)$ – gęstość prawdopodobieństwa opisująca okres każdorazowej niezdatności nadsystemu podczas jednego cyklu zaopatrzenia
- C_{dw} – oczekiwane koszty niezdatności systemu w jednym cyklu zaopatrzenia
- c_{dw} – jednostkowy koszt niezdatności systemu przypadający na jednostkę czasu
- c_{dw1} – jednostkowy koszt niezdatności systemu w okresie od chwili pojawienia się uszkodzenia do chwili jego wykrycia
- C_h – oczekiwane koszty utrzymania zapasów w jednym cyklu zaopatrzenia
- c_h – jednostkowy koszt utrzymania części wymiennej w jednostce czasu
- c_i – jednostkowy koszt wymiany elementu operacyjnego na rezerwowo przed wystąpieniem uszkodzenia
- c_{in} – jednostkowy koszt operacji kontroli stanu systemu przeprowadzonej przy odnowie minimalnej obiektu
- c_{in1} – jednostkowy koszt operacji kontroli stanu systemu
- c_m – jednostkowy koszt monitorowania na jednostkę czasu
- c_n – jednostkowy koszt naprawy elementu
- C_{nm} – oczekiwane koszty realizacji odnowy minimalnej obiektu
- c_{nm} – jednostkowy koszt realizacji naprawy minimalnej elementu
- $c_{nm}(t)$ – koszty naprawy minimalnej do chwili czasu t

- C_{nm}^L – wartość oczekiwana kosztów napraw minimalnych w okresie dostawy L
- C_{nml} – oczekiwany jednostkowy koszt realizacji odnowy minimalnej I typu uszkodzenia
- C_{nmII} – oczekiwany jednostkowy koszt realizacji odnowy minimalnej dla II typu uszkodzenia obiektu
- C_{op} – oczekiwane koszty operacyjne systemu
- c_{op} – jednostkowe koszty operacyjne przypadające na jednostkę czasu
- $c_{op}(y)$ – funkcja definiująca strukturę kosztów operacyjnych systemu
- c_p – jednostkowy koszt zakupu części wymiennych
- C_{pf} – funkcja oczekiwanego zysku w okresie $(0, t]$, przypadającego na jednostkę czasu
- c_{p1} – jednostkowy koszt zakupu części wymiennych w zamówieniu awaryjnym w chwili t
- c_{p2} – jednostkowy koszt zakupu części wymiennych w zamówieniu regularnym w chwili t
- C_r – oczekiwane koszty odnowy systemu
- c_r – jednostkowy koszt operacji odnowy
- c_{re} – jednostkowy koszt realizacji procesu odnowy przez eksperta na jednostkę czasu
- c_{rg} – jednostkowy koszt realizacji procesu odnowy przez regularnego konserwatora na jednostkę czasu
- C_{ri} – całkowite koszty funkcjonowania systemu, jeżeli element pracujący jest wymieniany po i -tej jednostce czasu pracy
- C_{rj} – oczekiwany koszt odnowy systemu w j -tym cyklu wymiany
- c_{rk} – koszt pracy konserwatora realizującego odnowę j -tego podsystemu
- c_{ro} – jednostkowy koszt naprawy elementu uszkodzonego w stanie operacyjnym na jednostkę czasu
- c_{rs} – jednostkowy koszt naprawy elementu uszkodzonego w stanie rezerwy na jednostkę czasu
- c_{rw} – przychód na jednostkę czasu zdatności systemu
- c_{rz} – jednostkowy koszt pozostałego okresu zdatności systemu
- c_{r1} – jednostkowy koszt realizacji procesu odnowy przez pierwszego konserwatora na jednostkę czasu
- c_{r2} – jednostkowy koszt realizacji procesu odnowy przez drugiego konserwatora na jednostkę czasu
- c_{rI} – jednostkowy koszt odnowy elementu po uszkodzeniu typu I
- c_{rII} – jednostkowy koszt odnowy elementu po uszkodzeniu typu II

- $C_s(i)$ – funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu obejmująca koszty jego obsługi oraz koszty zapasów
- C_{sj} – całkowite koszty j -tego typu w okresie $(0, T)$
- c_{sp} – jednostkowy koszt braku zapasów w jednostce czasu
- c_v – jednostkowy koszt wizyty konserwatora
- c_{va} – jednostkowy koszt awaryjnej wizyty konserwatora
- c_{ve} – jednostkowy koszt wizyty eksperta
- c_{vr} – jednostkowy koszt regularnej wizyty konserwatora
- c_{vz} – jednostkowy koszt zatrudnienia konserwatora na jednostkę czasu
- c_{v1} – jednostkowy koszt wizyty pierwszego konserwatora
- c_{v2} – jednostkowy koszt wizyty drugiego konserwatora
- c_w – jednostkowy koszt wymiany elementu
- C_{w1} – oczekiwany koszt realizacji wymian korekcyjnych systemu
- c_{w1} – jednostkowy koszt wymiany elementu podczas obsługi korekcyjnej
- C_{w2} – oczekiwane koszty realizacji wymiany profilaktycznej obiektu
- c_{w2} – jednostkowy koszt wymiany elementu podczas obsługi profilaktycznej
- c_{wI} – jednostkowy koszt wymiany elementu po uszkodzeniu typu I
- c_{wII} – jednostkowy koszt wymiany elementu po uszkodzeniu typu II
- c_{w3} – koszt wymiany obiektu w chwili T_{Nnm}
- c_{wz} – jednostkowy koszt wymiany elementu (włączając koszt zakupu)
- C_z – funkcja oczekiwanych całkowitych kosztów zakupu i utrzymania zapasów (koszty zapasów)
- c_z – jednostkowe koszty całkowitych kosztów zakupu i utrzymania zapasów w jednostce czasu
- c_{zi} – całkowity jednostkowy koszt części wymiennej i -tego elementu
- C_o – oczekiwane koszty zamawiania w jednym cyklu zaopatrzenia
- c_o – ustalony jednostkowy koszt zamówienia
- $E(t)$ – dystrybuanta prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji dostawy części wymiennych do systemu logistycznego
- $\varepsilon(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji dostawy części wymiennych do systemu logistycznego
- $F(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas poprawnej pracy systemu
- $f(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas poprawnej pracy systemu
- $F_{Ai}(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu gotowości i -tego elementu

- $F_{cw}(x)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa kosztów naprawy
- $F_i(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas poprawnej pracy i -tego elementu systemu
- $f_i(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas poprawnej pracy i -tego elementu systemu
- $F_L(t)$ – funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas poprawnej pracy systemu logistycznego
- $f_L(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas poprawnej pracy systemu logistycznego
- $f_r(t)$ – kompozycja gęstości rozkładów prawdopodobieństwa funkcji $m(t)$ oraz $w(t)$
- $F_s(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas poprawnej pracy wszystkich elementów systemu technicznego, których uszkodzenie spowoduje przejście systemu technicznego do stanu niezdatności
- $f_s(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas poprawnej pracy wszystkich elementów, których uszkodzenie spowoduje przejście systemu technicznego do stanu niezdatności
- $F_{s1}(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasów poprawnej pracy elementu nadmiarowego
- $f_1(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej określającej łączny czas pracy i wymiany elementu ($T_o + T_r$)
- $f_2(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, zmiennej losowej definiującej czas do chwili pojawienia się i -tego uszkodzenia nadsystemu w jednym cyklu zaopatrzenia
- $f_{2j}(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, zmiennej losowej definiującej czas poprawnej pracy oraz czas odnowy do chwili i -tego uszkodzenia systemu technicznego
- $G(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas odnowy systemu
- $g(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas odnowy systemu
- $G_i(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu odnowy elementu systemu
- $G_i^{rf}(t)$ – funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej liczbę uszkodzeń wyposażenia wspierającego w trakcie realizacji odnowy systemu technicznego

- $g_i(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas odnowy elementu systemu
- $G_s(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas wymiany wszystkich elementów, których działanie pozwoli przywrócić system techniczny do stanu zdatności
- $g_s(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas wymiany wszystkich elementów, których działanie pozwoli przywrócić system techniczny do stanu zdatności
- $H(t)$ – funkcja odnowy systemu
- $H_i(t)$ – funkcja odnowy i -tego elementu systemu
- $h(t)$ – funkcja gęstości odnowy systemu
- $h_1(t)$ – funkcja gęstości odnowy nadsystemu w pierwszym sub-okresie cyklu zaopatrzenia
- $h_2(t)$ – funkcja gęstości odnowy nadsystemu w drugim sub-okresie cyklu zaopatrzenia
- $h_3(t)$ – funkcja gęstości odnowy nadsystemu w trzecim sub-okresie cyklu zaopatrzenia
- i – liczba zapasowych elementów wymiennych w systemie
- I_0 – wielkość zapasu początkowego w chwili rozpoczęcia symulacji
- $I(t)$ – funkcja wielkości zapasów w chwili t w cyklu zaopatrzenia
- k – liczba elementów w systemie progowym niezbędna, aby system pozostawał w stanie zdatności
- k_f – jednorazowy koszt kary w wyniku pojawienia się niezdatności systemu
- $L(L_1, L_2)$ – losowy czas realizacji dostawy (awaryjnej, regularnej)
- L_m – losowy czas przygotowań do obsługi właściwej systemu
- M – liczba elementów pracujących w systemie technicznym
- m – liczba komponentów podsystemu
- $m(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, pojawienia się uszkodzenia nadsystemu
- $N(t)$ – liczba odnów w okresie $(0, t)$
- N_{in} – oczekiwana liczba uszkodzeń pomiędzy kolejnymi kontrolami stanu systemu
- N_{in1} – liczba zrealizowanych operacji kontroli stanu systemu
- N_{nm} – liczba zrealizowanych napraw minimalnych do czasu wymiany systemu
- N_o – losowa liczba złożonych zamówień na elementy wymienne w okresie $(0, t]$
- N_{rf} – losowa liczba uszkodzeń stanowiska obsługiwanego w okresie $(0, t]$
- N_{rf1} – losowa liczba uszkodzeń wyposażenia wspierającego w okresie $(0, t]$
- N_u – losowa liczba uszkodzeń elementu w okresie $(0, t]$
- N_v – losowa liczba wizyt konserwatora w systemie w okresie $(0, t]$

- N_{va} – losowa liczba awaryjnych wizyt konserwatora w okresie $(0,t]$
 N_{ve} – losowa liczba wizyt eksperta w okresie $(0,t]$
 N_{vr} – losowa liczba regularnych wizyt konserwatora w okresie $(0,t]$
 N_{v1} – losowa liczba wizyt pierwszego konserwatora w okresie $(0,t]$
 N_{v2} – losowa liczba wizyt drugiego konserwatora w okresie $(0,t]$
 $p_{nm}(y)$ – prawdopodobieństwo przeprowadzenia odnowy minimalnej w wieku y
 P_{NNj} – prawdopodobieństwo niezdatności nadsystemu w j -tym cyklu zaopatrzenia
 P_{NN1j} – prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności nadsystemu w czasie pojedynczego cyklu zaopatrzenia, wynikające z braku elementów wymiennych (dla nadsystemu z pomijalnym T_r)
 p_{sw} – prawdopodobieństwo poprawnej pracy przełącznika
 $p_w(y)$ – prawdopodobieństwo przeprowadzenia wymiany elementu w wieku y
 $p_I(y)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia typu I
 $p_{II}(y)$ – prawdopodobieństwo uszkodzenia typu II
 p_λ – prawdopodobieństwo, że system po naprawie ma taką samą intensywność uszkodzeń jak przed naprawą
 $p_{\gamma r}$ – prawdopodobieństwo, że system z rezerwą czasową powróci do stanu zdatności funkcjonalnej w założonym okresie rezerwy czasowej
 Q – wielkość zamówienia (wielkość partii, wielkość pojedynczej dostawy)
 R – punkt zamawiania (*reordering point*)
 R_c – poziom niezawodności, przy której przeprowadza się operację odnowy profilaktycznej obsługiwanego systemu
 R_m – poziom niezawodności, przy której system podlega gruntownej odnowie
 R_0 – niezawodność obiektu w chwili rozpoczęcia procesu składowania
 $R(t)$ – funkcja niezawodności obsługiwanego systemu
 $R_i(t)$ – funkcja niezawodności i -tego obiektu
 $R_{op}(t)$ – niezawodność elementu pracującego w okresie $(0,t]$
 $R_s(t)$ – niezawodność obiektu w chwili t
 r – liczba stanowisk obsługiwanego systemu
 r_c – liczba kanałów obsługi na stanowisku remontowym
 r_j – liczba stanowisk obsługiwanego systemu w j -tym podsystemie
 r_k – liczba konserwatorów w systemie obsługiwanego systemu
 r_{kj} – liczba konserwatorów w j -tym podsystemie
 r_{kj}^{max} – maksymalna liczba konserwatorów, która może realizować operacje odnowy w j -tym podsystemie

S	– poziom zapasu maksymalnego
s	– wielkość poziomu zamawiania
T_{cj}	– losowy czas trwania j -tego cyklu zaopatrzenia
t_d	– chwila dostawy części wymiennych do systemu wsparcia logistycznego
T_{dwi}	– losowy czas usunięcia niezdatności uszkodzonego i -tego elementu systemu
TE	– przyjęty horyzont planowania
T_F	– losowy czas realizacji zadań przygotowawczych w procesie odnowy systemu
t_i	– chwila uszkodzenia się systemu technicznego
t'_i	– chwila zakończenia odnowy systemu technicznego
t''_i	– chwila uszkodzenia się nadsystemu
t''_{ii}	– chwila przywrócenia zdatności nadsystemu
T_i^v	– losowy czas realizacji zadań odnowy uzależniony od rodzaju elementu
T_{in1}	– losowy czas zajętości konserwatora ze względu na realizację inspekcji systemu
T_L	– losowy czas poprawnej pracy systemu logistycznego
t_n	– chwila n -tego uszkodzenia elementu
T_{Nnm}	– losowy czas do wymiany elementu
T_o	– losowy czas poprawnej pracy systemu
$T_{of}(t_0)$	– losowy czas zdatności operacyjnej systemu w j -tym cyklu wymiany
T_r	– losowy czas odnowy systemu
T_{re}	– losowy czas zajętości eksperta
T_{rg}	– losowy czas zajętości regularnego konserwatora
T_{ro}	– losowy czas odnowy elementu uszkodzonego w stanie operacyjnym
T_{Rm}	– losowy czas do chwili osiągnięcia przez system niezawodności na poziomie R_m
T_{rs}	– losowy czas odnowy elementu uszkodzonego w stanie rezerwy
T_{r1}	– losowy czas zajętości pierwszego konserwatora
T_{r2}	– losowy czas zajętości drugiego konserwatora
T_{rI}	– losowy czas zajętości konserwatora ze względu na realizację operacji odnowy elementu po uszkodzeniu typu I
T_{rII}	– losowy czas zajętości konserwatora ze względu na realizację operacji odnowy elementu po uszkodzeniu typu II
T_s	– losowy czas przełączania elementu rezerwowego do stanu operacyjnego
t_s	– chwila rozpoczęcia procesu składowania
t_{s+n}	– chwila uszkodzenia ostatniego pracującego elementu w systemie, po której, jeżeli nie została zrealizowana nowa dostawa, następuje przestój systemu technicznego

- $t_{s+n+\gamma}$ – chwila uszkodzenia ostatniego pracującego elementu w systemie, po której, jeżeli nie została zrealizowana nowa dostawa w czasie T_γ , następuje przestój nadsystemu
- T_w – losowy czas realizacji operacji wymiany elementu
- t_w – chwila wymiany elementu
- T_{w1} – losowy czas realizacji operacji odnowy korekcyjnej
- T_{w2} – losowy czas realizacji operacji odnowy profilaktycznej
- T_{wr} – losowy czas oczekiwania na przybycie konserwatora
- T_z – losowy czas zajętości stanowiska remontowego
- T_γ – losowy czas rezerwy czasowej
- t_0 – chwila złożenia zamówienia na elementy wymienne
- $U(t)$ – kompozycja dystrybuant rozkładów prawdopodobieństw opisujących czas poprawnej pracy oraz czas odnowy kolejnych $s+1$ elementów systemu technicznego (($s+1$)-krotny splot funkcji)
- $u(t)$ – kompozycja gęstości rozkładów prawdopodobieństw, opisujących łączny czas pracy i wymiany kolejnych $s+1$ elementów
- $U_s(t)$ – kompozycja dystrybuant rozkładów prawdopodobieństw opisujących czas poprawnej pracy oraz odnowy kolejnych $s+1$ elementów (($s+1$)-krotny splot funkcji) (uzależniona od struktury niezawodnościowej systemu technicznego)
- $u_s(t)$ – kompozycja gęstości prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy systemu, gdy pojawi się niezdatność z powodu braku części wymiennych (uzależniona od struktury niezawodności systemu wspieranego)
- $W(\zeta)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca okres niezdatności nadsystemu z powodu przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej przez czas naprawy
- $w(\zeta)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca okres niezdatności nadsystemu z powodu przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej przez czas naprawy

α_o	– poziom obsługi
β	– intensywność dostaw elementów wymiennych do systemu wsparcia logistycznego
$A(t)$	– skumulowana intensywność uszkodzeń
$\lambda(t)$	– funkcja intensywności uszkodzeń
$\lambda_I(t)$	– funkcja intensywności uszkodzeń I typu
$\lambda_{II}(t)$	– funkcja intensywności uszkodzeń II typu
λ	– intensywność uszkodzeń systemu technicznego
λ_i	– intensywność uszkodzeń i -tego elementu
λ^n	– intensywność uszkodzeń elementu pracującego po naprawie
λ^s	– intensywność uszkodzeń części wymiennej
λ_{rf}	– intensywność uszkodzeń wyposażenia wspierającego
μ	– intensywność napraw systemu technicznego
μ_{rf}	– intensywność naprawy wyposażenia wspierającego
ν	– intensywność rezerwy czasowej nadsystemu
ξ	– losowy czas niezdatności nadsystemu wynikającej tylko z braku elementów wymiennych
ξ_1	– losowy czas niezdatności nadsystemu uzależniony od czasu realizacji zadania logistycznego τ , jak również od losowego czasu odnowy T_r systemu technicznego
τ	– losowy czas realizacji zapotrzebowania systemu technicznego przez system logistyczny
τ_1	– losowy czas, w którym realizowane są tylko odnowy minimalne uszkodzonych elementów systemu
$\Phi(t)$	– dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej okres rezerwy czasowej
$\varphi(t)$	– gęstość rozkładu prawdopodobieństwa opisująca okres rezerwy czasowej
$\Psi(t)$	– dystrybuanta prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji zapotrzebowania systemu technicznego przez system logistyczny
$\psi(t)$	– gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji zapotrzebowania systemu technicznego przez system logistyczny

Streszczenie

W obszarze funkcjonowania systemów eksploatacji maszyn i urządzeń właściwa realizacja zadań logistycznych jest szczególnie ważna, gdyż bez odpowiedniej organizacji procesów zarządzania logistycznego oraz niezawodnej infrastruktury logistycznej nie ma możliwości efektywnej realizacji procesów eksploatacji.

Jednocześnie klasyczne modele niezawodnościowe systemu technicznego, omawiane w literaturze, bazują na założeniu, że wszelkie niezbędne procesy logistyczne są realizowane bez zakłóceń w sposób natychmiastowy. Znane opracowane modele wsparcia logistycznego, przede wszystkim, ograniczają się do analizy procesu zaopatrzenia systemu technicznego w niezbędne części wymienne, nie badając problemu wpływu funkcjonowania innych elementów logistycznych na poziom niezawodności systemu wspieranego.

W rezultacie, w procesie analizy gotowości nie jest uwzględniany wpływ poziomu niezawodności systemu logistycznego na realizowane procesy podstawowe, a tym samym na gotowość systemu technicznego. Ponadto, przeprowadzane analizy są niepełne z powodu braku oceny wpływu relacji występujących pomiędzy systemem technicznym a systemem go wspierającym na ogólną niezawodność realizowanych funkcji i zadań.

Jednym z możliwych rozwiązań problemu oceny podstawowych relacji występujących między omawianymi systemami jest ich wzajemna integracja w jeden nadsystem, w którym pewne zadania są realizowane wspólnie przez dwa współpracujące ze sobą systemy (techniczny i wspierający) w celu zapewnienia określonego potencjału operacyjnego.

Praca, obejmująca opracowanie modelu logistycznego wsparcia funkcjonowania systemu eksploatacji, składa się z dwóch podstawowych części. W pierwszej części przeanalizowano dostępną literaturę z obszaru zagadnienia. W rozdziale pierwszym przedstawione zostały podstawowe definicje z obszaru logistyki funkcjonowania systemu technicznego, zdefiniowano pojęcia gotowość i niezawodność systemu wsparcia logistycznego.

W rozdziale drugim został omówiony przegląd dostępnej literatury z zakresu modelowania logistycznego wsparcia funkcjonowania systemu technicznego, którego celem jest zapewnienie podstawowych zasobów w procesie obsługi systemu technicznego, ze szczególnym uwzględnieniem modeli zaopatrzenia systemu technicznego w części wymienne.

Następnie, rozdział trzeci poświęcono przeglądowi literatury z obszaru modelowania niezawodności systemów z rezerwą czasową. Przedstawiono podstawową klasyfikację modeli systemów z rezerwą czasową z uwzględnieniem m.in. celu i metody modelowania, typu wykorzystywanej rezerwy czasowej, czy możliwości zastosowania modelu w praktyce.

Analiza dostępnej literatury pozwoliła na realizację drugiej części pracy – budowę modelu systemu wsparcia logistycznego z zależnością czasową.

W rozdziale czwartym zdefiniowano cel pracy oraz podstawowe założenia i definicje, dotyczące, m.in. pojęcia niezawodności systemu wsparcia logistycznego oraz nadsystemu.

W rozdziale piątym omówiono analityczny model nadsystemu z rezerwą czasową, wyznaczając m.in. postać analityczną funkcji: dystrybuanty i gęstości prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu z rezerwą czasową, funkcji gotowości oraz wskaźnika gotowości. Określono także funkcję oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w jednym cyklu zaopatrzenia.

Opracowany model teoretyczny charakteryzował się znacznymi ograniczeniami jego wykorzystania (m.in. ze względu na konieczność wyznaczania n -krotnych splotów funkcji analitycznych modelu). W związku z tym, zbudowano model symulacyjny, przedstawiony w rozdziale 7, dzięki któremu możliwe było przeanalizowanie zachowania się nadsystemu, gdy realizowane procesy są opisane dowolnymi rozkładami prawdopodobieństwa, a system techniczny jest systemem wieloelementowym. Dzięki badaniu modelu symulacyjnego możliwe było przeprowadzenie analizy wpływu wszystkich parametrów wejściowych (charakterystyk niezawodnościowych systemu technicznego, parametrów procesu zaopatrzenia, parametrów rezerwy czasowej procesu eksploatacji) na wyniki niezawodnościowe i ekonomiczne, uzyskiwane przez nadsystem.

Budowa modelu symulacyjnego systemu wsparcia logistycznego z zależnością czasową wymagała opracowania 15 podstawowych programów symulacji, które pozwoliły na przeprowadzenie niezbędnych eksperymentów numerycznych.

Opracowanie analizowanego modelu byłoby niepełne bez przeprowadzenia badania jego wrażliwości. W zależności od parametrów wejściowych nadsystemu oceniano uzyskane wyniki niezawodnościowe i ekonomiczne jego funkcjonowania. Przeanalizowano zachowanie się modelu analitycznego (rozdział 6), jak również modelu symulacyjnego (rozdział 9) na zmianę podstawowych parametrów wejściowych modelu. Uzyskane charakterystyki mogą być wykorzystane m.in. w procesie organizacji systemu wsparcia logistycznego, mającego pełnić funkcję zapewnienia niezbędnych elementów wymiennych w procesie obsługi systemu technicznego.

Przedstawiony w pracy model symulacyjny poddano także procesowi weryfikacji na podstawie danych, uzyskanych zarówno z przedstawionych w rozdziale 5 wyrażeń analitycznych, jak również danych, pochodzących z obserwacji rzeczywistego systemu eksploatacji środków transportu (tabor kolejowy systemu komunikacji miejskiej miasta Wrocławia).

Przedstawiona w rozdziale 8, weryfikacja zgodności formalnej wyników symulacji z wynikami uzyskanymi w sposób analityczny, przy założeniu wykładniczego charakteru

realizowanych procesów w nadsystemie, wykazała dużą zbieżność modelu symulacyjnego i teoretycznego, o czym świadczy poziom oszacowanych błędów względnych, nieprzekraczający maksymalnej wartości 6% w przypadku wyników niezawodnościowych nadsystemu, oraz 9,5% w przypadku oceny jego wyników ekonomicznych. Przeprowadzono także test zgodności λ -Kolmogorowa który wykazał, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładów prawdopodobieństwa czasów realizacji zadań logistycznych oraz zgodności rozkładów prawdopodobieństwa czasów niezdatności nadsystemu, uzyskanych w sposób analityczny oraz symulacyjny, na poziomie istotności $\alpha = 0,01$.

Porównanie wyników symulacyjnych z danymi rzeczywistymi omówiono w rozdziale 10. Proces funkcjonowania systemu komunikacji miejskiej przedstawiono przy wykorzystaniu opracowanego modelu nadsystemu z rezerwą czasową, w którym system techniczny posiada progową strukturę niezawodnościową ($k = M$). Jednocześnie, weryfikacja modelu symulacyjnego została przeprowadzona dla 8 przypadków, sklasyfikowanych pod kątem liczby pracujących rezerw, chwili tożsamej z chwilą uszkodzenia się systemu technicznego oraz długości rezerwy czasowej.

Analiza wyników symulacyjnych oraz rzeczywistych pozwoliła zauważyć, że specyfika funkcjonowania systemu komunikacji miejskiej powoduje, że w określonych sytuacjach (np. gdy jest więcej elementów rezerwowych w systemie, czasy dostawy są krótkie) wyniki rzeczywiste zależą nie tylko do samego procesu zaopatrzenia w elementy wymienne, ale także od czynnika ludzkiego, mającego bardzo duży wpływ na podejmowane decyzje w systemie. Z tego powodu, bazując na modelu, nie ma możliwości wyznaczenia charakterystyk systemu w przypadku, gdy występuje znaczny nadmiar zapasów, czy czasy dostaw są krótkie. Jednocześnie widać wyraźną tendencję do minimalizacji wpływu czynnika ludzkiego w przypadkach, gdy liczba uszkodzeń w systemie nie pozwala na zupełną dowolność przydzielania elementów wymiennych. W takich przypadkach wyniki symulacji oraz rzeczywiste wykazują dużą zgodność, co potwierdza również przeprowadzony test zgodności λ -Kolmogorowa.

Z punktu widzenia analizowanego w pracy zagadnienia, istotna jest możliwość wyznaczenia prawdopodobieństw niezdatności nadsystemu i systemu technicznego, wynikających z przekroczenia rezerwy czasowej. Wykazano, że taka zależność istnieje, a opracowany model, wykorzystujący relacje czasowe pomiędzy współpracującymi systemami, może być zastosowany do rozwiązywania problemów występujących w praktyce.

1. LOGISTYKA FUNKCJONOWANIA SYSTEMU TECHNICZNEGO

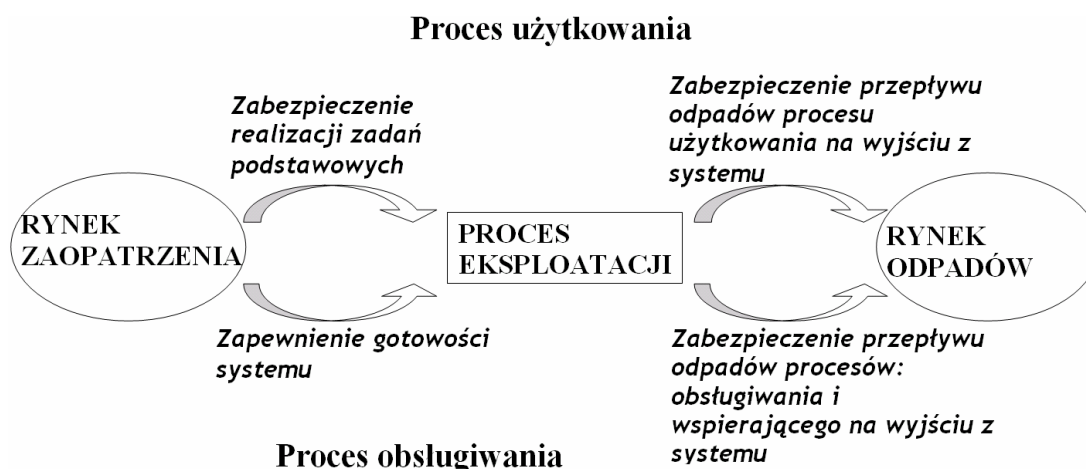
Podstawowe zadania systemu eksploatacji, a dokładniej – jego podsystemu obsługiwanego, sprowadzają się do zapewnienia ciągłości pracy obiektów technicznych (np. maszyn, urządzeń czy środków transportu). Realizacja tego celu nieodzownie związana jest z przepływem materiałów, energii, informacji oraz personelu. Wszelkie te niezbędne zasoby są dostarczane i odprowadzane przez odpowiedni system wsparcia logistycznego, dzięki któremu możliwe jest zachowanie ciągłości realizacji procesów eksploatacji. Analizując zatem problem funkcjonowania systemów technicznych, ograniczenie zakresu logistyki jedynie do przepływu materiałów czy informacji (zgodnie z ideą logistyki przedsiębiorstwa) jest zbyt wąskim podejściem. Systemy techniczne, rozwijając się na przestrzeni ostatnich lat, stały się bardziej zaawansowane technologicznie, charakteryzując się większymi wymaganiami co do jakości obsługi oraz stopnia skomplikowania realizowanych operacji obsługowych. Ponadto wymagania dotyczące ich gotowości operacyjnej również wzrosły. Wiąże się to z koniecznością opracowywania odpowiednio zorganizowanych systemów wsparcia logistycznego, które umożliwią spełnienie określonych wymagań. Z kolei ograniczenie się jedynie do wykorzystania koncepcji logistyki wojskowej również nie pozwoli na zaprojektowanie właściwego systemu wsparcia logistycznego ze względu na istotne różnice m.in. w zakresie podstawowych priorytetów realizowanych zadań wspieranych i logistycznych, wynikających ze specyfiki obu podejść do logistyki – wojskowego i cywilnego.

Opierając się na podstawowej literaturze z zakresu inżynierii logistycznej (np. [16, 17 34, 35]), przy zastosowaniu podejścia systemowego w logistyce, można zdefiniować system wsparcia logistycznego, który wg [16, 35] jest określany jako *celowo zorganizowany podsystem systemu technicznego, wspierający jego proces podstawowy (eksploatacji) poprzez 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 poprzez procesy logistyczne, które towarzyszą każdemu procesowi podstawowemu. W obszarze wsparcia systemów technicznych procesy logistyczne przede wszystkim mają na celu [16, 35, 142, 159]:

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

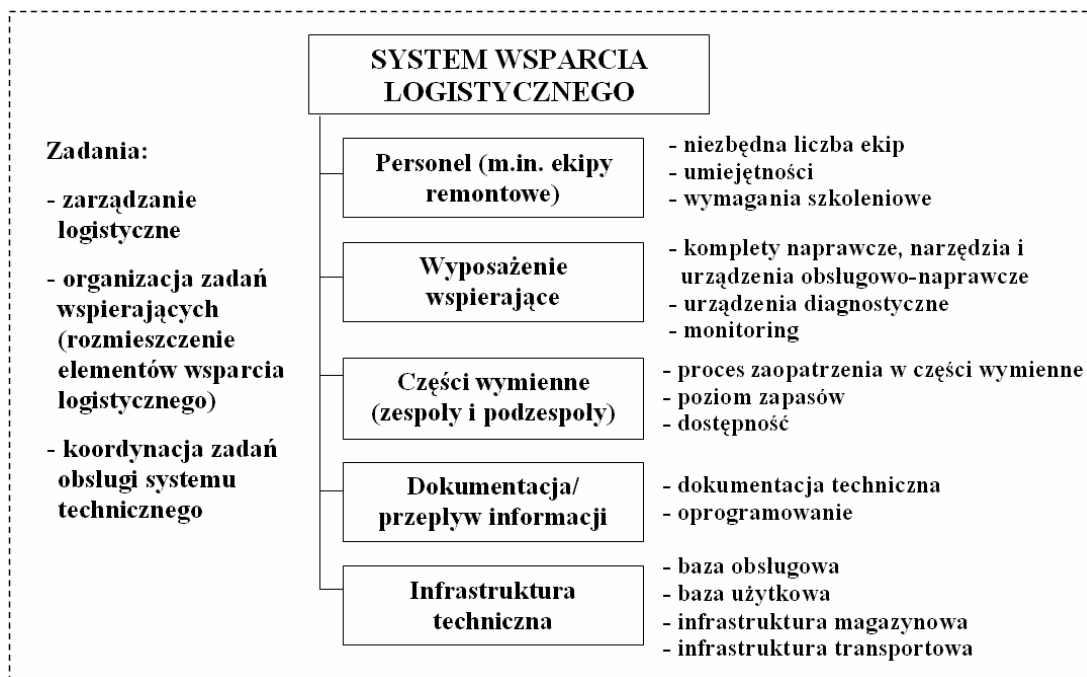
- zapewnienie i naprawa części wymiennych, podzespołów, zespołów i modułów wyposażenia technicznego systemu,
 - zapewnienie terminowości obsługi napraw, zgodnie z wymaganiami i potrzebami systemu technicznego, jak i systemów obsługowych,
- utrzymanie środków trwałych w stanie zdolności funkcjonalnej i zadaniowej:
- zapewnienie maszyn i urządzeń niezbędnych dla 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 (rysunek 1.1).



Rys. 1.1. Zadania logistyki w systemie technicznym

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

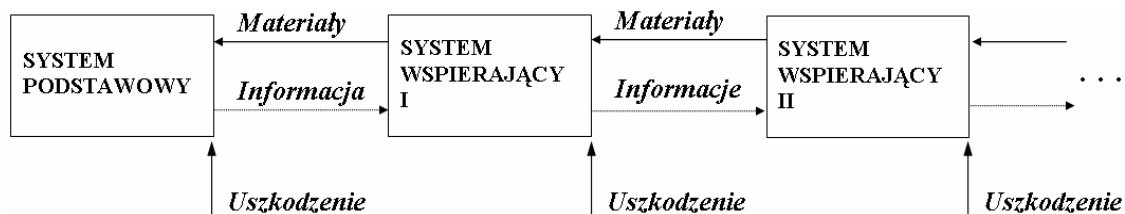
Ponadto, ograniczając zadania logistyki jedynie do problemu zapewnienia niezbędnych zasobów w procesie funkcjonowania systemu technicznego, można wyróżnić pięć podstawowych elementów wsparcia logistycznego (rysunek 1.2).



Rys. 1.2. Elementy wsparcia logistycznego systemu technicznego

Opracowanie własne na podstawie [16, 175]

Nie istnieją tzw. „idealne” systemy logistyczne, które by w sposób ciągły i bez zakłóceń realizowały swoje zadania wspierające. W związku z tym, w rzeczywistych systemach należy wziąć pod uwagę znacznie większą różnorodność pojawiających się błędów i zakłóceń, niż tylko uszkodzenie obiektów technicznych systemu wspieranego (rysunek 1.3).



Rys. 1.3. Problem niezawodności systemów zabezpieczających system podstawowy

Niezawodna realizacja wymienionych zadań logistycznych przez system wspierający bezpośrednio wpływa na prawidłowe funkcjonowanie systemu technicznego. Jednakże w rzeczywistych systemach logistycznych należy także wziąć pod uwagę możliwość wystąpienia uszkodzenia któregoś z ich elementów wykonawczych, co w konsekwencji wymaga zaprojektowania tego systemu z uwzględnieniem zawodności poszczególnych powiązań. Dlatego też, zgodnie ze schematem, kolejny system wspierający II jest niezbędny do zapewnienia utrzymania systemu wspierającego I, itd.

W rozważaniach logistycznych wyróżnić można dwa podstawowe pojęcia dotyczące stanów niezawodnościowych systemu wspierającego: zdatny do zrealizowania zadań, jakie

stawia się systemowi logistycznemu oraz stan niezdatności, który może doprowadzić do, np. [142]:

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

Z drugiej strony, 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.

Obecnie w literaturze zagadnienia nie istnienie jednoznaczna definicja niezawodności systemu logistycznego [183]. W logistyce cywilnej, niezawodność jest przede wszystkim odnoszona do problemu zapewnienia terminowego i niezakłóconego procesu dostawy zamówionych produktów (np. [185, 242]). Jednocześnie wiele prac podkreśla znaczenie problematyki niezawodności funkcjonowania łańcuchów logistycznych (np. [24, 183, 185, 236, 256]). W tym obszarze niezawodność systemu logistycznego jest określana jako *zdolność do zaspokojenia zapotrzebowania klienta końcowego poprzez łańcuch dostaw, w którym proces przepływu materiałów niezakłócony jest możliwą zawodnością dostawcy (ogniwa łańcucha)* [24]. 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* [92, 159].

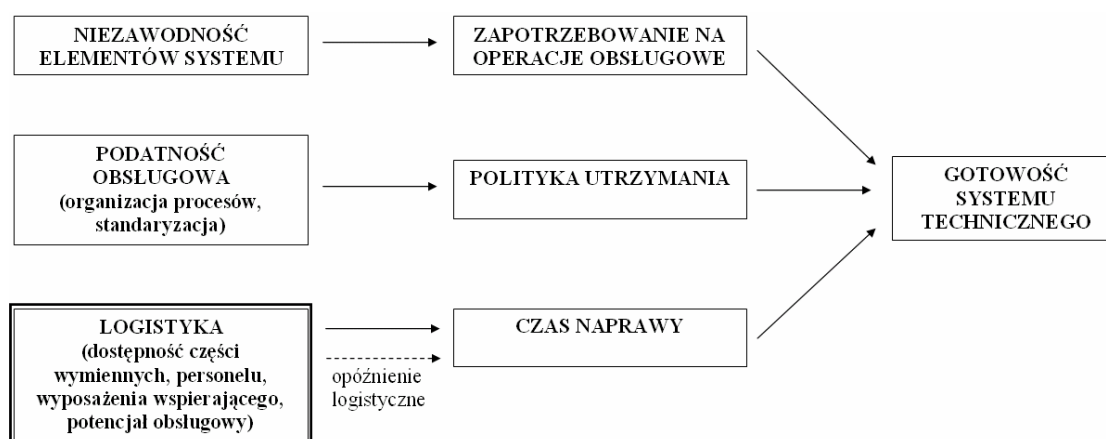
Porównanie znanych literaturze podstawowych definicji niezawodności w obszarze logistyki zostało przedstawione w [264], jednocześnie sprecyzowane zostało pojęcie niezawodności systemu wsparcia logistycznego w obszarze funkcjonowania systemu technicznego jako: *zdolność systemu do niezakłóconej realizacji procesu wspierającego system techniczny w zakresie dostarczenia niezbędnych zasobów logistycznych (części wymiennych, personelu, wyposażenia, itp.), w określonym przedziale czasu i przy ustalonych warunkach operacyjnych*.

Jednocześnie analiza koncepcji i definicji logistycznych wyraźnie wskazuje na konieczność określenia pojęcia: gotowość systemu logistycznego. W literaturze dotyczącej teorii niezawodności i eksploatacji można znaleźć wiele definicji terminu gotowość systemu, zgodnie z którymi jest ona rozumiana jako *jego zdolność do utrzymania się w stanie umożliwiającym podjęcie i wypełnienie wymaganych funkcji/zadań w danych warunkach, w danej chwili lub w danym przedziale czasu przy założeniu, że dostarczone są wymagane*

środki zewnętrzne [197]. Gotowość charakteryzuje zatem zdolność do terminowego podejmowania i pomyślnej realizacji zadań. Zgodnie ze schematem (rys. 1.4) zdolność obiektu do przebywania w stanie operacyjnym, jak również do rozpoczęcia realizacji zadania w losowej chwili nadejścia zgłoszenia jest funkcją [188]:

- 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.

Z kolei pojęcie gotowości systemu wsparcia logistycznego obejmuje problem niezawodnego funkcjonowania znacznej liczby elementów logistycznych, które przyczyniają się do osiągnięcia gotowości systemu technicznego. W związku z tym przyjęto, że gotowość systemu logistycznego oznacza *dostępność wszelkich niezbędnych zasobów w procesie eksploatacji systemu technicznego* [63, 143]. Jednocześnie zasoby, w ujęciu ogólnym definiowane są jako: wszelkie elementy (w tym urządzenia, maszyny, części wymienne, wyposażenie dodatkowe, wspierające i kontrolno-pomiarowe), niezbędne do: 1) wyposażenia, 2) funkcjonowania, 3) utrzymania i wsparcia procesów podstawowych systemu technicznego (patrz rys. 1.2).



Rys. 1.4. Wpływ podstawowych charakterystyk na gotowość systemu technicznego

Opracowanie własne na podstawie [16, 59, 143]

Podsumowując, wieloaspektowość i różnorodność zagadnień eksploatacyjnych i niezawodnościowych sprawiła, że w literaturze z tego zakresu można znaleźć bardzo wiele

prac, omawiających zagadnienie funkcjonowania systemów technicznych, które przede wszystkim dotyczą modelowania [262]:

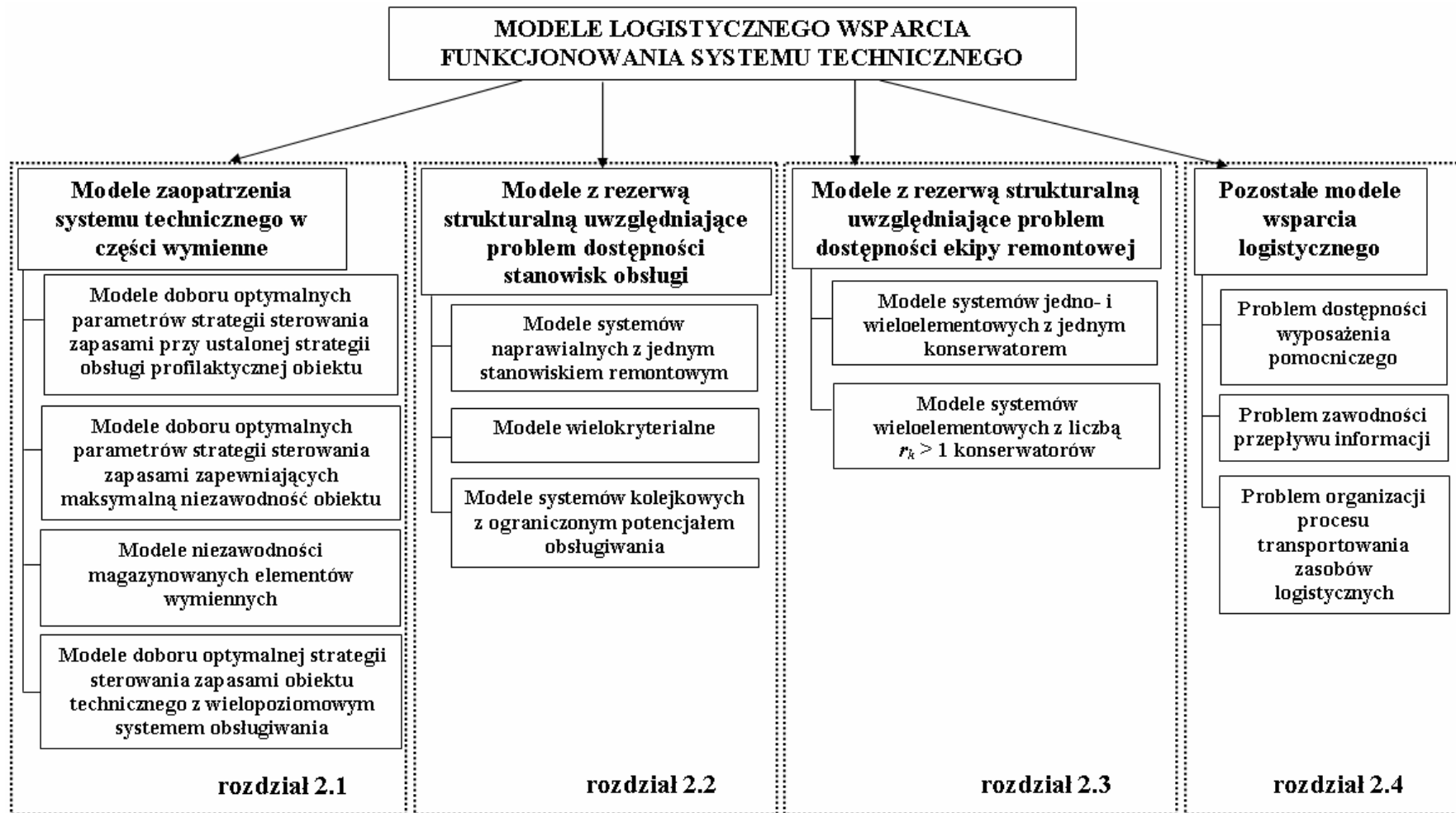
- obiektów:
 - pojedynczych/grupowych,
 - częściowych (np. części wymienne) i nietypowych (np. informacja, energia),
- systemów i podsystemów:
 - prostych/złożonych,
 - naprawialnych/nienaprawialnych,
 - nadmiarowych/nienadmiarowych,
 - diagnozowalnych/niediagnozowalnych,
- procesów:
 - deterministycznych,
 - losowych,
 - stochastycznych.

Jednakże, analiza funkcjonowania systemu technicznego nie może być przeprowadzona bez uwzględnienia wpływu niezawodności systemu logistycznego na realizację jego procesów podstawowych. Taka sytuacja wymaga zaprojektowania systemu wsparcia logistycznego z uwzględnieniem zawodności jego poszczególnych elementów. Z kolei uwzględnienie stanu zawodności systemu wspierającego wiąże się z koniecznością:

- przeanalizowania zdolności tego systemu do realizacji określonych zadań w zadanych warunkach i określonym czasie (przedziale czasu),
- ustalenia podstawowych wzajemnych relacji pomiędzy systemem logistycznym a systemem technicznym.

Znane w literaturze, podstawowe modele wsparcia logistycznego w obszarze funkcjonowania systemu technicznego, analizujące problem wpływu zawodności elementów wsparcia logistycznego na proces operacyjny, zostały przedstawione na rysunku 1.5.

Omówione w danym rozdziale, podstawowe definicje z zakresu niezawodności logistyki funkcjonowania systemu technicznego stanowią podstawę teoretyczną opracowanego modelu nadsystemu z rezerwą czasową.



Rys. 1.5. Podstawowa klasyfikacja modeli wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego

2. MODELE LOGISTYCZNEGO WSPARCIA FUNKCJONOWANIA SYSTEMU TECHNICZNEGO

Każdy rzeczywisty system ulega procesowi degradacji w czasie, spowodowanemu poprzez osiągnięty wiek lub związanemu bezpośrednio z realizowanym procesem eksploatacji. W rezultacie każdy system uszkadza się w czasie, przez co nie jest w stanie realizować swoich podstawowych funkcji i zadań. W literaturze teorii niezawodności obecnie znane są dwie podstawowe metody podnoszenia niezawodności obiektu/systemu:

- dzięki doborowi odpowiedniej strategii obsługiwanego, np. [18],
- poprzez tzw. rezerwowanie (strukturalne, czasowe, itd.), np. [262].

Na przestrzeni ostatnich czterdziestu lat opracowano wiele koncepcji i modeli w obszarze zagadnienia obsługiwanego obiektów technicznych, których głównym celem jest właściwe harmonogramowanie zadań obsługowych przy ustalonej optymalnej strategii odnowy, zdefiniowanej dla założonych kryteriów ekonomicznych i/lub niezawodnościowych. Jednocześnie właściwa realizacja procesów obsługiwanego, przy ustalonej polityce przeglądów, możliwa jest dzięki zasobom logistycznym, dostarczanym w odpowiednim miejscu i czasie przez system wsparcia logistycznego.

W dostępnej literaturze można wyróżnić dwa podstawowe typy modeli uwzględniających problem utrzymania systemu technicznego w stanie zdadności:

- klasyczne modele obsługiwanego obiektów technicznych – obejmujące problem doboru odpowiedniej polityki obsługiwanego,
- modele wsparcia logistycznego – uwzględniające zagadnienie projektowania procesów logistycznych, mających na celu zapewnienie niezbędnych zasobów w procesie obsługiwanego obiektu technicznego.

Każda z przedstawionych grup modeli odznacza się odmiennym podejściem do omawianego problemu.

Obecnie w eksploatacji systemów technicznych można zdefiniować dwie podstawowe strategie obsługiwanego obiektów technicznych [18]:

- obsługiwane korekcyjne *CM* (*Corrective Maintenance*),
- obsługiwane profilaktyczne *PM* (*Preventive Maintenance*).

Strategia obsługiwanego korekcyjnego jest najprostszą strategią remontową, polegającą na realizacji zadań nieplanowanych, wykonywanych w celu przywrócenia zdadności systemowi po jego uszkodzeniu poprzez przeprowadzenie operacji naprawy lub wymiany elementów

niezdatnych. Wykorzystując tego typu politykę obsługiwanego obiektu nie można mówić o jakiegokolwiek optymalizacji jej parametrów (np. [78, 99, 100]).

W przypadku, gdy straty związane z wystąpieniem uszkodzenia obiektu są wielokrotnie wyższe niż wartość obiektu uszkodzonego, przeprowadzanie tylko wymian korekcyjnych jest przeważnie nieracjonalne. W tego typu sytuacjach wykorzystuje się strategię wymian profilaktycznych w celu zmniejszenia częstości występowania uszkodzeń obiektów, a tym samym zmniejszenia kosztów ich eksploatacji. Obsługiwanie profilaktyczne obejmuje planowe i okresowe naprawy/wymiany urządzeń [18].

W dostępnej literaturze z zakresu projektowania modeli optymalnej strategii obsługiwanego obiektów technicznych można wyróżnić wiele klasyfikacji danych modeli, m.in. ze względu na [39, 196, 210, 246, 258]:

- dostępność informacji,
- typ systemu (jedno-/wieloelementowy),
- występujące zależności pomiędzy stanami i elementami systemu,
- kryteria optymalizacji,
- narzędzia modelowania,
- planowany horyzont czasowy,
- typ obsługi (pełna/niepełna).

Istniejąca klasyfikacja modeli doboru optymalnej polityki remontowej obiektów technicznych została szczegółowo przedstawiona w szeregu prac, obejmujących przegląd dostępnej literatury z badanego obszaru naukowego. Pierskalla i Voelker [196] omówili przegląd podstawowych modeli optymalnej strategii obsługiwanego obiektów technicznych, które zostały opublikowane w latach 1965 – 1976. W przeglądzie tym autorzy przedstawili klasyfikację modeli wg ich typu, dzięki czemu istnieje łatwa możliwość definicji właściwego modelu w zależności od problemu występującego w obszarze obsługiwanego obiektów. W badanym okresie, w literaturze polskiej ukazały się prace: obejmujące historię rozwoju teorii odnowy wraz z przeglądem najważniejszych wydarzeń, przedstawiające charakterystykę podstawowych definicji z zakresu teorii odnowy (np. [225]), jak również omawiające podstawowe strategie odnowy obiektów technicznych (np. [203]).

W kolejnych przeglądach literatury z zakresu teorii odnowy, Sherif [216] przedstawił klasyfikację modeli optymalizacyjnych, obejmującą: modele kontroli stanu obiektu (*inspection maintenance*) oraz modele obsługiwanego obiektów technicznych (*maintenance models*), z wyróżnieniem modeli deterministycznych i stochastycznych, natomiast Nakagawa [172] omówił podstawowe problemy strategii obsługiwanego dla systemów dyskretnych.

W roku 1986, w swej pracy Thomas [237] przedstawił klasyfikację modeli optymalnej strategii obsługiwanego obiektów technicznych dla systemów wieloelementowych, wyróżniając przede wszystkim modele oparte na zależnościach pomiędzy elementami systemu w sensie:

- ekonomicznym (*economic dependence*),
- strukturalnym (*structural dependence*),
- probabilistycznym (*failure dependence*).

Kolejne dwie prace, przedstawione przez autorów Valdez-Flores i Feldman [246] oraz zespół Cho i Parlar [39] są kontynuacją przeglądu [196]. Autorzy przedstawili klasyfikację modeli optymalnej strategii napraw/wymian oraz modeli kontroli stanu systemów jednoelementowych [246] oraz wieloelementowych [39], podlegających stochastycznemu procesowi degradacji w czasie.

W kolejnym przeglądzie literatury omawianego obszaru badawczego [195], autorzy przedstawili klasyfikację analizowanych modeli według kryterium stopnia przywrócenia możliwości operacyjnych uszkodzonemu systemowi poprzez proces odnowy. Wspomniana praca obejmuje opis podstawowych modeli doboru optymalnej strategii remontowej z tzw. pełną i niepełną odnową (*perfect/imperfect maintenance*) dla systemów jedno- i wieloelementowych, które zostały opublikowane po roku 1985.

Odmienne podejście do problemu zaproponowano w [46, 210], gdzie przedstawiona została analiza podstawowych modeli doboru optymalnej strategii obsługiwanego obiektu technicznego pod kątem możliwości ich zastosowania w praktyce, jak również omówione zostały podstawowe narzędzia ich aplikacji.

Na szczególną uwagę zasługuje przegląd literatury przedstawiony przez zespół Wang i Pham [259], obejmujący klasyfikację podstawowych modeli doboru strategii odnowy w obszarze niezawodności, gotowości oraz obsługiwanego, wykorzystujących metody Monte Carlo, jako podstawowe narzędzie modelowania.

W 2002 roku opracowano kolejny przegląd literaturowy obejmujący klasyfikację modeli obsługiwanego systemów jedno- i wieloelementowych, podlegających procesowi degradacji w czasie [258]. Omówiony został przegląd klasycznych strategii remontowych wraz z ich późniejszymi modyfikacjami.

W ostatnim czasie, zespół Nicolai i Dekker [176, 177] przedstawili klasyfikację modeli doboru optymalnej strategii odnowy dla systemów wieloelementowych. W przeglądach tych skupiono się na uzupełnieniu i podsumowaniu opracowanych klasyfikacji, przedstawionych w [39], [46], oraz [258].

Omówione prace obejmują przegląd podstawowych modeli doboru optymalnej strategii obsługi systemów jedno- i wieloelementowych, które zostały opublikowane na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat. Obecnie, ze względu na rosnące wymagania, co do niezawodności i efektywności funkcjonowania systemów technicznych, problem ustalenia optymalnego harmonogramu obsługi zyskał na znaczeniu. Jednocześnie różnorodność i wieloaspektowość prac analizujących problem utrzymania systemu technicznego w stanie operacyjnym potwierdza jedynie złożoność danego zagadnienia. Przykładem może być schemat, przedstawiony na rysunku 2.1, który przedstawia podstawowe czynniki, które mają wpływ na zdefiniowanie optymalnej polityki obsługi określonego obiektu technicznego.



Rys. 2.1. Podstawowe czynniki wpływające na dobór optymalnej polityki remontowej

Opracowanie własne na podstawie [258]

Studia literaturowe badanego obszaru naukowego potwierdzają, że istnieje wiele możliwości klasyfikacji modeli obsługi obiektów technicznych. Jednocześnie, w literaturze można znaleźć tysiące różnych modeli doboru optymalnej strategii obsługi. Obecnie można jednak wyróżnić tylko kilka podstawowych typów strategii odnowy, które pozwalają na uporządkowanie istniejącej literatury teorii odnowy w obrębie czterech podstawowych grup [39, 246, 258]:

- modele kontroli stanu obiektu (*inspection maintenance models*),
- modele obsługi według stanu (*condition-based maintenance models*),
- modele wymiany profilaktycznej systemów jedno- i wieloelementowych (*preventive maintenance models for single-unit and multi-unit systems*),

- modele zarządzania przepływem informacji (*maintenance information management*).

Pierwsza grupa obejmuje modele, w których strategia odnowy systemu oparta jest na kontroli określonych parametrów modelu. Problemem obliczeniowym w tego typu strategiach jest dobór optymalnych chwil kontroli stanu obiektu ze względu na określone kryterium, np. ekonomiczne (np. [2]). Przegląd modeli kontroli stanu systemu można znaleźć m.in. w [39, 210, 216, 246].

Natomiast obsługa według stanu polega na przewidywaniu i wczesnym zapobieganiu awariom poprzez wykorzystanie działań diagnostycznych, polegających na obserwacji parametrów definiujących stan techniczny obiektu [18, 64].

Na szczególną uwagę zasługuje zagadnienie doboru optymalnej strategii obsługi dla złożonych systemów wieloelementowych. Zależności występujące pomiędzy elementami takich systemów znacznie komplikują proces modelowania i optymalizacji procesów odnowy. Z drugiej strony, wykorzystanie danych zależności może z kolei pozwolić na obniżenie kosztów obsługi poprzez tzw. obsługę grupową [176].

Ostatnia grupa modeli obejmuje prace, w których zajęto się opracowaniem właściwej organizacji zarządzania przepływem informacji w procesie obsługi, niezbędnej do efektywnego utrzymania systemu w stanie gotowości [210].

Opracowanie szczegółowego przeglądu literatury z obszaru modelowania optymalnej strategii obsługi systemów jedno- i wieloelementowych znacznie wykracza poza ramy niniejszego opracowania. Dlatego też, w pracy [182] przedstawiono analizę aktualnego stanu wiedzy z zakresu projektowania procesów obsługi systemów jedno- i wieloelementowych. Pozwoliło to na opracowanie następujących wniosków:

- podstawowe metody matematyczne, wykorzystywane w procesie opracowania harmonogramu obsługi obiektów technicznych, obejmują metody probabilistyczne, procesy odnowy, czy teorię procesów Markowa. Jednakże, w wielu sytuacjach nie można opisać zależności pomiędzy parametrami wejścia i wyjścia systemu w sposób analityczny. Dlatego też, można wyróżnić w dostępnej literaturze wiele modeli, w których wykorzystano metody programowania liniowego i nieliniowego, programowania dynamicznego, procesy symulacyjne, czy metody heurystyczne;
- strategie obsługi profilaktycznej, w swej klasycznej postaci, nie są praktycznie wykorzystywane w rzeczywistości – pojawiło się wiele ich modyfikacji, które pozwalają na dokładniejsze odzwierciedlenie rzeczywistych procesów funkcjonowania systemów technicznych;

- większość przedstawionych modeli bazuje na założeniach upraszczających, np. co do zgodności zachowania się systemu z rozkładem wykładniczym, założenie o nieskończonym horyzoncie planowania, pomijalności czasu obsługi, czy warunkach pełnej odnowy, co również ogranicza zakres możliwości ich zastosowania w praktyce;
- analizowane modele bazują na założeniu, że z chwilą uszkodzenia się systemu wszelkie zasoby, niezbędne w procesie jego odnowy są natychmiast dostępne do wykorzystania. Ogranicza to możliwość zastosowania danych modeli do dwóch podstawowych przypadków: modelowania obsługi systemów o komponentach standardowych, które mogą być praktycznie natychmiast dostarczone przez dostawcę, lub do systemów, których elementy są na tyle tanie, że opłacalne jest magazynowanie znacznej ich ilości.

W procesie funkcjonowania rzeczywistych systemów:

- liczba dostępnych w chwili uszkodzenia części wymiennych zwykle jest ograniczona;
- czas dostawy uzupełniającej nie może być pominięty;
- nie ma wystarczającej liczby ekip remontowych, aby w każdej chwili można było realizować operacje odnowy wszystkich elementów, które tego wymagają;
- wyposażenie wspierające nie zawsze jest dostępne (zdatne).

Uwzględnienie zagadnienia niegotowości zasobów wspierających procesy odnowy obiektu technicznego wymaga więc, aby problemy doboru optymalnej strategii odnowy oraz ustalenia polityki zarządzania zapasami były rozpatrywane wspólnie.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono przegląd podstawowych modeli wsparcia logistycznego, których celem jest zapewnienie podstawowych zasobów w procesie odnowy systemu technicznego, ze szczególnym uwzględnieniem modeli zaopatrzenia systemu technicznego w części wymienne.

2.1. Modele zaopatrzenia systemu technicznego w części wymienne

Teoria sterowania zapasami zajmuje się ilościową analizą i syntezą systemów zaopatrzenia, celem opracowania racjonalnego kompromisu pomiędzy kosztami logistycznymi a niezawodnością procesu zabezpieczenia potrzeb materiałowych [134]. W sektorze komercyjnym zainteresowanie problemem optymalnego zarządzania zapasami notowane jest w literaturze już od lat 60. XX w. Zauważono, że zarówno nadmiar zapasów, jak i też ich niedostateczna ilość prowadzą do niepożądanego wzrostu kosztów funkcjonowania systemu produkcyjnego. Dlatego też w badanym okresie przede wszystkim skupiono się na zagadnieniu określenia modelu procesu zapotrzebowania na części wymienne. W literaturze pojawił się szereg prac obejmujących m.in.: metody kształtowania poziomu zapasów dla zdeterminowanego lub stochastycznego strumienia potrzeb (np. [71]).

Jednakże, oprócz zagadnienia doboru optymalnego poziomu zapasów z wykorzystaniem metod prognozowania, istotny jest także problem właściwej organizacji systemu zaopatrzenia, od której zależy czas dostawy elementu w chwili i miejscu wystąpienia potrzeby jego użycia. Jeden z pierwszych przeglądów podstawowych klasycznych metod sterowania zapasami został przedstawiony w [171], gdzie omówione zostały modele optymalizacyjne:

- z okresową kontrolą poziomu zapasów (*periodic review inventory models*),
- z ciągłą kontrolą stanu zapasów (*continuous review inventory models*).

W klasycznych modelach sterowania zapasami zagadnienie optymalizacji przede wszystkim dotyczy wyznaczenia optymalnych parametrów wybranej strategii (np. wielkość zamówienia, okres między zamówieniami) według kryterium minimalnych kosztów zapasów systemu (np. [37, 220]).

Jednakże zagadnienie zarządzania zapasami części wymiennych, niezbędnych w procesie obsługiwanego obiektu technicznego różni się istotnie od klasycznej teorii zapasów. Części wymienne mają na celu wsparcie planowanych jak i nieplanowanych procesów obsługiwanego systemu, co w konsekwencji przekłada się na konieczność rozwiązywania innych problemów w analizowanym obszarze naukowym.

Obecnie w literaturze można znaleźć szereg prac, które zajmują się problemem klasyfikacji modeli optymalnej strategii sterowania zapasami obiektów technicznych oraz przedstawiają przegląd podstawowej literatury z badanego obszaru. Pierwszą z prac, podsumowujących dorobek literaturowy w obszarze teorii zapasów obiektów technicznych, podlegających procesom obsługiwanego, jest [196]. W pracy tej oprócz ogólnej klasyfikacji modeli doboru optymalnej strategii remontowej, omówiono podstawowe modele sterowania zapasami z okresu 1965-1976. W kolejnej pracy, autorzy Cho i Parlar [39] przedstawili

podstawową klasyfikację modeli optymalizacyjnych ze względu na kryterium naprawialności zaopatrywanego systemu, wyróżniając:

- modele sterowania zapasami dla elementów nienaprawialnych (*irreparable-item inventory models*),
- modele sterowania zapasami dla elementów naprawialnych (*reparable-item inventory models*):
 - z jednopoziomowym systemem obsługiwanym (*single-echelon case*),
 - z wielopoziomowym systemem obsługiwanym (*multi-echelon case*).

Zagadnienie sterowania zapasami obiektów nienaprawialnych przede wszystkim ograniczone zostało do przypadków modelowania z wykorzystaniem procesów Markowa (np. [230, 273]). Pierwsze prace w obszarze modelowania optymalnej strategii sterowania zapasami elementów naprawialnych przede wszystkim obejmowały zagadnienie organizacji wsparcia logistycznego systemów wojskowych (np. elementy wymienne statków powietrznych, pojazdów transportu lądowego, komponenty elektroniczne). Funkcja celu omawianych modeli przede wszystkim bazuje na uwzględnieniu kryterium maksymalnej gotowości systemu, minimalnego okresu braku zapasów, czy też minimalizacji ogólnych kosztów zapasów. Na szczególną uwagę zasługuje praca [94], w której przedstawiono klasyfikację modeli sterowania zapasami systemów naprawialnych według kryteriów: typu systemu oraz dokładności uzyskanego rozwiązania.

Podstawowe problemy w obszarze sterowania zapasami systemów naprawialnych przede wszystkim obejmują:

- dobór optymalnych parametrów procesu zaopatrzenia (np. [53, 153, 248]),
- problem alokacji zapasów (np. [33, 247]),
- optymalizację poziomu obsługi przy minimalnych kosztach zapasów (np. [147]).

Przegląd literatury badanego obszaru sterowania zaopatrzeniem części wymiennych obiektu technicznego przedstawia również praca [126], w której omówiono podstawowe problemy modelowania optymalnej strategii zarządzania zapasami z uwzględnieniem m.in. wpływu polityki remontowej, zagadnienia alokacji zapasów, czy procesu technologicznego starzenia się wspieranego obiektu technicznego.

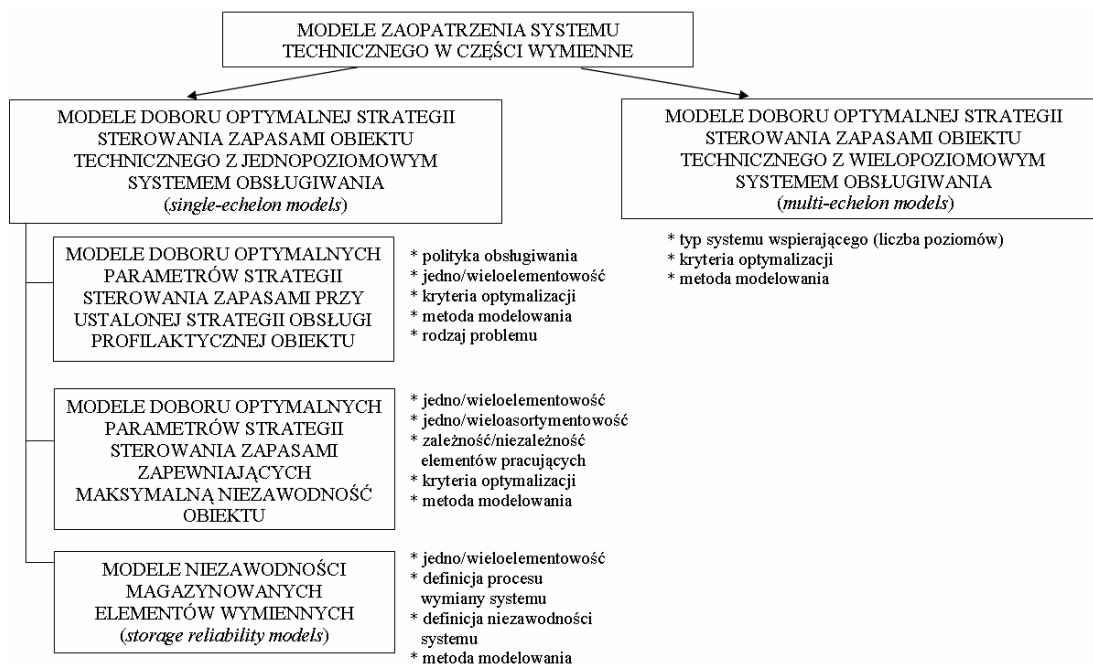
Na szczególne zainteresowanie zasługuje również praca [118], w której przedstawiono przegląd dostępnej literatury z zakresu modelowania zaopatrzenia systemu w elementy wymienne oraz omówiono podstawowe modele optymalnej struktury niezawodnościowej systemu technicznego.

Przedstawiono podstawy teoretyczne oraz dostępne w literaturze prace, obejmujące podstawowe klasyfikacje modeli optymalnej strategii sterowania zapasami obiektu technicznego podlegającego procesowi obsługiwan. Jednakże, specyfika zagadnienia skłoniła autora, w oparciu o podstawowe czynniki, wpływające na dobór optymalnej strategii zarządzania zapasami (rys. 2.1.1), do zaproponowania odmiennej klasyfikacji modeli sterowania zapasami, ze względu na kryterium postawionego problemu badawczego (rys. 2.1.2).



Rys. 2.1.1. Podstawowe czynniki wpływające na dobór optymalnej strategii zarządzania zapasami obiektu podlegającemu procesom odnowy profilaktycznej

Źródło: opracowanie własne na podstawie [55, 126]

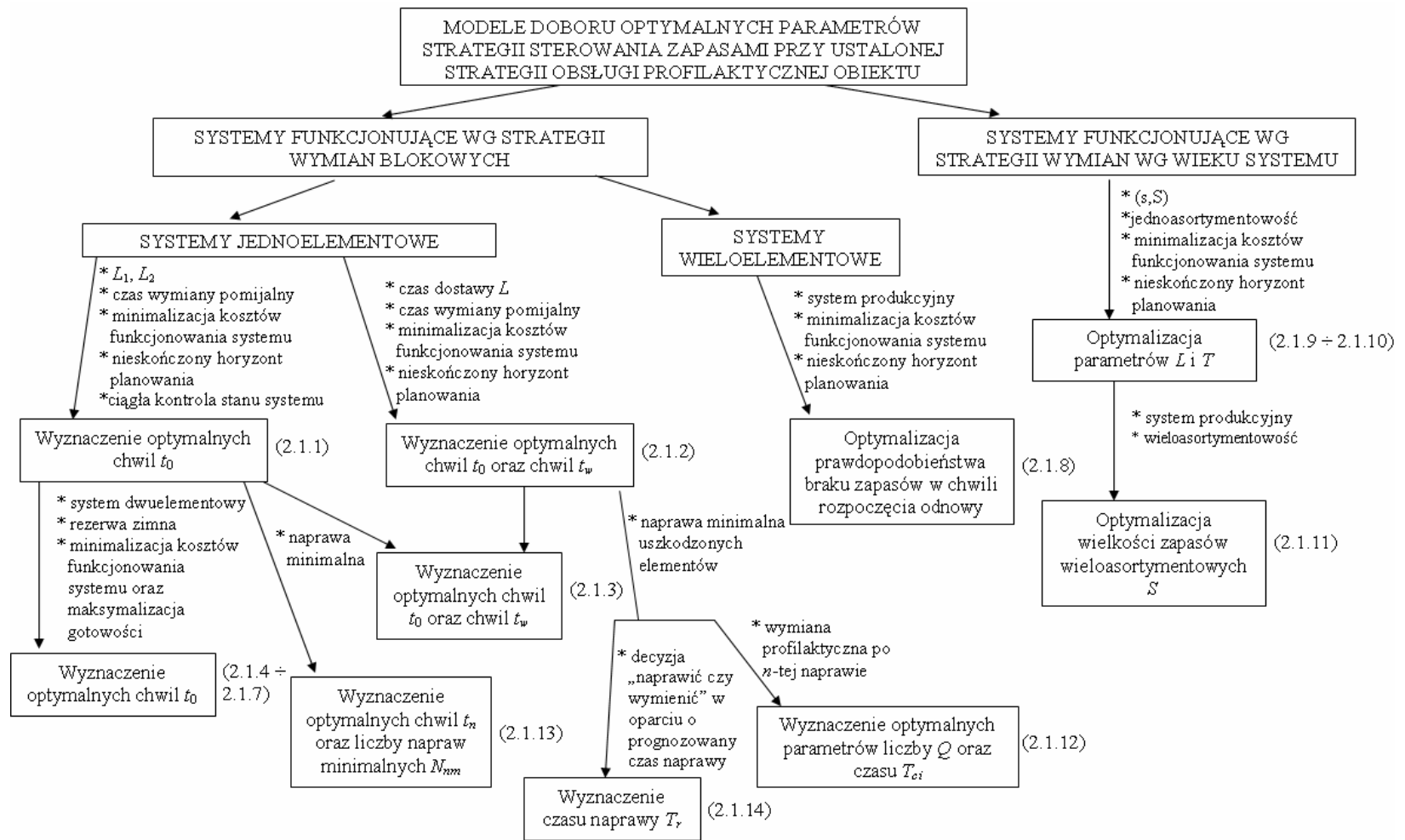


Rys. 2.1.2. Klasyfikacja modeli sterowania zapasami obiektu technicznego podlegającego procesowi obsługiwan

Pierwsza grupa modeli, przedstawionych na rys. 2.1.2, obejmuje prace, które mają na celu optymalizację parametrów strategii sterowania zapasami, przy ustalonej polityce obsługiwanego badanego systemu technicznego. Klasyfikacja danych modeli została przedstawiona na rysunku 2.1.3.

Naturalną konsekwencją eksploatacji obiektu technicznego jest proces jego degradacji. Przywrócenie zdolności elementu uszkodzonego wymaga dostarczenia niezbędnych zasobów (części wymiennych) we właściwym miejscu i czasie przy uwzględnieniu losowości zapotrzebowania pomiędzy kolejnymi dostawami, które z kolei uzależnione jest od przyjętej strategii odnowy. Analiza procesu sterowania zapasami obiektu technicznego przy ustalonej polityce obsługi profilaktycznej bazuje przede wszystkim na wykorzystaniu teorii odnowy.

Podstawowe kryteria optymalizacji parametrów sterowania zapasami obejmują: maksymalizację wskaźnika gotowości systemu (np. [62]), minimalizację funkcji oczekiwanych kosztów obsługiwanego i zapasów (np. [232]), lub minimalizację funkcji ryzyka braku zapasów (np. [105]).

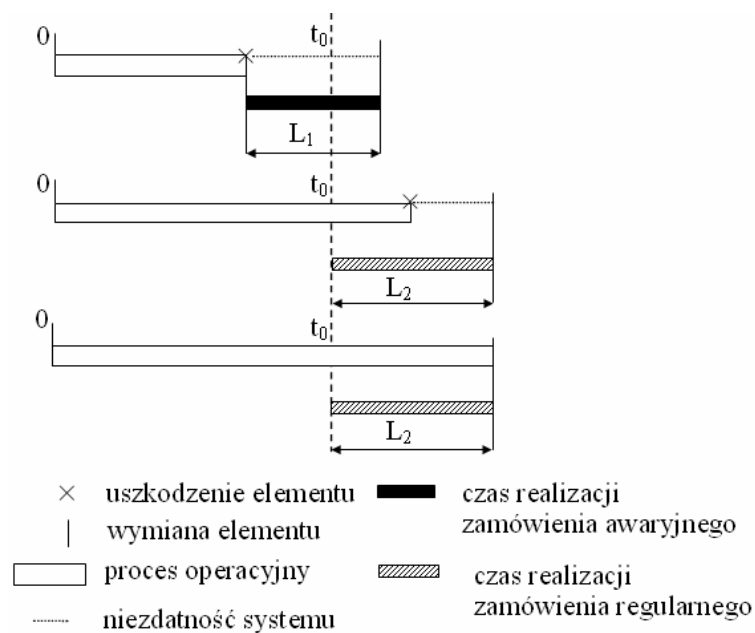


Rys. 2.1.3. Modele doboru optymalnych parametrów strategii sterowania zapasami, gdy strategia obsługi profilaktycznej obiektu jest zdefiniowana

Uwzględnienie możliwości pojawienia się okresowego braku zapasów w systemie technicznym wymusiło konieczność wzięcia pod uwagę tzw. czasu dostawy części wymiennych (*lead time*) w procesie modelowania optymalnej polityki funkcjonowania obiektu. Pierwsze modele, uwzględniające tego typu opóźnienie w procesie realizacji operacji obsługiwanego obiektu technicznego dotyczyły systemów jednoelementowych (np. [232, 238]).

Podstawowe modele w badanym obszarze tworzyły koncepcję obsługiwanego systemu w oparciu o ustalone chwile (punkty) zamawiania części wymiennych. Przykładem może być praca [232]. W analizowanym modelu założono, że element pracujący podlega jedynie operacjom wymiany, jeżeli w systemie znajduje się część wymienna. Zamówienie na element zapasowy jest generowane w chwili t_0 , po czym realizacja dostawy trwa okres L_2 (zamówienie regularne). Z chwilą dostawy części zapasowej element pracujący podlega wymianie bez względu na jego stan niezawodności.

Jeżeli obiekt uszkodzi się przed chwilą t_0 , zamówienie awaryjne jest natychmiast wysyłane. Po dostawie, trwającej czas L_1 , następuje wymiana elementu niezdatnego – cykl rozpoczyna się od początku (rys. 2.1.4).



Rys. 2.1.4. Realizacja procesu eksploatacji obiektu w jednym cyklu jego wymiany [232]

Przy założeniu:

- nieskończonego horyzontu planowania,
- pomijalności czasu wymiany elementu,
- realizacji ciągłej obserwacji stanu systemu,

funkcja celu modelu obejmuje wyznaczenie optymalnych chwil zamówienia części wymiennych (t_0), które pozwolą na uzyskanie minimum funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu w jednostce czasu, opisanej formułą:

$$C_s(t_0) = \frac{c_m \int_0^{t_0} R(t) dt + c_{p1} F(t_0) + c_{p2} R(t_0) + c_{dw} \left[(L_1 - L_2) F(t_0) + \int_{t_0}^{t_0+L_2} F(t) dt \right]}{(L_1 - L_2) F(t_0) + L_2 + \int_0^{t_0} R(t) dt} \quad (2.1.1)$$

gdzie:

$C_s(t_0)$ – funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu obejmująca koszty jego obsługi oraz koszty zapasów

c_{p1} – jednostkowy koszt zakupu części wymiennych w zamówieniu awaryjnym w chwili t

c_{p2} – jednostkowy koszt zakupu części wymiennych w zamówieniu regularnym w chwili t

c_{dw} – jednostkowy koszt niezdatności systemu przypadający na jednostkę czasu

$L_1(L_2)$ – losowy czas realizacji zamówienia awaryjnego (regularnego)

Modyfikacja przedstawionego modelu funkcjonowania systemu jednoelementowego (polityki zamawiania) została przedstawiona m.in. w [238]. W modelu tym wprowadzono dodatkowe założenie: wymiana elementu pracującego następuje w jednej z dwóch sytuacji:

- nastąpi uszkodzenie obiektu,
- nadejdzie chwila t_w , rozpoczęcia procesu odnowy profilaktycznej (rys. 2.1.5).

Model ma na celu definicję wartości optymalnych parametrów t_0 oraz t_w , które minimalizują oczekiwane koszty zapasów w jednostce czasu, opisane funkcją:

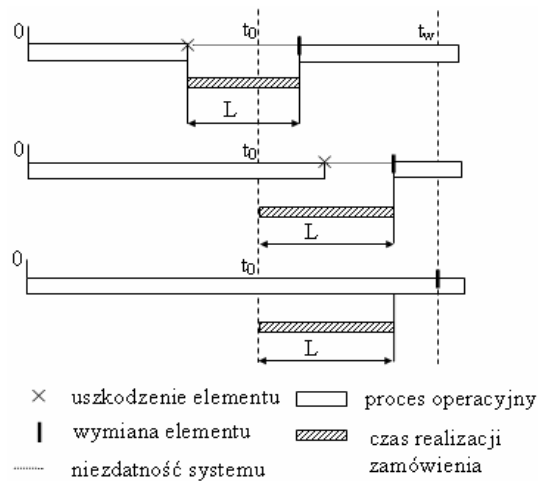
$$C_z(t_0, t_w) = \frac{c_{p1} F(t_0) + c_{p2} R(t_0) + c_{dw} \int_{t_0}^{t_0+L} F(t) dt + c_h \int_{t_0}^{t_w} R(t) dt}{\int_0^{t_w} R(t) dt + \int_{t_0}^{t_0+L} F(t) dt} \quad (2.1.2)$$

gdzie:

$C_z(t_0, t_w)$ – funkcja oczekiwanych kosztów zapasów w jednostce czasu

c_h – jednostkowy koszt utrzymania części wymiennej w jednostce czasu

L – losowy czas realizacji dostawy



Rys. 2.1.5. Realizacja procesu eksploatacji obiektu w jednym cyklu jego wymiany

Źródło: opracowanie własne na podstawie [238]

Modyfikacja modelu, łącząca w sobie zarówno założenia modelu [232], jak i [238], została przedstawiona w pracy [61]. Proces obsługiwanego systemu jednoelementowego został zorganizowany następująco: w chwili t_0 generowane jest zamówienie regularne na część wymienną, którego realizacja trwa okres L_2 . Dostarczony element jest składowany do chwili uszkodzenia się elementu lub do chwili podjęcia realizacji operacji odnowy profilaktycznej, w zależności która z tych sytuacji nastąpi wcześniej.

Jednocześnie, jeżeli element pracujący uszkodzi się przed chwilą t_0 , generowane jest zamówienie awaryjne, którego realizacja trwa okres L_1 . Schemat przedstawiający podstawową konfigurację omawianego modelu został przedstawiony na rysunku 2.1.6.

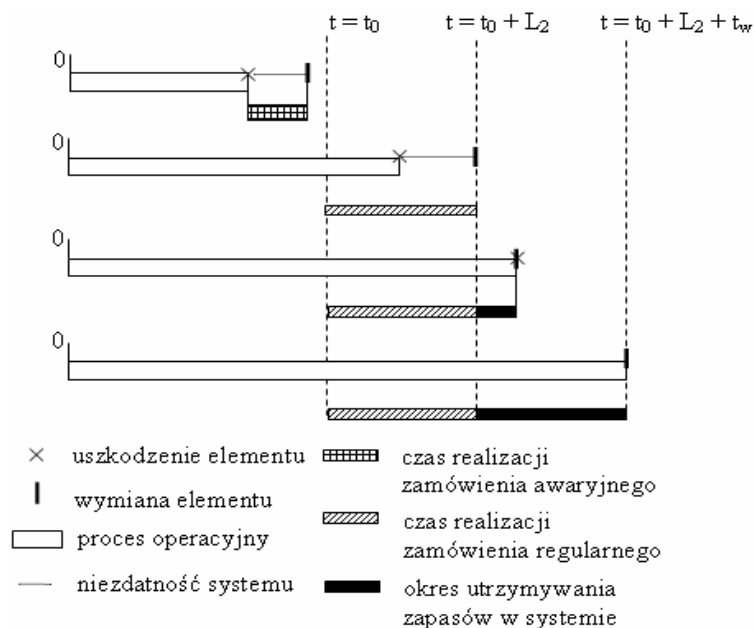
Funkcja oczekiwanych kosztów zapasów w jednostce czasu, pozwalająca na wyznaczenie optymalnych chwil – zamawiania części wymiennych (t_0) oraz wymiany obiektu technicznego (t_w):

$$\begin{aligned}
 C_z(t_0, t_w) = & \frac{c_{sp} \left\{ \int_0^{\infty} \int_0^{t_0} L_1 dF(t) dE_1(L_1) + \int_0^{\infty} \int_{t_0}^{t_0+L_2} (t_0 + L_2 - t) dF(t) dE_2(L_2) \right\} +}{\int_0^{\infty} \int_0^{t_0} (t + L_1) dF(t) dE_1(L_1) + \int_0^{\infty} \int_{t_0}^{t_0+L_2} (t_0 + L_2) dF(t) dE_2(L_2) +} \\
 & + c_{p1} F(t_0) + c_{p2} R(t_0) + c_h \int_0^{\infty} \int_{t_0+L_2}^{t_0+L_2+t_w} (t - t_0 - L_2) dF(t) dE_2(L_2) + c_h \int_0^{\infty} \int_{t_0+L_2+t_w}^{\infty} t_w dF(t) dE_2(L_2) \\
 & \frac{+ \int_0^{\infty} \int_{t_0+L_2}^{t_0+L_2+t_w} t dF(t) dE_2(L_2) + \int_0^{\infty} \int_{t_0+L_2+t_w}^{\infty} (t_0 + L_2 + t_w) dF(t) dE_2(L_2)}{
 \end{aligned} \tag{2.1.3}$$

gdzie:

c_{sp} – jednostkowy koszt braku zapasów w jednostce czasu

$E_i(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu dostawy L_i ($i = 1, 2$)



Rys. 2.1.6. Konfiguracja procesu eksploatacji systemu [61]

Rozwinięcie problemu doboru optymalnych parametrów procesu zamawiania w oparciu o planowane i nieplanowane obsługiwane wspieranego obiektu, zostało przedstawione w pracy [62], gdzie rozważono model funkcjonowania systemu złożonego z dwóch niejednakowych obiektów (rezerwa zimna), przy uwzględnieniu:

- losowości procesów uszkodzania się obiektów w czasie,
- losowości procesu realizacji dostawy części wymiennych do systemu.

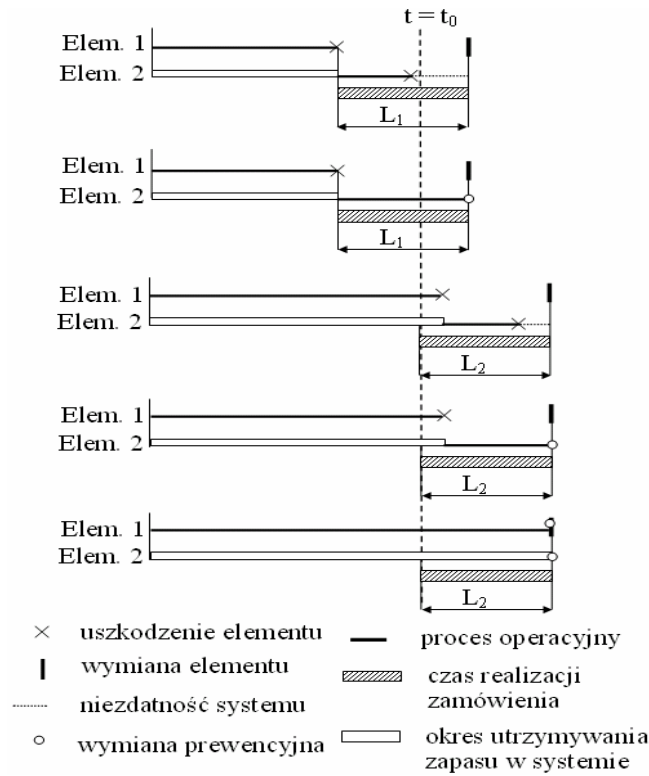
Jeżeli element nr 1 nie uszkodzi się do chwili t_0 , składane jest zamówienie na części wymienne obu pracujących komponentów systemu, którego realizacja trwa okres czasu L_2 . Z chwilą dostawy, oba elementy systemu podlegają wymianie.

Jeżeli element nr 1 uszkodzi się przed chwilą t_0 , jego obowiązki operacyjne przejmuje element nr 2 i składane jest zamówienie awaryjne, obejmujące zakup obu elementów systemu, którego okres realizacji wynosi L_1 .

System uważa się za uszkodzony, jeżeli oba elementy ulegną uszkodzeniu (rys. 2.1.7).

Główne założenia przedstawionego modelu procesu obsługiwania oraz zaopatrzenia systemu są analogiczne do przedstawionych w [232].

Optymalizacja parametru czasu złożenia zamówienia t_0 została opracowana oparciu o minimalizację funkcji oczekiwanych kosztów zapasów oraz maksymalizacji wskaźnika gotowości.



Rys. 2.1.7. Diagram stanów systemu w jednym cyklu wymiany [62]

Oczekiwane koszty zapasów w jednym cyklu wymiany systemu:

$$\begin{aligned}
 C_z(t_0) = & c_{sp} \left\{ \int_0^{t_0} \int_0^{L_1} (L_1 - s) dF_2(s) dF_1(t) + \int_{t_0}^{t_0+L_2} \int_0^{t_0+L_2-t} [(t_0 + L_2) - (t + s)] dF_2(s) dF_1(t) \right\} + \\
 & c_{rz} \left\{ \int_0^{t_0} \int_{L_1}^{\infty} (s - L_1) dF_2(s) dF_1(t) + \int_{t_0}^{t_0+L_2} \int_{t_0+L_2-t}^{\infty} [(t + s) - (t_0 + L_2)] dF_2(s) dF_1(t) + \right. \\
 & \left. + \int_{t_0+L_2}^{\infty} [t - (t_0 + L_2)] dF_1(t) + \int_{t_0+L_2}^{\infty} \int_0^{\infty} s dF_2(s) dF_1(t) \right\} + c_h \left\{ \int_0^{t_0} t dF_1(t) + \int_{t_0}^{t_0+L_2} t dF_1(t) + \right. \\
 & \left. + \int_{t_0+L_2}^{\infty} (t_0 + L_2) dF_1(t) \right\} + c_{p1} F_1(t_0) + c_{p2} R_1(t_0)
 \end{aligned} \tag{2.1.4}$$

gdzie:

c_{rz} – jednostkowy koszt pozostałego okresu zdadności systemu

Oczekiwany czas trwania jednego cyklu wymiany systemu technicznego można opisać formułą:

$$E[T_{c_j}(t_0)] = \int_0^{t_0} (t + L_1) dF_1(t) + \int_{t_0}^{\infty} (t_0 + L_2) dF_1(t) \tag{2.1.5}$$

Funkcję oczekiwanych kosztów zapasów systemu w jednostce czasu można wyznaczyć zgodnie z teorią odnowy za pomocą formuły (5.5.2).

Natomiast wskaźnik gotowości omawianego systemu można wyznaczyć następująco:

$$A(t_0) = \frac{E[T_{oj}(t_0)]}{E[T_{cj}(t_0)]} \quad (2.1.6)$$

gdzie:

$T_{oj}(t_0)$ – losowy czas zdatności operacyjnej systemu w j-tym cyklu wymiany, wyznaczany zgodnie z formułą:

$$\begin{aligned} E[T_{oj}(t_0)] = & \int_0^{t_0} \int_0^{L_1} (t+s) dF_2(s) dF_1(t) + \int_0^{t_0} \int_{L_1}^{\infty} (t+L_1) dF_2(s) dF_1(t) + \\ & + \int_{t_0}^{t_0+L_2} \int_0^{t_0+L_2-t} (t+s) dF_2(s) dF_1(t) + t_0 + \int_{t_0}^{t_0+L_2} \int_{t_0+L_2-t}^{\infty} (t_0+L_2) dF_2(s) dF_1(t) + \\ & + \int_{t_0+L_2}^{\infty} (t_0+L_2) dF_1(t) \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

Szczególnie interesującym przypadkiem zastosowania zagadnienia doboru optymalnej wielkości zapasów z uwzględnieniem strategii odnów profilaktycznych jest organizacja pracy systemu produkcyjnego. Przykładem może być system, w którym funkcjonuje n maszyn produkcyjnych, tworzących strukturę niezawodnościową typu „ k z n ”. Proces eksploatacji obejmuje tzw. planowane przestoje, w trakcie których wszystkie uszkodzone elementy w danym cyklu międzyobsługowym podlegają wymianie na nowe w celu podniesienia ogólnej niezawodności systemu (np. [255]).

W trakcie realizacji operacji odnowy – urządzenia podlegają kontroli stanu zdatności, w wyniku której wszystkie uszkodzone elementy są wymieniane na nowe. Uszkodzone elementy podlegają operacji naprawy w celu ponownego ich wykorzystania w przyszłości jako elementy zapasowe (tzw. system naprawialny ze zwrotami). Brak części wymiennych może wystąpić, gdy zapotrzebowanie przekroczy dostępną liczbę elementów zapasowych dostępnych w magazynie. W takiej sytuacji system ponosi karę finansową lub wysyłane jest zamówienie alarmowe.

Funkcja celu tak zdefiniowanego modelu obejmuje optymalizację prawdopodobieństwa braku zapasów w chwili rozpoczęcia odnowy, która minimalizuje funkcję oczekiwanych kosztów zapasów [255]:

$$\begin{cases} \min C_z = \sum_{k=1}^K c_z S_k \\ P_{spk}(S_1, \dots, S_K) \leq \alpha_{spk} \end{cases} \quad (2.1.8)$$

gdzie:

C_z – funkcja oczekiwanych całkowitych kosztów zakupu i utrzymania zapasów

- c_z – jednostkowe koszty całkowitych kosztów zakupu i utrzymania zapasów w jednostce czasu
- t_k – chwile planowanych przestojów produkcyjnych, $k = 1, 2, \dots, K$
- S_k – planowana liczba zapasów niezbędnych w chwili t_k
- $p_{spk}(S_1, \dots, S_K)$ – prawdopodobieństwo braku zapasów w chwili t_k
- α_{spk} – maksymalny dopuszczalny poziom prawdopodobieństwa braku zapasów w jednym cyklu międzyoperacyjnym

Rozwiązanie analizowanego modelu zostało opracowane przy wykorzystaniu procesów Markowa, uwzględniając:

- warunki pełnej odnowy,
- elementy systemu są jednakowe, opisane identycznymi rozkładami prawdopodobieństwa.

Większość opracowanych modeli doboru optymalnych parametrów funkcjonowania systemów technicznych, obsługiwanych według strategii wymian blokowych, szczególnie tych które zostały opracowane po roku 2000, bazuje na wykorzystaniu procesów symulacji (np. [36, 105, 208]). Podstawowe problemy analizowanych modeli obejmują zarówno optymalizację parametrów związanych z procesem odnowy profilaktycznej (np. chwile realizacji wymiany profilaktycznej), jak i optymalizację podstawowych parametrów procesu zamawiania (np. punkt zamawiania). Problem optymalizacji wielu parametrów jednocześnie powoduje, że nawet w przypadku prostych systemów przedstawienie modelu matematycznego, przy uwzględnieniu losowości realizowanych procesów, jest bardzo skomplikowane.

Warto także zwrócić uwagę na tę grupę obiektów, których obsługa profilaktyczna zależy od wieku systemu. Przykładem modelu, w którym proces zaopatrzenia systemu w elementy wymienne zależy od strategii wymiany okresowej według wieku, jest praca [156], w której autorzy porównali dwie polityki sterowania zapasami (s, S) i ich wpływ na oczekiwane koszty zapasów oraz obsługiwanego systemu.

Zgodnie z polityką (1,1), przy uwzględnieniu strategii obsługiwanego, element pracujący zostanie wymieniony w jednej z dwóch sytuacji: osiągnięcie wieku T , lub oczekiwane koszty odnowy minimalnej C_{nm} będą wyższe od ustalonego progu C_{nm}^{\max} , w zależności która z nich nastąpi pierwsza. Z chwilą, kiedy wystąpi potrzeba wymiany elementu, składane jest zamówienie, którego realizacja trwa określony czas L . W okresie oczekiwania na dostawę części wymiennej system przebywa w stanie niezdatności.

Optimalizacja parametrów czasu dostawy L oraz wieku wymiany prewencyjnej obiektu T obejmuje określenie minimalnych oczekiwanych kosztów obsługiwanania i zapasów, wyznaczonych zgodnie z formułą:

$$C_s(L, T) = \frac{c_d(L) + \left(c_{w1} - c_{w2} + \int_0^{C_{nm}^{kr}} x dF_{cn}(x) (1 - F_{cn}(C_{nm}^{\max}))^{-1} \right) \left[1 - (R(t))^{1-p_{cmm}} \right] + c_{w2}}{L + \int_0^T (R(u))^{1-p_{cmm}} du} \quad (2.1.9)$$

gdzie:

$F_{cw}(x)$ – dystrybucja rozkładu prawdopodobieństwa kosztów naprawy

p_{cmm} – prawdopodobieństwo, że oszacowane koszty odnowy minimalnej przekroczą ustalony poziom C_{nm}^{\max}

$c_d(L)$ – funkcja kosztów realizacji dostawy (zamówienie, koszty utraconych korzyści, itp.)

Tego typu model może zostać wykorzystany w przypadku obiektu, którego funkcjonowanie nie ma priorytetowego znaczenia dla większego systemu lub jego otoczenia, a okres przestoju nie wiąże się z dużymi utrudnieniami w realizacji procesów podstawowych lub kosztami.

Uwzględnienie polityki sterowania zapasami typu (2,2) modyfikuje powyższy model, poprzez uwzględnienie, że w systemie zawsze jest jeden element w zapasie lub w dostawie. Zgodnie z założeniami, z chwilą uszkodzenia się elementu pracującego, istnieją dwie możliwości przywrócenia zdatności systemowi – element zapasowy jest gotowy do wykorzystania i przejmuje realizację zadań podstawowych, lub z powodu realizacji zamówienia (brak dostępnych zapasów), element uszkodzony podlega naprawie minimalnej. Funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania obiektu może być opisana następującą formułą:

$$C_s(L, T) = \frac{\left\{ c_d(L) - \ln R(L) C_{nm}^L + \left[1 - (R(L))^{1-p_{cmm}} (R(T))^{1-p_{cmm}} \right] \left(\int_0^{C_{nm}^{kr}} x dF_{cn}(x) (1 - F_{cn}(C_{nm}^{\max}))^{-1} + c_{w1} - c_{w2} \right) + c_{w2} \right\}}{L + (R(L))^{1-p_{cmm}} \int_L^T (R(\tau))^{1-p_{cmm}} d\tau} \quad (2.1.10)$$

gdzie:

C_{nm}^L – wartość oczekiwana kosztów napraw minimalnych w okresie dostawy L

W przypadku analizy bardziej złożonych problemów (np. [252]) wykorzystywane są m.in. procesy symulacji, czy prognozowanie dynamiczne.

Szereg modeli, wykorzystujących strategię obsługi wg wieku, został także opracowany w celu optymalizacji funkcjonowania systemów produkcyjnych (np. [72, 125]). Przykładem może być praca [226], w której, przy założeniu funkcjonowania procesu obsługi według klasycznej strategii wymiany wg wieku elementu oraz uwzględniając, iż intensywność uszkodzeń systemu wzrasta wraz z wiekiem obiektu, wyznaczono optymalną wielkość zapasów wieloasortymentowych $S = S_1, S_2, \dots, S_r$:

$$\begin{cases} \max \prod_{q=1}^{n_q} p_q(S_q) \\ \sum_{q=1}^{n_q} H_q S_q \leq C_z^{\max} \end{cases} \quad (2.1.11)$$

gdzie:

n_q – liczba typów elementów wymiennych w maszynie produkcyjnej (asortyment)

$p_q(S_q)$ – prawdopodobieństwo, że nie wystąpi okres braku zapasu asortymentu q w przerwie międzyoperacyjnej

S_q – zapas początkowy

C_z^{\max} – maksymalny poziom dopuszczalnych kosztów zapasów

Rozwiązanie tak postawionego problemu uzyskano przy wykorzystaniu programowania dynamicznego.

W rzeczywistych systemach element uszkodzony może być wymieniony lub podlegać operacji naprawy, co z kolei wiąże się z koniecznością oceny:

- kiedy podejmować operację naprawy zamiast wymiany elementu,
- ile elementów wymiennych zamawiać, aby koszty zamówienia oraz koszty utrzymania zapasów nie były wysokie.

Jednym z przykładów, zajmujących się omawianym zagadnieniem jest model przedstawiony w [191]. W pracy przyjęto, że uszkodzenie systemu jest usuwane w procesie odnowy minimalnej. Operacje wymiany profilaktycznej są podejmowane w chwilach t_{ci} , jeżeli poziom zapasów wynosi $(i-1)$. Parametry – wielkość zamówienia (Q) oraz okres między realizacją kolejnych wymian profilaktycznych T_{ci} , są optymalizowane ze względu na minimalizację funkcji oczekiwanych kosztów obsługi i zapasów w jednostce czasu, wyznaczanej zgodnie z formułą:

$$C_s(Q, T_{ci}) = \frac{c_o + c_{wz} Q + c_{nm} \sum_{i=1}^Q H(T_{ci}) + c_h \sum_{i=1}^Q (i-1) T_{ci}}{\sum_{i=1}^Q T_{ci}} \quad (2.1.12)$$

gdzie:

c_o – ustalony jednostkowy koszt zamówienia

c_{wz} – jednostkowy koszt wymiany elementu (włączając koszt zakupu)

i – poziom zapasów w systemie

Omawiany problem obejmujący ustalenie optymalnej chwili zamawiania oraz wymiany elementu jest kontynuowany w wielu późniejszych pracach, m.in. w [219]. W analizowanej pracy autorzy modelu wyznaczyli optymalny punkt zamawiania t_0 oraz optymalną liczbę napraw minimalnych N_{nm} przed przystąpieniem do wymiany profilaktycznej systemu jednoelementowego, przy czym polityka funkcjonowania obiektu technicznego jest analogiczna do przedstawionej w [232].

Zamówienie na element zapasowy jest generowane w chwili n -tego uszkodzenia się obiektu (t_n) i jego realizacja trwa okres L . Jeżeli uszkodzenie wystąpi przed chwilą t_n , system pozostanie w stanie niezdatności do chwili $t_n + L$, w której nastąpi jego odnowa. Jeżeli natomiast uszkodzenie nastąpi po chwili realizacji dostawy elementu wymiennego (k -te uszkodzenie), zostanie ono natychmiast usunięte z systemu. W pozostałych przypadkach realizowane są operacje naprawy minimalnej w okresie $(0, t_k)$.

Po raz kolejny optymalizacja parametrów – punktu złożenia zamówienia oraz liczby napraw minimalnych przed wymianą elementu, została przeprowadzona z uwzględnieniem kryterium oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu:

$$\begin{aligned}
 C_s(t_n, N_{nm}) = & \left\{ (N_{nm} - 1)c_{nm} + c_o + \left(\int_0^{x+L} \int_x^{\infty} f_{t_n, t_k}(x, y) dy dx \right) \left(c_{sp} \int_0^{x+L} \int_x^{\infty} (x + L - y) f_{t_n, t_k}(x, y) dy dx \right) + \right. \\
 & \left. + \left(\int_0^{\infty} \int_{x+L}^{\infty} f_{t_n, t_k}(x, y) dy dx \right) \left(c_h \int_0^{\infty} \int_{x+L}^{\infty} (y - x - L) f_{t_n, t_k}(x, y) dy dx \right) \right\} / \\
 & \left\{ \int_0^{x+L} \int_x^{\infty} f_{t_n, t_k}(x, y) dy dx \right\} \left(\int_0^{t_n-1} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\exp(-R(x))(R(x))^j}{j!} dx + L \right) + \\
 & + \left(\int_0^{\infty} \int_{x+L}^{\infty} f_{t_n, t_k}(x, y) dy dx \right) \left(\int_0^{\infty} \sum_{j=1}^{k-1} \frac{\exp(-R(x))(R(x))^j}{j!} dx \right)
 \end{aligned} \tag{2.1.13}$$

gdzie:

$f_{t_n, t_k}(x, y)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa czasów t_n i t_k

Innym rozwiązaniem problemu „naprawić czy wymienić” jest wykorzystanie strategii odnowy według czasu naprawy. Przykładem może być model, przedstawiony w pracy [60], w którym naprawa uszkodzonego systemu jednoelementowego jest realizowana tylko w przypadku, gdy jej czas nie przekroczy dopuszczalnego okresu naprawy $T_{r \max}$.

Zgodnie z założeniami modelu z chwilą uszkodzenia się elementu pracującego, określany jest czas jego naprawy. W przypadku, gdy prognozowany czas naprawy przekracza dopuszczalną wielkość $T_{r\max}$, zamawiana jest część wymienna, której dostawa trwa losowy czas L . Z chwilą dostawy element niezdatny wymieniany jest na nowy (rys. 2.1.8). Jeżeli planowany czas naprawy nie przekracza ustalonego granicznego okresu – podejmowana jest odnowa niepełna.

Celem modelu jest optymalizacja parametru czasu odnowy systemu, która pozwoli na uzyskanie minimalnych kosztów funkcjonowania systemu w jednostce czasu:

$$C_s(T_r) = \frac{(k_f + c_n) \int_0^{T_r} t dG(t) + (k_f L + c_o) \bar{G}(T_r)}{\int_0^{T_r} t dG(t) + \frac{1}{\lambda} + \left(L + \frac{1}{\lambda^s} - \frac{1}{\lambda} \right) \bar{G}(T_r)} \quad (2.1.14)$$

gdzie:

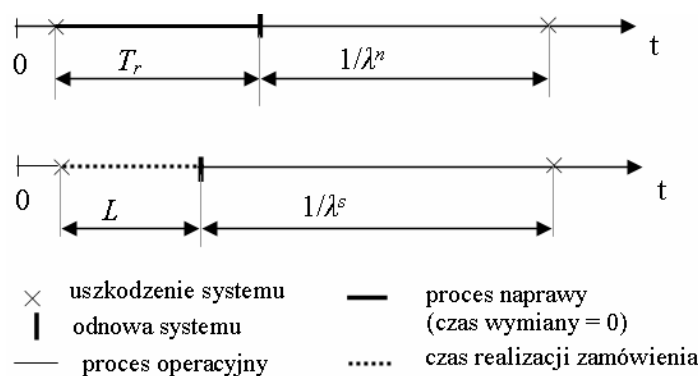
k_f – jednorazowy koszt kary w wyniku pojawienia się niezdatności systemu

T_r – losowy czas odnowy systemu

$G(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas odnowy systemu; $\bar{G}(t) = 1 - G(t)$

λ^s – intensywność uszkodzeń części wymiennej (nowej)

λ^n – intensywność uszkodzeń elementu pracującego (po naprawie)



Rys. 2.1.8. Model procesu obsługiwanego systemu zgodnie ze strategią odnowy wg czasu naprawy [60]

Przedstawiony model analityczny został w pracy rozwiązany graficznie przy wykorzystaniu transformacji Lorentza.

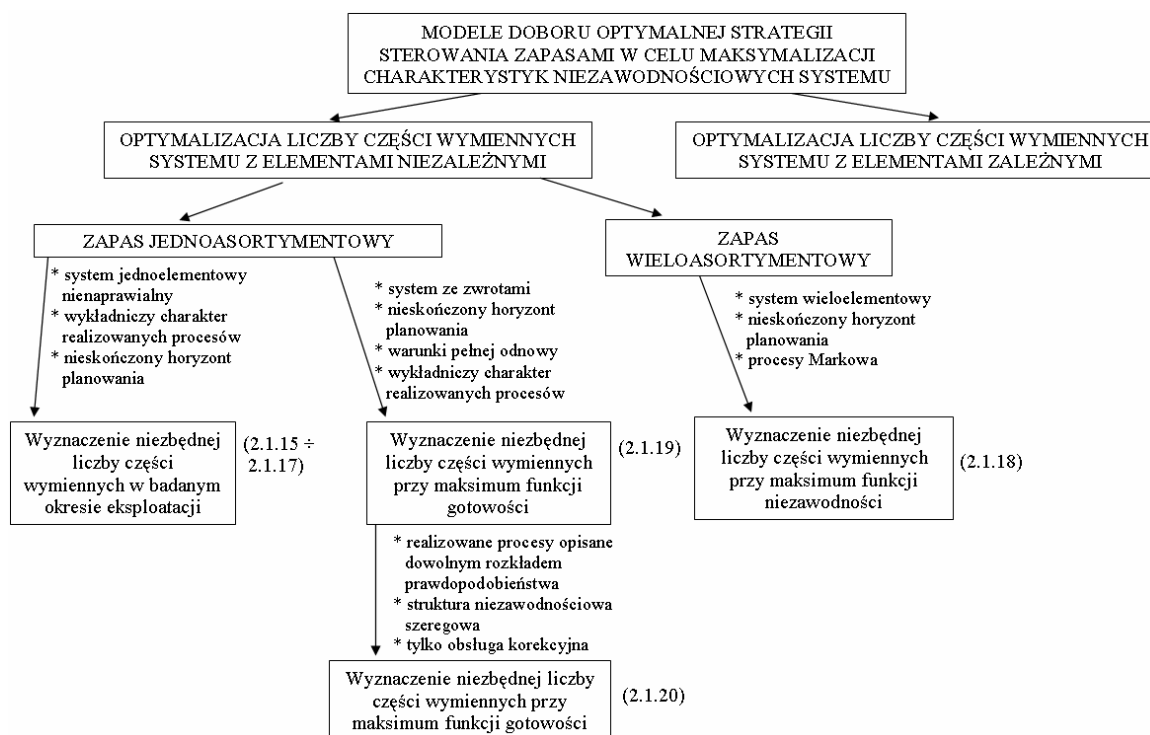
Przegląd podstawowych modeli doboru optymalnych parametrów procesu zaopatrzenia obiektów technicznych, podlegających omówionym typom strategii odnowy profilaktycznej, został przedstawiony w tabeli 2.1.1.

Tabela 2.1.1. Podstawowa klasyfikacja modeli optymalizacji parametrów procesu zaopatrzenia przy ustalonej strategii wymiany profilaktycznej okresowej

<i>Typ strategii sterowania zapasami</i>	<i>Typ strategii odnowy profilaktycznej</i>	<i>Typ systemu</i>	<i>Kryterium optymalizacji</i>	<i>Parametry sterujące</i>	<i>Metoda modelowania</i>	<i>Horyzont planowania</i>	<i>Przykładowe publikacje</i>
(s, S)	strategia wymiany okresowej wg wieku	jednoelementowy	$C_s \rightarrow MIN$	L, T	analityczna	nieokreślony	[156]
				T, S			[72, 125]
		wieloelementowy		T_1, s, S	proces symulacji		[282]
				S_k			[226]
		$C_z \rightarrow MIN$	s_k, S_k	programowanie dynamiczne	[252]		
(R, S)	strategia wymiany blokowej	jednoelementowy	$C_s \rightarrow MIN$	t_0, t_1	analityczna	nieokreślony (∞)	[61, 238]
			$C_s \rightarrow MIN$ $A \rightarrow MAX$	t_0			[232]
		wieloelementowy	$C_s \rightarrow MIN$	T, S	analityczna/ proces symulacji		[19]
				S_k			[255]
				T, s, S	proces symulacji		[208]
				T, R, s	analityczna/ proces symulacji		[36]
(S, s)							
(R, S)		jednoelementowy/ wieloelementowy					

<i>Typ strategii sterowania zapasami</i>	<i>Typ strategii odnowy profilaktycznej</i>	<i>Typ systemu</i>	<i>Kryterium optymalizacji</i>	<i>Parametry sterujące</i>	<i>Metoda modelowania</i>	<i>Horyzont planowania</i>	<i>Przykładowe publikacje</i>
(s, Q)	strategia wymiany	jednoelementowy	$C_s \rightarrow MIN$	S, Q	analityczna	nieokreślony (∞)	[191]
punkt zamawiania w chwili n-tej odnowy	blokowej z odnową minimalną			t_0, N_{nm}			[219]
<p>s – poziom zapasu alarmowego (poziom zamawiania) S – poziom zapasu maksymalnego T – okres pomiędzy zamówieniami R – punkt zamawiania (<i>reordering point</i>) Q – wielkość partii zamówienia</p>							

Z drugiej jednakże strony, omówione modele nie pozwalają na odpowiedź na pytanie - jaka jest niezawodność czy gotowość systemu obsługiwanego. Dlatego też kolejną grupą modeli w obszarze doboru optymalnej polityki sterowania zapasami obsługiwanymi obiektów technicznych, jakie zostaną przedstawione na łamach danej pracy, obejmuje problem doboru charakterystyk procesu obsługiwanego i zaopatrzenia w celu zapewnienia jak najwyższej niezawodności systemu operacyjnego (rys. 2.1.9).



Rys. 2.1.9. Modele doboru optymalnej strategii sterowania zapasami z uwzględnieniem wymagań niezawodnościowych systemu obsługiwanego

Głównym celem realizacji operacji obsługowych jest poprawa charakterystyk niezawodności obiektu technicznego poprzez zapewnienie poprawnego użytkowania systemu w wyniku zmniejszenia liczby uszkodzeń. Podstawowe czynniki definiujące poziom niezawodności w funkcji procesu odnowy to: czas naprawy systemu oraz dobór strategii obsługowej. Ogólnie tendencja wskazuje na dążenie do uzyskania jak najkrótszego czasu naprawy elementów, przy takim doborze rodzaju strategii obsługowej, aby uzyskać możliwie najwyższe wskaźniki charakterystyk niezawodności [15]. Zagadnienie sterowania niezawodnością obiektów technicznych, oprócz problemu organizacji procesów obsługowych, obejmuje także ocenę wpływu procesu zaopatrzenia na poziom funkcjonowania obiektu wspieranego. Jest rzeczą oczywistą, że dostępność zapasów części wymiennych w istotny sposób wpływa na czas naprawy obiektów uszkodzonych. W przypadku braku lub zbyt małej liczby zapasów może wystąpić znaczne przedłużenie czasu naprawy, a tym samym znaczne

pogorszenie wskaźnika gotowości systemu. Dlatego też, prócz doboru właściwej strategii remontowej, należy uwzględnić parametry procesu zaopatrzenia, zgodnego z wybraną strategią sterowania zapasami.

Problem sterowania niezawodnością systemów technicznych jest znany od ponad czterdziestu lat. Pierwsze prace w tym zakresie dotyczyły zagadnienia obsługi systemów wojskowych. Przykładem może być praca [15], w której przedstawiono analizę wpływu zmian parametrów systemu zaopatrzenia na charakterystyki niezawodności systemu eksploatacji okrętów wojennych, czy praca [43], w której zajęto się problemem zaopatrzenia systemu lotnictwa wojskowego. W sektorze cywilnym, konieczność właściwego sterowania realizacją zamówień części wymiennych wymagała zaadoptowania klasycznych metod ustalania poziomu zapasów. Podstawowa klasyfikacja omawianych modeli obejmuje:

- modele deterministyczne (np. metoda Wilsona, *ABC*, strategia stałego okresu zamawiania (T,S), strategia stałej wielkości zamówienia (s,Q));
- modele probabilistyczne – uwzględniające losowość podstawowych procesów uszkodzeń i zaopatrzenia (przykład m.in. w [154]).

Zaletą metod deterministycznych jest przede wszystkim prostota obliczeń. Jednakże wiąże się to także z dużą rozbieżnością uzyskanych wyników w relacji do stanu rzeczywistego badanego obiektu technicznego.

Ponadto, większość znanych modeli (analitycznych) zakłada Poissonowski charakter realizowanego procesu zaopatrzenia (np. [16]). Przykładowo, proces ustalenia niezbędnej ilości części wymiennych systemu nienaprawialnego, które wystarczą na określony czas eksploatacji $(0,t)$, jest praktycznie niemożliwy do przeprowadzenia metodą analityczną bez uwzględnienia założenia, że czas poprawnej pracy rozpatrywanego elementu jest zgodny z rozkładem wykładniczym, a jego intensywność uszkodzeń jest parametrem równoważnego procesu Poissona. Zgodnie z powyższym założeniem, nierówność pozwalająca na oszacowanie liczby części wymiennych jest wtedy wyznaczana zgodnie ze znaną formułą [157]:

$$P(N(t) \leq n_o) \geq \sum_{i=0}^n \frac{(\lambda t)^i}{i!} \exp(-\lambda t) \quad (2.1.15)$$

gdzie:

n_o – liczba elementów zużytych w prostym procesie odnowy

Niezbędna liczba elementów zapasowych dla obiektu technicznego, przy założeniu pomijalności czasu naprawy, która z prawdopodobieństwem nie mniejszym od zadanej wartości α_p wystarczy na rozpatrywany okres eksploatacji [157]:

$$P(N(t) \leq n_o) \geq \alpha_p \quad (2.1.16)$$

Omówiony przykład dotyczy sposobu wyznaczenia liczby części wymiennych dla systemu jednoelementowego nienaprawialnego. Jest to najprostszy przypadek optymalizacji zapasów części wymiennych obsługiwanego obiektu technicznego. Należy jednak podkreślić, że proces zapotrzebowań na części wymienne można wyznaczyć w prosty sposób tylko dla bardzo niewielkiej liczby systemów, które spełniają następujące warunki:

- system jednoelementowy lub wieloelementowy o szeregowej strukturze niezawodnościowej,
- niezależność elementów systemu,
- wspomniany już wykładniczy charakter rozkładów prawdopodobieństwa czasów poprawnej pracy elementów.

Uwzględniając dodatkowe założenia typu:

- proces obsługiwanego polega na realizacji jedynie operacji korekcyjnych,
- części wymienne zapasowe nie podlegają procesowi uszkodzeń,

prawdopodobieństwo nie wystąpienia braku potrzebnego elementu zapasowego w przedziale czasu $(0, t)$ można wyznaczyć za pomocą formuły [157]:

$$P_s(n, t) = \prod_{i=1}^k p_{si}(n_i, t) = \exp(-\lambda_i t) \sum_{j=1}^{d_i} \lambda_{ij} \quad (2.1.17)$$

gdzie:

$p_{si}(n_i, t)$ – prawdopodobieństwo, że w przedziale czasu $(0, t)$ nie zabraknie elementu i -tego typu

λ_{ij} – intensywność uszkodzeń elementu i -tego typu umieszczonego w j -tym miejscu systemu

d_i – liczba elementów i -tego typu w systemie

W przypadku analizy systemów, które nie spełniają powyższych warunków, rozkłady zapotrzebowań na części wymienne mogą być wyznaczone przeważnie tylko w sposób przybliżony, z wykorzystaniem m.in. procesów symulacyjnych [41], metod heurystycznych [268] czy specjalnego oprogramowania komputerowego bazującego na historii eksploatacji [149].

Warto także podkreślić, iż omawiane modele, prócz danych ograniczeń, dodatkowo dotyczą jedynie optymalizacji niezbędnej liczby zapasów dla systemów z elementami niezależnymi. Próbę uwzględnienia prostego przypadku zależności między elementami

omówiono w [158]. W pracy tej przedstawiono metodykę oceny niezawodności systemu szeregowego z elementami zależnymi, opartą na teorii hipotez w zakresie mechanizmu czasowego uszkodzenia się elementów systemu. W modelu przyjęto założenie, że „ten sam element zainstalowany w określonym systemie może uszkadzać się z różnymi prawdopodobieństwami, tj. może posiadać różną niezawodność w zależności od tego, w jakim stanie niezawodnościowym znajduje się stowarzyszony z nim inny element systemu”. Model analityczny został oparty na symbolice zdarzeń i ich prawdopodobieństwach.

Ponadto, warto zwrócić uwagę, że problem wyznaczenia optymalnej liczby części wymiennych może dotyczyć zarówno zapasu jednoasortymentowego, omawianego dotychczas, jak i wieloasortymentowego. Przykład wyznaczenia optymalnego zestawu części wymiennych dla systemu składającego się z n elementów po m komponentów każdy, przy wykorzystaniu procesów Markowa, został przedstawiony w pracy [262]. Funkcja celu modelu obejmuje maksymalizację poziomu niezawodności przy ograniczeniach kosztowych:

$$\left\{ \begin{array}{l} R(t) = \prod_{j=1}^m \left(\sum_{i=0}^{x_j} P_{ij}(t) \right) \\ C_z = \frac{\prod_{i=1}^m x_i^{q_i}}{\sum_{i=1}^m x_i C_{zi}} \end{array} \right. \quad (2.1.18)$$

gdzie:

$P_{ij}(t)$ – prawdopodobieństwo przebywania systemu w i -tym stanie dla j -tego asortymentu

q_i – prawdopodobieństwo wystąpienia części wymiennej i -tego asortymentu

C_{zi} – koszt uzyskania elementu i -tego asortymentu

x_i – wielkość zapasu i -tego komponentu

m – liczba komponentów podsystemu

Podsumowując, opracowane dotychczas modele, których celem jest prognozowanie niezbędnej liczby części wymiennych, pozwalającej na zapewnienie określonego poziomu niezawodności omawianego systemu, wiąże się z pewnymi ograniczeniami:

- głównie wykorzystanie podejścia obiektowego zamiast systemowego,
- rozwiązanie najczęściej bazuje na założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów lub wykorzystaniu tzw. algorytmów przybliżonych,
- złożone problemy wymagają wykorzystania specjalnych algorytmów (oprogramowania) ze względu na stopień komplikacji obliczeń.

Jednocześnie istnieje szereg modeli optymalizacyjnych, których celem jest wyznaczenie niezbędnej liczby zapasów w systemie przy uwzględnieniu kryterium jego gotowości. Interesującym przykładem jest model przedstawiony w pracy [33], w którym uwzględniono proces obsługi systemu ze zwrotami (*inventory model with returns*).

Zgodnie z założeniami, z chwilą pojawienia się uszkodzenia obiekt podlega wymianie na dostępną część wymienną, po czym element niezdalny jest przekazywany do naprawy. Po przeprowadzeniu procesu obsługi, element odnowiony jest przekazywany do magazynu części wymiennych. Jeżeli nastąpi sytuacja, w której uszkodzi się obiekt pracujący i nie ma dostępnych części wymiennych, odnowa systemu polega na realizacji procesu naprawy uszkodzonego elementu. Dla tak zdefiniowanej polityki remontowej, funkcja celu modelu obejmuje wyznaczenie optymalnej alokacji elementów wymiennych (ile? gdzie?) według kryterium minimalnych oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu:

$$\begin{cases} \max A(S) = A(S^*) \\ C_{sj}(S^*, T) \leq C_{sj}^{\max} \end{cases} \quad (2.1.19)$$

gdzie:

S^* – wektor optymalnej liczby elementów wymiennych dla m podsystemów

C_{sj} – całkowite koszty j -tego typu w okresie $(0, T)$

C_{sj}^{\max} – maksymalny poziom dostępnych kosztów j -tego typu

Przy uwzględnieniu założeń:

- wykładniczy charakter realizowanych procesów systemu,
- warunki pełnej odnowy,
- części wymienne nie mogą się uszkadzać,

problem optymalizacji przedstawiony formułą (2.1.19) został rozwiązany przy wykorzystaniu łańcuchów Markowa.

Z kolei przykład wykorzystania algorytmu branch & bound dla modelu funkcjonowania systemu, którego czas poprawnej pracy elementów można opisać dowolnym rozkładem prawdopodobieństwa, został przedstawiony w [135]. W pracy tej model funkcjonowania systemu n elementowego o szeregowej strukturze niezawodnościowej uwzględnia jedynie realizację operacji obsługi korekcyjnej, zgodnie z którą element uszkodzony jest wymieniany na nowy. Problem optymalizacji polega na wyznaczeniu niezbędnej liczby części wymiennych, która pozwoli na osiągnięcie maksymalnego poziomu gotowości systemu przy uwzględnieniu dwóch ograniczeń – kosztów zapasów oraz wagi części wymiennej:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max A(T_s) = \prod_{i=1}^n n \left(\sum_{j=0}^{N_{wi}^{\max}} \sum_{i=0}^j (F_i^k(P_{ij}) - F_i^{k+1}(P_{ij})) \right) \\ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{N_{wi}^{\max}} j \times c_{zi} \times z_{ij} \leq C_z^{\max} \\ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{N_{wi}^{\max}} j \times w_i \times z_{ij} \leq W_{\max} \end{array} \right. \quad (2.1.20)$$

gdzie:

n_{wi}^{\max} – maksymalna liczba części wymiennych dla i -tego elementu

$F_i^n(T_s)$ – n -ty splot dystrybuant rozkładów prawdopodobieństwa czasów poprawnej pracy i -tego elementu systemu

c_{zi} – całkowity jednostkowy koszt części wymiennej i -tego elementu

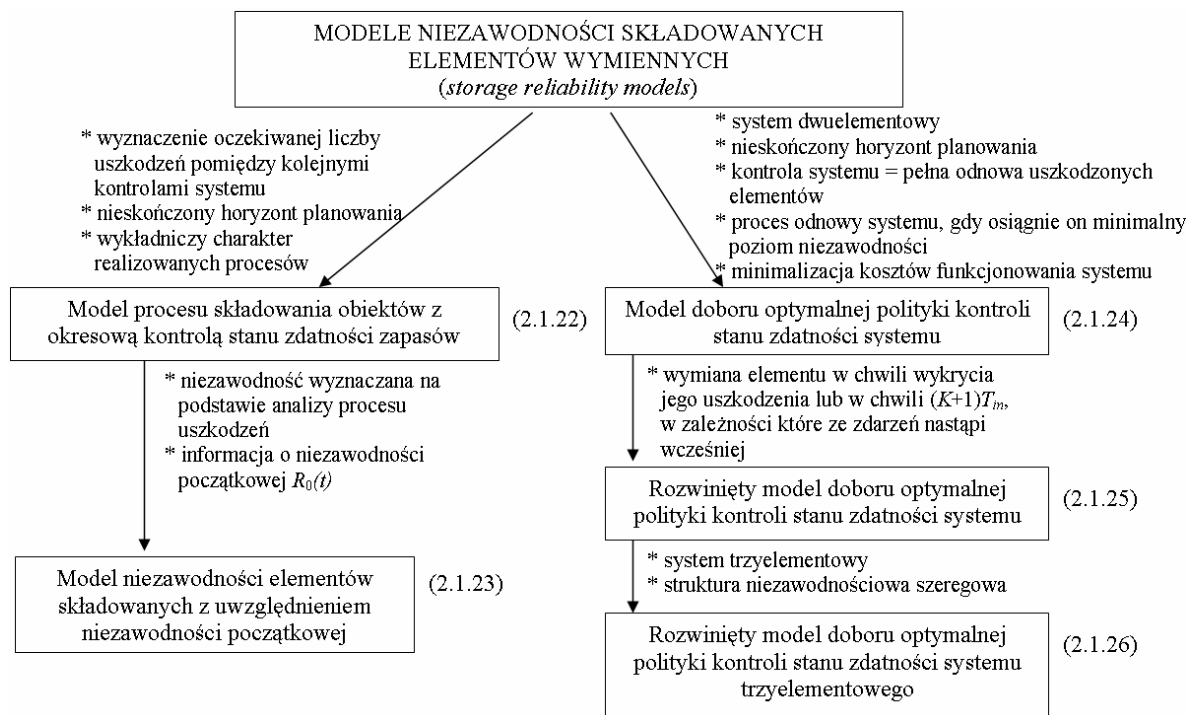
w_i – waga jednostkowa części wymiennej i -tego komponentu

W_{\max} – maksymalny poziom wagi części wymiennych

z_{ij} – matematyczna funkcja binarna:

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{gdy } j\text{-ty element zapasowy przypisany komponentowi } i\text{-temu} \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (2.1.21)$$

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest problem niezawodności składowanych elementów zapasowych, który ma bezpośredni wpływ na możliwość realizacji zadania podstawowego systemu technicznego. Elementy ulegają uszkodzeniom nawet w procesie ich składowania, kiedy nie realizują zadań podstawowych. Dlatego też istotne jest znalezienie odpowiedzi na pytanie: jaka jest niezawodność części wymiennej, składowanej przez określony czas (np. x lat). Przegląd modeli analizujących badany problem został przedstawiony na rysunku 2.1.10.



Rys. 2.1.10. Modele niezawodności składowanych elementów wymiennych

Jednym z pierwszych opracowań w analizowanym obszarze jest praca [152], w której przedstawiono model procesu składowania obiektów (wyposażenie elektroniczne) z tzw. okresową kontrolą stanu zdatności zapasów.

Na rysunku 2.1.11 przedstawiono model procesu składowania z okresową kontrolą, zgodnie z którym elementy przebywające w magazynie są kontrolowane z ustaloną częstotliwością, a wszelkie wykryte niezdatne elementy są przekazywane do naprawy, po której wracają do magazynu.



Rys. 2.1.11. Model niezawodności elementów składowanych z uwzględnieniem operacji kontroli stanu systemu [152]

Funkcja celu modelu obejmuje wyznaczenie oczekiwanej liczby uszkodzeń, jakie wystąpią w okresie pomiędzy kolejnymi kontrolami stanu systemu, przy założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów:

$$N_{in} = \left(\frac{T^4}{T^4 + T^T} \lambda_{s4} + \frac{T^T}{T^4 + T^T} \lambda + \frac{v_{in}}{T^4 + T^T} \lambda_c \right) (T^4 + T^T) \quad (2.1.22)$$

gdzie:

N_{in} – oczekiwana liczba uszkodzeń pomiędzy kolejnymi kontrolami systemu

T^4 – czas składowania części zapasowych w okresie pomiędzy kolejnymi kontrolami stanu zdatności zapasów

T^T – czas realizacji kontroli stanu zdatności elementów magazynowanych

λ_{s4} – intensywność uszkodzeń elementu składowanego

λ_C – intensywność uszkodzeń procesu włączania-wyłączania

v_{in} – liczba cykli kontroli stanu zdatności w badanym okresie składowania obiektów

Omawiany problem uszkodzalności elementów w procesie magazynowania był analizowany, szczególnie w latach 90. XX w., m.in. ze względu na rosnące wymagania odnośnie niezawodności produktów zarówno w sektorze obronnym jak i komercyjnym. Na szczególne zainteresowanie zasługuje model przedstawiony w [281], w którym niezawodność obiektów składowanych jest wyznaczana na podstawie analizy procesu uszkodzeń w trakcie operacji magazynowania oraz informacji o tzw. niezawodności początkowej (*initial reliability*) w chwili rozpoczęcia procesu składowania t_s . Funkcja niezawodności elementów składowanych w chwili t opisana jest wzorem:

$$R(t) = R_0 R_{op}(t), \quad t \geq 0 \quad (2.1.23)$$

gdzie:

R_0 – niezawodność obiektu w chwili rozpoczęcia procesu składowania

$R_{op}(t)$ – niezawodność obiektu w chwili t

W omawianej pracy funkcja niezawodności elementów składowanych, opisana formułą (2.1.23) została wyznaczona przy założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów.

Zagadnienie optymalizacji parametrów procesu kontroli stanu zdatności składowanego systemu w kolejnych latach uległo pewnej modyfikacji. Przykładem może być model przedstawiony w [110, 113], w którym, zgodnie z założeniami, system składa się z dwóch elementów. Element nr 1 podlega operacjom kontroli jego stanu w chwilach kT ($k = 1, 2, \dots$), w wyniku których wszelkie niezdatne elementy podlegają pełnej odnowie. Natomiast element nr 2 podlega jedynie procesowi degradacji w czasie (także w trakcie realizacji operacji kontroli stanu elementu pierwszego). Dodatkowo, system podlega operacji remontu w chwili $kT_{in} + T_{Rm}$, kiedy jego niezawodność wynosi R_m .

Wyznaczenie optymalnej liczby kontroli stanu N_{in1} oraz optymalnego czasu pomiędzy operacjami kontroli stanu T_{in} , obejmuje minimalizację funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu do chwili jego wymiany:

$$C_s(T_{in}) = \frac{N_{in1}c_{in} + c_w}{N_{in1}T_{in} + T_{Rm}} \quad (2.1.24)$$

gdzie:

N_{in1} – liczba zrealizowanych operacji kontroli stanu systemu

T_{Rm} – losowy czas do chwili osiągnięcia przez system niezawodności na poziomie R_m

Parametry optymalizacji w analizowanej pracy zostały wyznaczone przy wykorzystaniu rozkładu Weibulla dla opisu czasu poprawnej pracy elementu pierwszego, oraz rozkładu wykładniczego dla opisu procesu uszkodzeń elementu drugiego.

Przedstawiony model został zmodyfikowany w pracy [111], poprzez wprowadzenie dodatkowego założenia – „system podlega operacji wymiany w chwili wykrycia jego uszkodzenia lub w chwili kontroli jego stanu $(K+1)T_{in}$, w zależności które ze zdarzeń nastąpi wcześniej”.

Funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu do jego wymiany:

$$C_s(T_{in}) = (c_{in} + c_{dw1}T_{in}) \sum_{j=0}^K (R_1(T_{in}))^j R_2(jT_{in}) - c_{dw1} \sum_{j=0}^K (R_1(T_{in}))^j \int_{jT}^{(j+1)T_{in}} R_1(t - jT_{in}) R_2(t) dt + c_w - c_{in} \quad (2.1.25)$$

gdzie:

c_{dw1} – jednostkowy koszt niezdatności systemu w okresie od chwili pojawienia się uszkodzenia do chwili jego wykrycia

Na szczególne zainteresowanie zasługuje praca [112], która modyfikuje przedstawiony model uwzględniając proces odnowy profilaktycznej z kontrolą stanu dla systemu trzelementowego. W modelu tym system składa się z elementu nr 1 połączonego w szeregową strukturze niezawodnościowej z elementem nr 2, który składa się z komponentów 21 i 22. Strategia obsługi profilaktycznej opiera się na następujących założeniach:

- operacja kontroli stanu systemu odbywa się w chwilach jT_{in} , w trakcie której element nr 1 podlega pełnej odnowie (element nr 2 nie podlega żadnej operacji obsługi);
- w ustalonych chwilach czasu NT_{in} system podlega operacji częściowej wymiany – element nr 21 jest wymieniany na nowy, element 22 pozostaje bez zmian;
- pełna wymiana systemu występuje z chwilą, kiedy niezawodność systemu składowanego jest równa lub mniejsza od założonego poziomu R_m .

Funkcja celu modelu opiera się na wyznaczeniu optymalnych parametrów: liczby operacji kontroli stanu N_{in1} , liczby wymian częściowych N_{21} oraz czasu pomiędzy kolejnymi operacjami kontroli stanu T_{in} , poprzez minimalizację funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu w jednostce czasu:

$$C_s(N_{in1}, T) = \frac{(N_w^{21} N_{in1} + N_{in1}^{21})c_{in} + N_w^{21} c_{w1} c_w}{(N_w^{21} N_{in1} + N_{in1}^{21}) + T_q} \quad (2.1.26)$$

gdzie:

N_w^{21} – liczba wymian elementu 21

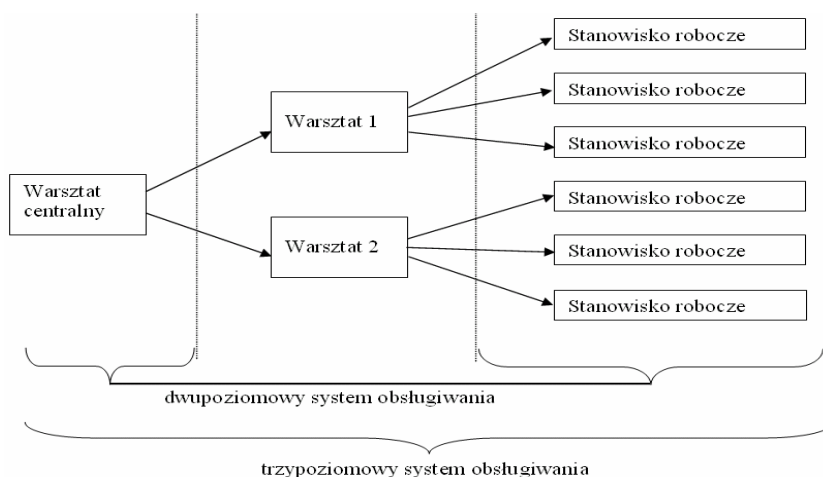
c_{w1}^{21} – koszt wymiany elementu 21

T_q – czas do wymiany systemu od chwili $(N_{21} N_{in1} + n_q)$ -tej kontroli stanu systemu

N_{in1}^{21} – liczba inspekcji od ukończenia N_{21} liczby wymian do chwili pełnej wymiany systemu

Ostatnie zagadnienie, na które warto zwrócić uwagę, analizując literaturę z zakresu doboru optymalnej strategii sterowania zapasami obiektów technicznych podlegających operacjom odnowy, jest problem alokacji zapasów w systemach z wielopoziomową bazą obsługową.

W przypadku systemów naprawialnych, rzadko mamy do czynienia z systemem posiadającym jeden poziom obsługi (*single-echelon systems*). Często występuje sytuacja, że elementy systemu technicznego mogą być przywracane do stanu zdatności na poziomie tzw. organizacyjnym, jeżeli istnieją dostępne części wymienne, lub mogą być przesyłane do centralnego warsztatu (*central depot*), gdzie wykonywana jest operacja obsługiwanie (rys. 2.1.12).



Rys. 2.1.12. Dwu- i trzydziomowy system obsługiwanie obiektu technicznego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [57]

Opisany przykład dotyczy dwupoziomowego systemu obsługiwanego. Każdy z tych poziomów dysponuje własnym zapleczem części wymiennych, co oznacza że system zaopatrywania w części wymienne danego obiektu technicznego wspiera dwa magazyny, sterując dwoma procesami zużywania się zasobów.

W dostępnej literaturze istnieje szereg prac obejmujących przegląd dotychczasowego dorobku naukowego badanego obszaru. W pracy [57] przedstawiono podstawową terminologię badanego zagadnienia oraz dokonano klasyfikacji dostępnych modeli sterowania zapasami obiektów technicznych z wielopoziomowym systemem obsługiwanego wyróżniając dwa przypadki – zaopatrzenie łańcucha dostaw oraz zaopatrzenie procesu obsługiwanego systemu technicznego. Omówione zostały modele dotyczące polityki zaopatrzenia na poziomie wsparcia całego systemu technicznego (*ordering policies*), jak również uwzględniono problem zabezpieczenia zapotrzebowania poszczególnych wybranych poziomów obsługi systemu (*installation stock policies*).

W drugiej pracy [55] przede wszystkim skupiono się na klasyfikacji modeli sterowania zapasami obiektów technicznych z wielopoziomowym systemem obsługiwanego z punktu widzenia ich praktycznej implementacji. Skupiono się na opisie podstawowego modelu *METRIC (Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control)*, wykorzystywanego w wojskowości, oraz jego późniejszych modyfikacji, jak również opisano modele wykorzystujące założenia teorii masowej obsługi.

Modele doboru strategii zaopatrzenia obiektów naprawialnych z wielopoziomowym systemem obsługiwanego przede wszystkim obejmują problem optymalnego zaopatrzenia systemów wojskowych w części wymienne o krytycznym znaczeniu dla powodzenia misji wojskowej. Przykładem, na szczególne zainteresowanie problemem optymalnej alokacji zapasów w wielopoziomowych systemach obsługiwanego obiektów wojskowych, są prace:

- analizujące proces funkcjonowania systemu wojskowego [139, 140, 155, 275];
- analizujące proces zaopatrzenia systemu lotnictwa wojskowego [122, 200];
- optymalizujące organizację wsparcia logistycznego systemu marynarki wojennej [223, 224];
- uwzględniające problem zaopatrzenia misji NASA [20].

Celem wspomnianych modeli jest uzyskanie maksymalnej gotowości systemu wojskowego, przy kryterium ograniczającym minimalnych kosztów funkcjonowania systemu. Najczęściej wykorzystywanym narzędziem modelowania są procesy symulacji Monte Carlo.

Przegląd podstawowych modeli optymalizacji alokacji zapasów, które opracowano w sektorze komercyjnym, przedstawiony został w tabeli 2.1.2. Z kolei w pracy [25] przedstawiono porównanie różnych polityk alokacji zapasów.

Ze względu na stopień komplikacji zagadnienia, wyznaczenie optymalnej alokacji zapasów w systemach z kilkoma poziomami składowania części wymiennych najczęściej wymaga wykorzystania procesów symulacyjnych jako narzędzia modelowania (np. [221]), procedur branch & bound (np. [38]), czy też zastosowania założeń teorii masowej obsługi (np. [44, 54, 127, 128, 132]).

Podsumowując, bez względu na typ poruszanego problemu w obszarze organizacji zaopatrzenia obiektu technicznego, podlegającego określonym procesom obsługi, prace prowadzone są dwukierunkowo:

- poszukiwanie efektywnych metod optymalizacyjnych w przypadku modeli już znanych (np. [33, 157]),
- poszukiwanie modeli uwzględniających nowe struktury niezawodnościowe, zależności pomiędzy elementami i innych cech charakterystycznych rozpatrywanych systemów i ich procesów funkcjonowania (np. [61, 62]).

Tabela 2.1.2. Podstawowe modele doboru optymalnej alokacji zapasów obiektu technicznego z wielopoziomowym systemem obsługiwan

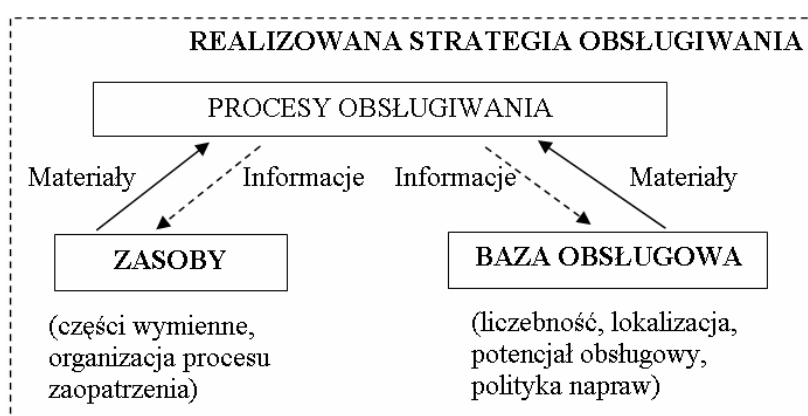
<i>Typ systemu obsługiwan</i>	<i>Kryterium optymalizacji</i>	<i>Metoda modelowania</i>	<i>Przykładowe publikacje</i>
dwupoziomowy system obsługiwan	$C_s \rightarrow MIN$	strategie push i pull	[109]
	$W_0 \rightarrow MAX$	analityczna z wykorzystaniem teorii kolejek	[132]
		procesy symulacji	[54]
	$C_s \rightarrow MIN$	analityczna z wykorzystaniem teorii kolejek	[221]
	$\alpha_o \rightarrow MIN$		[128]
	$\bar{n}_{ocz} \rightarrow MIN$	algorytm branch & bound	[127]
trzydziomowy system obsługiwan	$C_s \rightarrow MIN$ $A \rightarrow MAX$	procesy Markowa	[38]
czteropoziomowy system obsługiwan	$C_h + C_f \rightarrow MIN$	analityczna	[44]
n-poziomowy system obsługiwan	$\alpha_o \rightarrow MIN$		[56]
W_0 – współczynnik wypełnienia α_o – poziom obsługi		\bar{n}_{ocz} – średnia liczba zleceń oczekujących w systemie obsługiwan	

2.2. Modele z rezerwą strukturalną uwzględniające zdolność obsługową stanowisk remontowych

Opierając się na dotychczas omówionym przeglądzie literatury obszaru m.in. teorii odnowy można stwierdzić, że podstawowe metody poprawy niezawodności systemu technicznego obejmowały:

- dobór optymalnej strategii obsługiwanego profilaktycznego (np. [39, 258]),
- kontrolę stanu zdadności systemu (np. [2]),
- uwzględnienie niezbędnej liczby zapasów w celu zapewnienia ciągłości realizacji procesu eksploatacji (np. [157]),
- integrację w/w metod (np. [66, 123, 277]).

Jednakże omówione modele poprawy niezawodności obiektu/systemu, wykorzystujące powyższe metody, bazowały na założeniu, że tzw. potencjał obsługowy systemu odnowy (*repair capacity*) był zawsze i w pełni dostępny. Oznacza to, że odnowa wszystkich elementów, które uległy uszkodzeniu, była natychmiastowo realizowana. W rzeczywistych warunkach założenie to nie zawsze może być spełnione m.in. ze względu na ograniczenia ekonomiczne czy organizacyjne. W rezultacie, analizując zagadnienie optymalizacji efektywności funkcjonowania obiektów technicznych należy brać pod uwagę problem doboru strategii obsługiwanego, organizacji zaopatrzenia, jak również możliwości operacyjne systemu obsługiwanego (liczebność stanowisk obsługi, ich lokalizację, itp.) [49, 50] (rysunek 2.2.1).



Rys. 2.2.1. Zależność pomiędzy podstawowymi czynnikami efektywnej organizacji systemu

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [49, 50, 51]

Zgodnie z przedstawionym schematem realizacja operacji obsługiwanego możliwa jest dzięki niezbędnym zasobom wspierającym. Z drugiej strony, proces naprawy elementów możliwy jest dzięki posiadanemu potencjałowi obsługiwanego. Jednocześnie optymalizacja polega na właściwym doborze omawianych czynników, gdyż „posiadanie większej liczby

zapasów zwiększa tolerancję systemu na nieprzewidziane zakłócenia procesu odnowy realizowane na stanowiskach roboczych, tym samym zmniejszając zapotrzebowanie na ich usługi. Z drugiej strony posiadanie większego potencjału obsługowego zapewni mniejsze zapotrzebowanie na części wymienne, również wpływając na skrócenie czasu naprawy systemu” [50].

Ponadto, sprawdzoną metodą podnoszenia niezawodności obiektu technicznego jest wprowadzenie tzw. rezerwy strukturalnej. Element nadmiarowy systemu ma na celu przejęcie realizacji zadania podstawowego, gdy komponent pracujący ulegnie uszkodzeniu. W związku z tym, zgodnie z teorią niezawodności, część wymienna systemu stanowi jego rezerwę strukturalną.

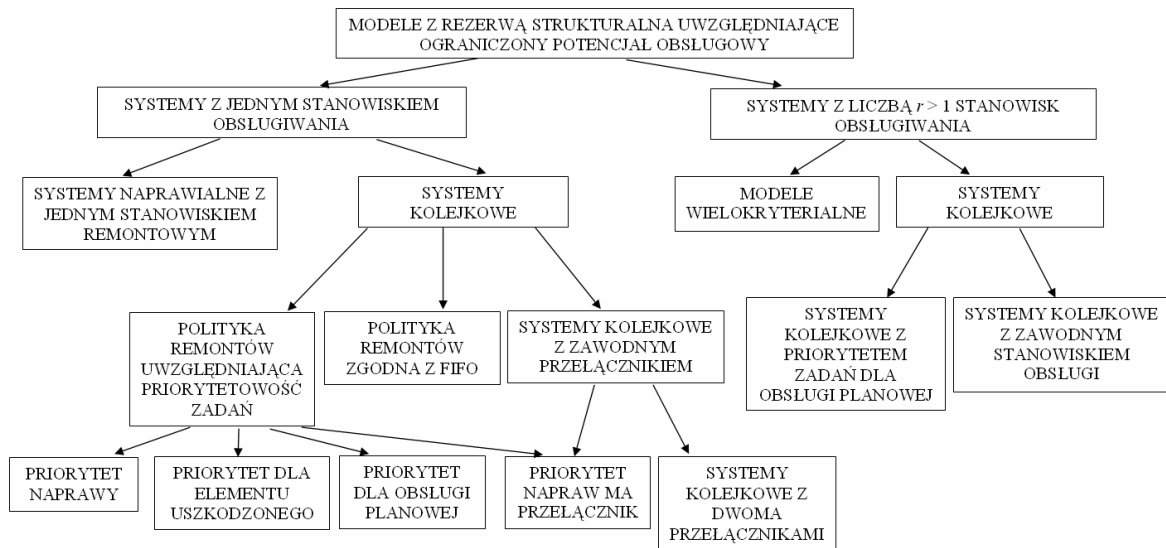
W dostępnej literaturze istnieje niewiele opracowań modeli analitycznych, które łączą relacje pomiędzy doбором parametrów polityki obsługiwanego, organizacji zaopatrzenia oraz zapewnieniem niezbędnej infrastruktury remontowej [49]. Związane jest to z faktem, że połączenie parametrów strukturalnych systemu (nadmiarowość, potencjał obsługowy) oraz zmiennych decyzyjnych (poziom zapasów, parametry strategii odnowy profilaktycznej, organizacja zadań obsługowych na stanowiskach) jest zadaniem bardzo skomplikowanym matematycznie [51]. Dlatego też większość dostępnych modeli analitycznych korzysta z wielu założeń ograniczających ich wykorzystanie w praktyce. Podstawowe metody modelowania badanego zagadnienia, obejmują przede wszystkim zastosowanie założeń teorii masowej obsługi (np. [92, 160, 235]) lub procesów symulacyjnych (np. [49, 50, 51]).

Przegląd klasycznych modeli systemów z rezerwą strukturalną został przedstawiony m.in. w pracy [118], gdzie omówione zostały podstawowe modele doboru optymalnej polityki zaopatrzenia systemów podlegających operacjom odnowy, posiadających zapas części wymiennych w postaci rezerwy strukturalnej.

Ogólna klasyfikacja modeli efektywnego funkcjonowania obsługiwanego obiektów technicznych z uwzględnieniem potencjału obsługowego obejmuje ich podział ze względu na liczbę stanowisk remontowych ($r \geq 1$).

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy odnośnie badanego obszaru naukowego pozwala na wyróżnienie w literaturze trzech podstawowych grup modeli, ze względu na kryterium rozwiązywanego problemu: (rys. 2.2.2)

- analiza poziomu niezawodności i gotowości obsługiwanego systemu (systemy naprawialne z jednym stanowiskiem remontowym),
- modele wielokryterialne, uwzględniające problem doboru parametrów obsługi, organizacji procesu zaopatrzenia oraz dostępności stanowisk obsługi,
- systemy kolejkowe z ograniczonym potencjałem obsługowym.



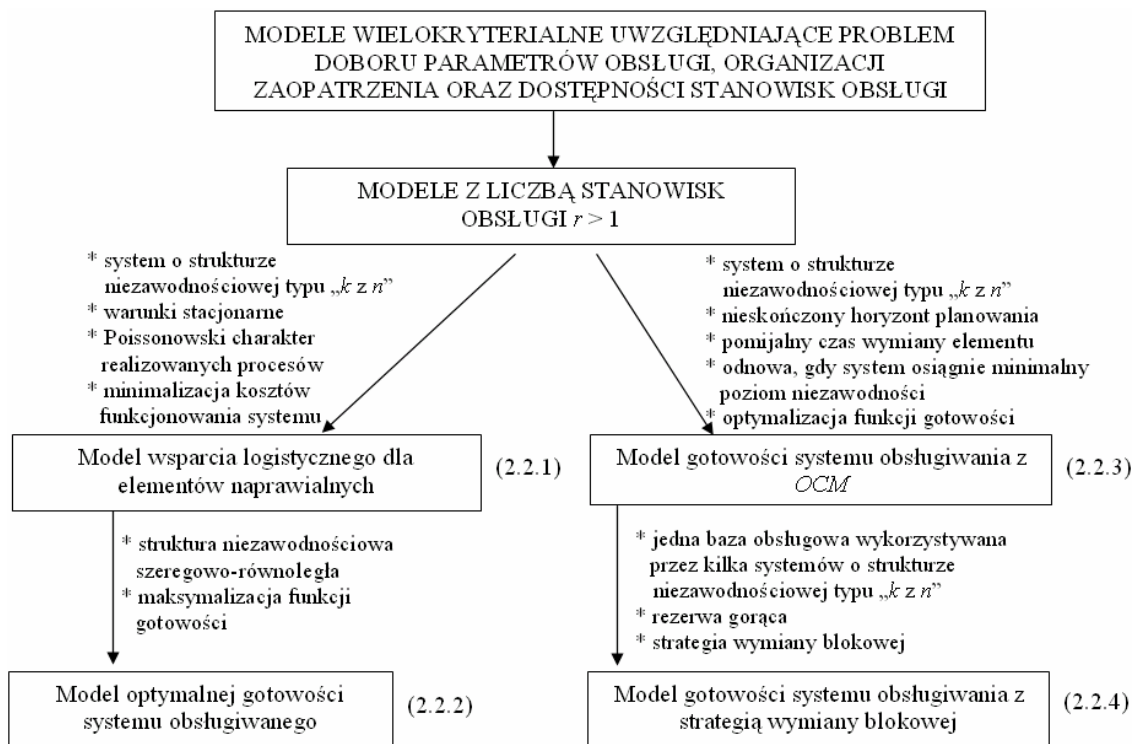
Rys. 2.2.2. Modele z rezerwą strukturalną uwzględniające ograniczony potencjał obsługi

Do pierwszej, podstawowej grupy modeli zaliczono prace, uwzględniające podstawowe relacje pomiędzy systemem obsługiwanym a bazą obsługową. Proste modele, które pojawiły się już w latach 60. XX w., analizują wpływ procesu obsługi na poziom niezawodności obiektu technicznego. Ogólnie można je zdefiniować jako modele systemów naprawialnych z niepomiernym czasem odnowy i jednym stanowiskiem obsługiwanym. Przykłady tego typu modeli zostały opracowane m.in. w [42, 91], gdzie omówiono problem niezawodności systemu składającego się z n elementów połączonych szeregowo, lub w pracy [254], w której zajęto się zagadnieniem wyznaczenia optymalnej liczby napraw przed podjęciem operacji wymiany systemu o strukturze niezawodnościowej typu „ k z n ”.

Ponadto, do klasycznych modeli funkcjonowania systemów technicznych z jednym stanowiskiem obsługowym, można zaklasyfikować szereg prac, opisujących systemy naprawialne ze zwrotnym strumieniem odnowionych części wymiennych (*system with returns*). Przykład modelu analizującego funkcję gotowości systemu dwuelementowego z rezerwą zimną i jednym stanowiskiem remontowym przedstawiono w pracach [124, 214].

Jednakże w modelach tych nie uwzględniono wpływu niegotowości stanowiska obsługiwanego na poziom charakterystyk niezawodnościowych systemu obsługiwanego, jedynie ograniczając problem do zaznaczenia, że tego typu potencjał remontowy jest niezbędny w procesie utrzymania jego gotowości.

Rozwinięcie podstawowych modeli systemów z rezerwą strukturalną uwzględniających ograniczony potencjał obsługowy objęło opracowanie modeli wielokryterialnych (rys. 2.2.3).



Rys. 2.2.3. Modele wielokryterialne z uwzględnieniem zawodności systemu obsługiwanego

Efektywne funkcjonowanie obiektu technicznego można zapewnić jedynie poprzez integrację niezbędnej liczby zasobów, bazy obsługowej oraz polityki obsługiwanego. Jedną z pierwszych prac, uwzględniających złożoność danego problemu jest [92]. W pracy tej przedstawiono model optymalizacji projektowanego systemu wsparcia logistycznego oraz potencjału obsługowego, która pozwala na zapewnienie określonego poziomu obsługi, definiowanego jako procent zamówień zrealizowanych z bezpośrednich stanów magazynowych systemu.

Analizowany jest system o strukturze niezawodnościowej typu „ k z n ”, w którym każdy z elementów może przebywać w jednym z trzech stanów systemu: operacyjnym, jako rezerwa strukturalna oraz obsługiwanego (naprawa lub oczekiwanie na naprawę). Uszkodzony element, po zastąpieniu zapasowym, jest transportowany na stanowisko remontowe, gdzie podlega odnowie, po której zakończeniu ponownie jest przekazywany do magazynu części wymiennych. Jeżeli w chwili uszkodzenia się systemu nie ma dostępnych części wymiennych, oczekuje on na odnowę.

Wyznaczenie optymalnych parametrów funkcjonowania systemu wspierającego, obejmuje:

- liczbę i lokalizację stanowisk remontowych,
- liczbę kanałów obsługi na każdym stanowisku obsługiwanego,
- wielkość zapasów zmagazynowanych przy poszczególnych stanowiskach remontowych.

Złożoność zagadnienia, zgodnie z opinią autorów modelu, wymaga założeń upraszczających zgodnych z teorią masowej obsługi:

- Poissonowski proces uszkodzeń systemu,
- czasy transportu oraz odnowy obiektów technicznych zgodne z wykładniczym rozkładem prawdopodobieństwa,
- system złożony z identycznych elementów,
- warunki stacjonarne.

Przy tak zdefiniowanych założeniach, model optymalizacyjny obejmuje minimalizację funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu:

$$\begin{cases} \min C_s(r_c, i) = C_{sl}(r_c, i) + C_{sll}(r_c, i) \\ \sum_{n=0}^{i-1} p_n \geq 1 - \alpha_o \end{cases} \quad (2.2.1)$$

gdzie:

- r_c – liczba kanałów obsługi na stanowisku remontowym
- $C_{sl}(c, y)$ – roczne koszty stałe funkcjonowania systemu technicznego
- $C_{sll}(c, y)$ – roczne koszty zmienne funkcjonowania systemu technicznego
- p_n – prawdopodobieństwo, że n elementów znajduje się w stanie niezdatności, gdy pojawi się kolejne zapotrzebowanie na część wymienną
- α_o – poziom obsługi

Analiza danego modelu została przeprowadzona z wykorzystaniem algorytmu branch and bound.

Przedstawiony model jest jednym z pierwszych w literaturze, analizujących złożoność danego zagadnienia, jednakże założenia upraszczające (m.in. wykładniczy charakter realizowanych procesów) ograniczają możliwość jego wykorzystania w praktyce.

W kolejnych latach pojawił się szereg prac analizujących gotowość systemu obsługiwanego, która zależy od doboru polityki odnowy, liczby części wymiennych oraz dostępnego potencjału obsługiwanego. Przykładem może być praca [215], w której rozpatrzono problem optymalizacji wskaźnika gotowości systemu o szeregowo-równoległej strukturze niezawodnościowej.

System składa się z m elementów, o strukturze typu „ k z m ”, w każdym z n jego podsystemów. Podsystemy z kolei są połączone szeregowo. Przy założeniu:

- stacjonarności procesów,
- wykładniczego charakteru realizowanych procesów,
- zimnej rezerwy strukturalnej,

problem optymalizacji obejmuje maksymalizację poziomu wskaźnika gotowości przy ograniczeniu wielkości zmiennych decyzyjnych:

$$\begin{cases} \max A = \prod_{j=1}^m A_j \\ \sum_{j=0}^m o_{ij} \{(r_j - k_j), s_j, r_j\} \leq S_l^{\max} \end{cases} \quad (2.2.2)$$

gdzie:

$o_{ij}\{i\}$ – funkcja ograniczenia dla l -tego typu ograniczenia i j -tego typu podsystemu

r_j – liczba stanowisk obsługiwanego w j -tym podsystemie

s_j – liczba części wymiennych zapewnionych w j -tym podsystemie

k_j – liczba ograniczeń modelu

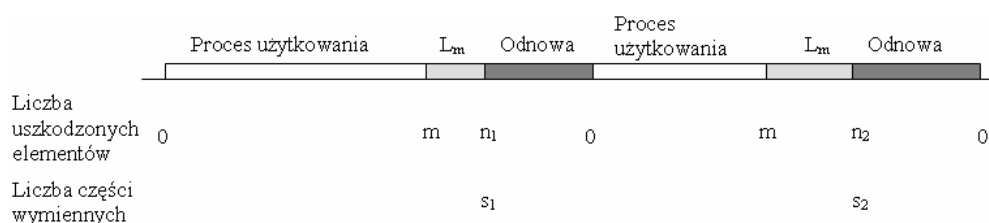
S_l^{\max} – maksymalny poziom zapasów dla l -tego ograniczenia

Rozwiązanie wielokryterialnej optymalizacji zostało przedstawione dla warunku ograniczającego – funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania obiektu z wykorzystaniem algorytmu programowania całkowitoliczbowego (*integer programming*).

Na szczególne zainteresowanie zasługuje szereg modeli optymalizacji poziomu gotowości systemu o strukturze niezawodnościowej typu „ k z n ”, zaproponowanych przez autorów de Smidt-Destombes i van der Heijden [49, 50, 51], które zaimplementowane zostały w obszarze funkcjonowania systemów wojskowych.

Rozważono następujący proces funkcjonowania systemu: operację odnowy podejmuje się z chwilą, gdy $n_1 \leq n - k$ elementów ulegnie uszkodzeniu. Jednocześnie podjęcie realizacji procesu odnowy jest opóźnione ze względu na konieczność wykonania operacji przygotowawczych przed naprawą właściwą. W trakcie realizacji operacji obsługi wymianie podlega n komponentów, po czym cykl odnowy rozpoczyna się od początku.

Z kolei cykl zaopatrzenia rozpoczyna się z chwilą rozpoczęcia realizacji operacji odnowy. W danej chwili s elementów wymiennych jest dostępnych do wykorzystania w procesie odnowy, przy czym $S - s$ nadal oczekuje na naprawę. Jeżeli niezbędne części wymienne nie zostały naprawione do chwili pojawienia się niezdatności systemu obsługiwanego, system oczekuje na ich odnowę i proces obsługi jest opóźniony o czas naprawy $n - s$ niezbędnych elementów. Po zakończeniu odnowy części wymiennych cykl rozpoczyna się od początku i trwa aż do chwili tuż przed następną operacją odnowy systemu (rys. 2.2.4).



Rys. 2.2.4. Cykl operacyjny systemu z liczbą uszkodzonych elementów (powyżej) oraz liczbą dostępnych części wymiennych (poniżej) [51]

Zatem liczba elementów dostępnych w cyklu zaopatrzenia zależy od liczby komponentów, które podlegały naprawie w ciągu cyklu oraz liczby elementów wymiennych, które należy naprawić od początku cyklu.

Uwzględniając założenia:

- wykładniczy charakter czasów poprawnej pracy systemu oraz czasów jego odnowy,
- pomijalny czas wymiany elementu uszkodzonego na nowy,
- strategia obsługiwanego według stanu (*OCM*),
- na stanowisku obsługowym funkcjonuje r_c równoległych kanałów obsługowych,
- obsługa systemu polega na wymianie elementów uszkodzonych,
- nie ma pewności, że potencjał obsługowy r_c kanałów wystarczy aby naprawić wszystkie części wymienne znajdujące się w obsłudze, podczas stanu zdatności systemu operacyjnego,

wskaźnik gotowości systemu [50, 51]:

$$A = \frac{E[T_o] + E[L_m]}{E[T_o] + E[L_m] + E[T_r]} \quad (2.2.3)$$

gdzie:

L_m – losowy czas przygotowań do obsługi właściwej systemu

Wskaźnik gotowości przedstawiony formułą (2.2.3) został wyznaczony przy wykorzystaniu metod przybliżonych z porównaniem do wyników uzyskanych przy pomocy procesu symulacji.

Przedstawiony problem wskazuje na konieczność uwzględnienia zależności pomiędzy procesem obsługi systemu a procesem zaopatrzenia w części wymienne, gdyż cykl zaopatrzenia bezpośrednio zależy od organizacji procesu obsługi. Ponadto problem został rozwiązany przy założeniu, że proces zgłoszeń obsługi jest zgodny z procesem Poissona. W przypadku rozpatrzenia sytuacji, w której funkcjonowałyby kilka systemów korzystających z jednej bazy obsługowej, założenie to mogłoby nie być spełnione. Ponadto dodatkowym uproszczeniem modelu jest założenie, że elementy pracujące w systemie są identyczne.

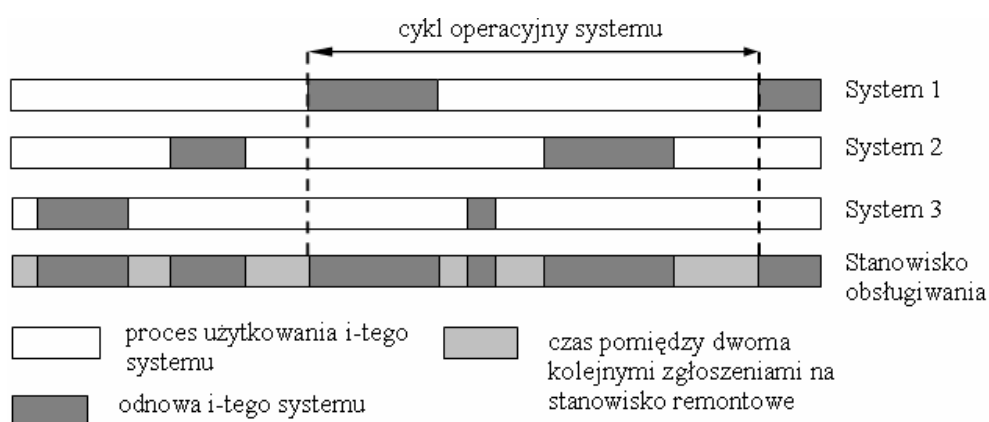
Kolejna praca [49] obejmuje modyfikację przedstawionego modelu, która uwzględnia problem funkcjonowania kilku systemów o strukturze niezawodnościowej typu „ k z n ” (rezerwa gorąca), które korzystają z jednej bazy obsługowej.

W modelu tym założono, że:

- każdy model jest obsługiwany według strategii wymiany blokowej,
- nie podejmuje się napraw poza chwilami kT .

Pozostałe założenia zgodne z [50, 51].

Na rysunku 2.2.5 przedstawiono podstawowe cykle funkcjonowania systemów oraz cykl funkcjonowania stanowiska obsługiwania.



Rys. 2.2.5. Cykl operacyjny bazy obsługowej realizującej zadania odnowy trzech systemów technicznych [49]

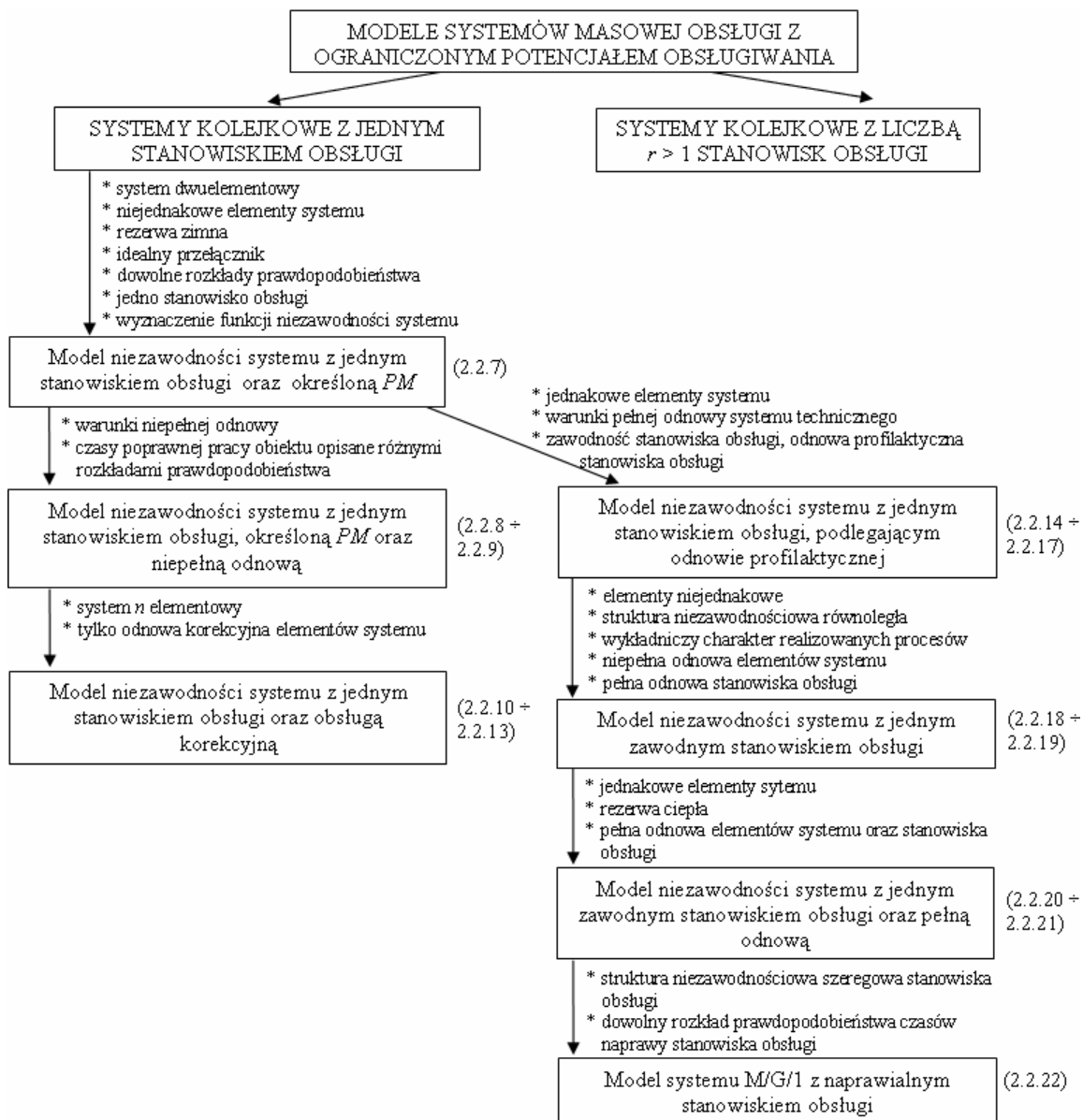
Wskaźnik gotowości systemu:

$$A = \frac{E[T_o - T_r]}{E[T_o]} \quad (2.2.4)$$

Czas odnowy systemu zależy od liczby uszkodzonych elementów, liczby dostępnych części wymiennych w chwili rozpoczęcia odnowy oraz potencjału obsługowego. Niestety rozwiązanie danego problemu drogą analityczną jest bardzo trudne ze względu na złożoność obliczeń. W praktyce, rozwiązanie obejmuje opracowanie harmonogramu, zgodnie z którym elementy systemów podlegają procesom odnowy.

Obecnie w literaturze można znaleźć bardzo wiele prac, w których problem obsługiwania obiektów technicznych na stanowiskach roboczych jest rozwiązywany jako klasyczny system masowej obsługi z ograniczonym potencjałem obsługiwania (rys. 2.2.6). Jednym z pierwszych przeglądów literatury omawianego obszaru, obejmującej systemy kolejkowe, jest

praca [235], gdzie przedstawiono przegląd modeli systemów n elementowych z okresu 1967-1981.



Rys. 2.2.6. Modele systemów kolejkowych z ograniczonym potencjałem obsługiwaną

W latach 80. XX w. powstało wiele prac analizujących problem funkcjonowania systemu obsługiwaną przy uwzględnieniu założeń teorii kolejek, szczególnie dla dwuelementowego systemu technicznego. Przykładowo, w pracy [164] przedstawiono model, w którym przeanalizowano gotowość i niezawodność systemu dwuelementowego, z rezerwą ciepłą i jednym stanowiskiem obsługiwaną.

W kolejnej pracy [163], przedstawiono modyfikację danego modelu, przy uwzględnieniu, że:

- system składa się z niejednakowych elementów,

- czasy poprawnej pracy elementów, naprawy, realizacji operacji kontroli stanu systemu oraz przeprowadzenia operacji odnowy profilaktycznej są opisane rozkładem dowolnym (*arbitrary p.d.f.*),
- element nadmiarowy stanowi rezerwę zimną systemu,
- przełącznik jest idealny.

Element pozostający w rezerwie natychmiast przejmuje funkcje operacyjne elementu pracującego, z chwilą kiedy jest on przekazywany na stanowisko obsługowe celem realizacji operacji naprawy lub odnowy profilaktycznej. Jeżeli operacja odnowy zakończy się przed uszkodzeniem elementu pracującego, element odnowiony zajmuje miejsce rezerwowego. Jeżeli jednak element pracujący uszkodzi się, a stanowisko remontowe jest zajęte – tworzy się kolejka. Oznacza to, że system przechodzi w stan niezdatności, jeżeli element pracujący ulegnie uszkodzeniu i stanowisko obsługowe nadal realizuje operacje odnowy drugiego komponentu.

Przyjmując dodatkową zmienną losową:

$$z(t) = \begin{cases} 1, & \text{gdy system niezdatny} \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (2.2.5)$$

- oczekiwany czas niezdatności systemu w okresie $(0,t)$:

$$E \left[\int_0^t z(u) du \right] = \int_0^t \rho_1(u) du \quad (2.2.6)$$

gdzie:

$\rho_1(t)$ – prawdopodobieństwo, że system znajduje się w stanie niezdatności w chwili t , pod warunkiem że w chwili początkowej oba elementy były zdatne

- funkcja niezawodności systemu:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \rho_2(u) du \quad (2.2.7)$$

gdzie:

$\rho_2(t)$ – prawdopodobieństwo, że system znajduje się w stanie niezdatności, jeżeli $z(u) \neq 1 \quad \forall 0 \leq u < t$; pod warunkiem, że w chwili początkowej oba elementy były zdatne

Przy założeniu rozkładów wykładniczych – łatwo znaleźć rozwiązanie danych równań wykorzystując operacje transformacji Laplace'a.

Modyfikacja omawianego modelu została przedstawiona m.in. w [13]. W modelu tym autorzy uwzględnili warunki niepełnej odnowy, poprzez założenie, że czasy poprawnej pracy są opisane różnymi rozkładami prawdopodobieństwa po każdej kolejnej naprawie (oczekiwany czas poprawnej pracy maleje po każdej kolejnej odnowie). Dodatkowo założono, że każdy element może być naprawiany maksymalnie N_n razy, co oznacza, że po (N_n+1) uszkodzeniu element podlega wymianie.

Funkcja gotowości systemu:

$$\begin{aligned}
A(t) = & \bar{F}_{1,1}(t) + f_{1,1}(t) * \bar{F}_{2,1}(t) + f_{1,1}(t) * [f_{2,1}(t) + \bar{F}_{A2}(t)] \bar{G}_1(t) + \\
& + \sum_{j=1}^{N_{no}-1} P_{2,1}^2(j,t) * \{ \bar{F}_{1,j+1}(t) + [f_{1,j+1}(t) * \bar{F}_{A1}(t)] \bar{G}_2(t) + P_{2,1}^1(j,t) * \{ \bar{F}_{2,j+1}(t) + \\
& + [f_{2,j+1}(t) * \bar{F}_{A2}(t)] \bar{G}_1(t) \} \} + P_{2,1}^2(N_{no},t) * \{ \bar{F}_{1,N_{no}+1}(t) + [f_{1,N_{no}+1}(t) * \bar{F}_{A1}(t)] \bar{G}_2(t) + \\
& + P_{2,1}^1(N_{no},t) * \{ \bar{F}_{2,N_{no}+1}(t) + [f_{2,N_{no}+1}(t) * \bar{F}_{A2}(t)] \} \}
\end{aligned} \tag{2.2.8}$$

gdzie:

$F_{i,j}(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia się i -tego elementu, gdy realizuje on zadania operacyjne przez j -ty okres,

$$(j = 1, 2, \dots, N_{no}+1)$$

$f_{i,j}(t)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia się i -tego elementu, gdy realizuje on zadania operacyjne przez j -ty okres,

$$(j = 1, 2, \dots, N_{no}+1)$$

$F_{Ai}(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu gotowości i -tego elementu

$P_{2,1}^1(j,t)$ – prawdopodobieństwo, że element 2 został włączony po jego j -tej naprawie w okresie $(t,t+dt)$, pod warunkiem, że w chwili $t = 0$ element nr 1 był włączony do systemu, po j -tej odnowie

$P_{2,1}^2(j,t)$ – prawdopodobieństwo, że element 2 został włączony po jego j -tej naprawie w okresie $(t,t+dt)$, pod warunkiem, że w chwili $t = 0$ element nr 1 był nowy i dopiero zaczynał pracę

Funkcja niezawodności systemu:

$$\begin{aligned}
R(t) = & \bar{F}_{1,1}(t) + f_{1,1}(t) * \bar{F}_{2,1}(t) + f_{1,1}(t) * [f_{2,1}(t) + \bar{F}_{A2}(t)] \bar{G}_1(t) + \\
& + \sum_{j=1}^{k-1} P_{2,1}^4(j,t) * \{ \bar{F}_{1,j+1}(t) + [f_{1,j+1}(t) * \bar{F}_{A1}(t)] \bar{G}_2(t) + P_{2,1}^3(j,t) * \{ \bar{F}_{2,j+1}(t) + \\
& + [f_{2,j+1}(t) * \bar{F}_{A2}(t)] \bar{G}_1(t) \} \} + P_{2,1}^4(k,t) * \{ \bar{F}_{1,k+1}(t) + [f_{1,k+1}(t) * \bar{F}_{A1}(t)] \bar{G}_2(t) + \\
& + P_{2,1}^3(k,t) * \{ \bar{F}_{2,k+1}(t) + [f_{2,k+1}(t) * \bar{F}_{A2}(t)] \} \}
\end{aligned} \tag{2.2.9}$$

gdzie:

$P^3_{2,1}(j,t)$ – prawdopodobieństwo, że element 2 został włączony po jego j -tej naprawie w okresie $(t,t+dt)$ i system jest zdatny w okresie $(0,t)$, pod warunkiem, że w chwili $t = 0$ element nr 1 był włączony do systemu, po j -tej odnowie

$P^4_{2,1}(j,t)$ – prawdopodobieństwo, że element 2 został włączony po jego j -tej naprawie w okresie $(t,t+dt)$ i system jest zdatny w okresie $(0,t)$, pod warunkiem, że w chwili $t = 0$ element nr 1 był nowy i dopiero zaczynał pracę

Rozwiązanie modelu analitycznego jest możliwe do uzyskania w prosty sposób tylko przy założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów ze względu na konieczność wyznaczenia splotów matematycznych omawianych funkcji losowych.

Z kolei w pracy [87] przedstawiono model analizujący niezawodność i gotowość n elementowego systemu z jednym stanowiskiem remontowym, przy założeniu polityki obsługiwaną bazującej na realizacji jedynie operacji odnowy korekcyjnej.

W omawianym modelu jeden element realizuje zadania operacyjne, podczas gdy pozostałe stanowią zimną rezerwę strukturalną systemu. Z chwilą, kiedy komponent uszkodzi się, jest on przekazywany na stanowisko obsługowe, a jego miejsce zajmuje element zapasowy. Jeżeli stanowisko obsługowe jest zajęte, element uszkodzony oczekuje w kolejce. System uważa się za niezdatny, jeżeli wszystkie jego elementy będą niezdatne. Model systemu opiera się na identyfikacji jego stanu w chwili t .

Przy założeniu:

- dowolnego charakteru czasów poprawnej pracy i czasów naprawy elementów,
- funkcjonowania idealnego przełącznika,

opracowano następujące charakterystyki systemu:

- funkcja gotowości systemu:

$$A_{n-1}(t) = R_i^1(t) + \int_0^t f_i(u) A_{n-2}(t-u) du \quad (2.2.10)$$

gdzie:

$A_i(t)$ – prawdopodobieństwo, że system znajduje się w stanie zdatności w chwili t , przy założeniu że w chwili $t = 0$ znajdował się w stanie i

$f_i(t)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas poprawnej pracy i -tego elementu

- oczekiwany czas przebywania systemu w stanie zdatności w okresie $(0,t)$:

$$T_{n-1}^o(t) = \int_0^t A_{n-1}(u) du \quad (2.2.11)$$

- funkcja niezawodności systemu:

$$R_{n-1}^1(t) = R_i(t) + \int_0^t f_i(u) R_{n-2}^1(t-u) du \quad (2.2.12)$$

gdzie:

$R_i^1(t)$ – prawdopodobieństwo, że system był zdalny do chwili t przy założeniu, że w chwili $t = 0$ znajdował się w stanie i

- oczekiwany okres zajętości stanowiska obsługiwanego w okresie $(0,t)$:

$$T_{n-1}^{SO}(t) = \int_0^t P_{n-2}^{SO}(t-u) du \quad (2.2.13)$$

gdzie:

$P_i^{SO}(t)$ – prawdopodobieństwo, że stanowisko obsługiwanego jest zajęte w chwili t , przy założeniu że w chwili $t = 0$ znajdował się w stanie i

Rozwiązanie analityczne przedstawionego modelu bazuje na wykorzystaniu modelu semi-odnowy (*semi-regenerative process*).

Jednakże przedstawione modele systemów kolejkowych zakładają, że realizowana polityka remontów jest zgodna z polityką FIFO (*first in, first out*). W rzeczywistych systemach często występuje problem istotności naprawy – elementy o krytycznym znaczeniu dla funkcjonowania systemu posiadają tzw. priorytet naprawy, co oznacza, że z chwilą ich uszkodzenia są one obsługiwane na stanowisku remontowym jako bezwzględnie pierwsze, nawet jeżeli wymaga to przerwania innych, realizowanych w danej chwili operacji odnowy. Szereg modeli uwzględniających ten szczególny rodzaj polityki napraw został opracowany m.in. w latach 80. XX w., z praktycznym zastosowaniem głównie w obszarze funkcjonowania systemów wojskowych.

Interesujący przykład został przedstawiony w pracach [129, 130], w których omówiono problem gotowości i niezawodności systemu dwuelementowego o strukturze szeregowej, w którym podsystemy: S_0 składa się z m_1 elementów o strukturze „ k z n ”, S_1 obejmuje funkcjonowanie m_2 elementów o strukturze szeregowej. Model matematyczny omawianego modelu opracowano przy wykorzystaniu procesów odnowy oraz transformacji Lorentza.

Ten sam problem priorytetowości odnów elementów systemu, został kontynuowany m.in. w pracach [178, 179] z uwzględnieniem, iż struktura niezawodnościowa podsystemów S_0 i S_1 jest równoległa.

Inny typ priorytetu w systemie obsługowym typu kolejkowego dotyczy rodzaju operacji odnowy. Powstało wiele modeli, w których realizacja procesów odnowy profilaktycznej ma pierwszeństwo w stosunku do zadań korekcyjnych, bez względu czy wiąże się to z koniecznością przerwania realizacji bieżącej naprawy. Tego typu problem został uwzględniony m.in. w pracy [235], w której rozważono n elementowy system z $r \geq 1$ liczbą stanowisk obsługiwania. Wykorzystaną strategią odnowy jest polityka wymiany okresowej według wieku systemu. Problemy optymalnego doboru parametrów polityki odnowy, jak również opracowania funkcji niezawodności oraz gotowości, zostały rozwiązane przy wykorzystaniu metody analitycznej z wykorzystaniem transformacji Lorenza.

Ostatni interesujący przykład uwzględnienia priorytetowości w procesie naprawy dotyczy typu uszkodzenia elementu. Przykładowo, zgodnie z modelem przedstawionym w [85], każdy element systemu może przebywać w jednym z trzech stanów: zdatności, częściowej niezdatności oraz niezdatności. Rozpatrywany jest system dwuelementowy z rezerwą gorącą i jednym stanowiskiem obsługowym. Priorytet odnowy posiada ten element, który uległ całkowitemu uszkodzeniu.

Biorąc pod uwagę, że każdy z elementów może znajdować się w jednym z trzech stanów niezawodności, jak również może oczekiwać na naprawę lub podlegać operacji odnowy, wyróżniono osiem stanów systemu. Wykorzystując procesy semi-Markowa wyznaczono funkcję gotowości oraz oczekiwany czas pomiędzy uszkodzeniami systemu.

Oprócz problemu ustalenia polityki remontowej z priorytetem określonego typu, szczególnie w przypadku systemów produkcyjnych oraz systemów wojskowych, warto zwrócić uwagę na zagadnienie ustalenia tzw. polityki nadgodzin (*overtime policy*). Zauważono, że z chwilą zwiększonego zapotrzebowania na usługi obsługiwania przy ograniczonym potencjale odnowy, wprowadzenie tzw. nadgodzin pozwala na redukcję niezbędnej liczby zapasów. Przykład analizy tego typu problemu został ujęty m.in. w pracach [212, 213], w których przedstawiono model symulacyjny systemu obsługiwania w celu porównania, jak zmiana określonych parametrów systemu (np. zmiana czasu zgłoszeń do systemu), przy pewnych ograniczeniach ekonomicznych, wpływa na efektywność jego funkcjonowania.

Jednakże należy podkreślić, że wszystkie przeanalizowane do tej pory grupy modeli obsługiwanych systemów technicznych z rezerwą strukturalną oraz potencjałem obsługowym zakładały, że stanowisko obsługowe jest niezawodne – tzn. zawsze może rozpocząć operację

odnowy. W rzeczywistych systemach założenie to nie musi być prawdziwe, gdyż wyposażenie stanowiska może ulec uszkodzeniu, a przez to uniemożliwić lub opóźnić jakiegokolwiek prace remontowe systemu obsługiwane. Ponadto pracownicy realizujący operacje obsługowe zwykle mają ograniczony czas pracy, co również może wpłynąć na niegotowość stanowiska remontowego w chwili pojawienia się zlecenia obsługi. Zagadnienie to zostało omówione w punktach 2.3 i 2.4.

Jeden z pierwszych modeli, uwzględniających brak możliwości realizacji zadań obsługowych ze względu na zawodność systemu obsługiwania bez wnikania w przyczyny, został przedstawiony w pracy [90]. Autorzy Gopalan i Saxena omówili problem niezawodności i gotowości systemu dwuelementowego z jednym stanowiskiem obsługiwania, podlegającym odnowie profilaktycznej. Założono, że po zakończeniu N_n -tej odnowy, system obsługiwania podlega odnowie profilaktycznej. Uwzględniając:

- warunki pełnej odnowy,
- dowolność rozkładu prawdopodobieństwa czasów oczekiwania systemu obsługiwania na odnowę profilaktyczną,
- idealność przełącznika,

wyznaczono, jakie możliwe zdarzenia mogą wystąpić w trakcie realizacji procesu eksploatacji. Wykorzystując matematyczny splot funkcji oraz transformację Laplace'a wyznaczono funkcje niezawodności oraz gotowości systemu, zgodne z następującymi formułami:

$$A_i(t) = a_{i,i+1} * A_{i+1}(t) + R(t) \quad (2.2.14)$$

gdzie:

$a_{i,i+1}$ – funkcja pomocnicza, wyznaczana następującą formułą:

$$a_{i,i+1}(t) = f(t)G(t) + g(t)F(t) \quad (2.2.15)$$

oraz:

$$R_i(t) = b_{i,i+1} * R_{i+1}(t) + R(t) \quad (2.2.16)$$

gdzie:

$b_{i,i+1}$ – funkcja pomocnicza, wyznaczana następującą formułą:

$$b_{i,i+1}(t) = f(t)G(t) \quad (2.2.17)$$

Z kolei w pracy [14] przedstawiono dwuelementowy system z jednym, losowo uszkodzającym się stanowiskiem obsługiwania uwzględniając, że:

- elementy systemu są niejednakowe,

- równoległa struktura niezawodnościowa, z rezerwą zimną,
- czasy poprawnej pracy systemu obsługiwanego i czasy jego odnowy są zgodne z rozkładem wykładniczym,
- każdy element podlega naprawom do N_n -tego uszkodzenia włącznie, przy czym z $(N_n + 1)$ uszkodzenie podlega wymianie,
- odnowa elementów systemu jest niepełna

oraz przyjmując:

- idealność przełącznika,
- warunki pełnej odnowy stanowiska obsługiwanego,
- politykę obsługiwanego elementów zgodną z FIFO,

wyznaczono funkcje gotowości i niezawodności z wykorzystaniem procesów odnowy:

$$A(t) = \bar{F}_{1,1}(t) + f_{1,1}(t) * \bar{F}_{2,1}(t) + \sum_{j=1}^{N_n} p_a^1(j,t) * \{ \bar{F}_{1,j+1}(t) + p_a^2(j,t) * \bar{F}_{2,j+1}(t) \} \quad (2.2.18)$$

gdzie:

$p_a^1(j,t)$ – prawdopodobieństwo, że przełączenie elementu 1 z rezerwy na pracę tuż po n -tej naprawie nastąpi w okresie $(t, t+dt)$, pod warunkiem że został on w chwili $t = 0$ włączony do systemu

$p_a^2(j,t)$ – prawdopodobieństwo, że przełączenie elementu 2 z rezerwy na pracę tuż po n -tej naprawie nastąpi w okresie $(t, t+dt)$, pod warunkiem że element nr 1 w funkcjonował chwili $t = 0$

$$R(t) = \bar{F}_{1,1}(t) + f_{1,1}(t) * \bar{F}_{2,1}(t) + \sum_{j=1}^{N_n} p_r^1(j,t) * \{ \bar{F}_{1,j+1}(t) + p_r^2(j,t) * \bar{F}_{2,j+1}(t) \} \quad (2.2.19)$$

gdzie:

$p_r^1(j,t)$ – prawdopodobieństwo, że przełączenie elementu 1 z rezerwy na pracę tuż po n -tej naprawie nastąpi w okresie $(t, t+dt)$ oraz system jest zdalny w okresie $(0, t]$, pod warunkiem że został on w chwili $t = 0$ włączony do systemu

$p_r^2(j,t)$ – prawdopodobieństwo, że przełączenie elementu 2 z rezerwy na pracę tuż po n -tej naprawie nastąpi w okresie $(t, t+dt)$ oraz system jest zdalny w okresie $(0, t]$, pod warunkiem że element nr 1 w funkcjonował chwili $t = 0$

Kontynuacja danego problemu została opracowana w [104]. W pracy tej podstawowe założenia przyjęte w procesie modelowania są zgodne z [14], z wyjątkiem następujących:

- w systemie pracują elementy jednakowe,
- elementy niepracujące stanowią ciepłą rezerwę strukturalną,
- przyjęto warunki pełnej odnowy zarówno systemu technicznego jak i systemu obsługiwanego.

Funkcja gotowości systemu:

$$A(t) = R(t) + h_{rez}(t) * R(t) \quad (2.2.20)$$

gdzie:

$h_{rez}(t)$ – gęstość odnowy zdarzenia włączenia elementu nadmiarowego do pracy z chwilą rozpoczęcia naprawy elementu uszkodzonego

Funkcja niezawodności systemu:

$$R(t) = R_{op}(t) + \sum_{j=1}^{n_f} p_{rez}(t) * R_{opj}(t) \quad (2.2.21)$$

gdzie:

n_f – liczba faz operacyjnych systemu

$p_{rez}(t)$ – prawdopodobieństwo, że zdarzenie włączenia elementu nadmiarowego, będącego w fazie j -tej, do pracy z chwilą rozpoczęcia naprawy elementu uszkodzonego wystąpi w okresie $(t, t+dt)$, oraz system jest zdatny w okresie $(0, t]$, pod warunkiem że w chwili $t = 0$ element pracujący rozpoczął pracę w fazie 0

Na szczególną uwagę zasługuje praca [217], w której autorzy przedstawili model n elementowego systemu strukturze szeregowej, z liczbą $r > 1$ stanowisk obsługiwanego. Wykorzystując procesy Markowa autorzy przeanalizowali, jaki wpływ ma gotowość systemu obsługiwanego na ogólne charakterystyki niezawodnościowe systemu wspieranego. Ponadto, wykorzystując programowanie nieliniowe przedstawiono model optymalizacji poziomu gotowości systemu.

Inny interesujący model uwzględniający problem niezawodności stanowiska obsługiwanego został przedstawiony w pracy [28]. Autor przeanalizował model systemu M/G/1, w którym stanowisko obsługiwanego jest c elementowym systemem o szeregowej strukturze niezawodności. Przy uwzględnieniu następujących założeń:

- czasy poprawnej pracy elementów stanowiska obsługiwanego opisane wykładniczym rozkładem prawdopodobieństwa, podczas gdy ich czasy naprawy zgodne z dowolnym rozkładem,
- warunki pełnej odnowy,
- szeregowo-strukturze niezawodnościowa systemu obsługiwanego,

wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodnościowe stanowiska remontowego z wykorzystaniem modelu SVM (*Supplementary Variable Method*).

Funkcja gotowości stanowiska obsługi można wyznaczyć zgodnie z formułą:

$$A(t) = P_{00}(t) + \int_0^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} P_{i0}(t, x) dx \quad (2.2.22)$$

gdzie:

$P_{00}(t)$ – prawdopodobieństwo, że w chwili t stanowisko obsługi jest zdadne i nie ma kolejki zgłoszeń

$P_{i0}(t, x)$ – prawdopodobieństwo, że w chwili t stanowisko obsługi jest zdadne, kolejka wynosi i zgłoszeń, i pozostały czas odnowy bieżącej naprawy mieści się w okresie $(x, x+dx)$

Ostatnia grupa modeli obejmuje problem zawodności przełącznika. W dostępnej literaturze teorii odnowy oraz wsparcia logistycznego, najczęstszym założeniem jest przyjęcie, że czas przełączania jest pomijalnie mały, a sam przełącznik nie podlega procesom uszkodzeń. Takie założenie jest możliwe jedynie w takim przypadku, gdy czasy przełączania oraz czasy odnowy przełącznika są niewielkie.

Założenie to nie zawsze jest spełnione w rzeczywistych warunkach funkcjonowania badanego obiektu technicznego, dlatego też opracowano szereg modeli systemu z rezerwą strukturalną, w których uwzględniono problem uszkodzalności przełącznika. Większość modeli z tego zakresu, analizujących obszar funkcjonowania systemów technicznych podlegających procesom odnowy, powstało w latach 80. XX w. Przegląd podstawowych modeli został opracowany m.in. w pracy [234].

Jeden z pierwszych przykładów analizy modelu systemu dwuelementowego o strukturze równoległej, z jednym stanowiskiem obsługi oraz zawodnym przełącznikiem, został przedstawiony w pracy [233]. W pracy tej stanowisko obsługi realizuje operacje odnowy uszkodzonych elementów oraz przełącznika, przy czym pierwszeństwo realizacji naprawy przyznano niezdatnemu elementowi. Z chwilą uszkodzenia się elementu, jego naprawa podejmowana jest natychmiastowo. Po zakończeniu odnowy, element jest przyłączany do systemu operacyjnego, jeżeli przełącznik jest zdalny. W przeciwnym wypadku, element musi poczekać aż zrealizowana zostanie odnowa przełącznika, po zakończeniu której, element rezerwowy systemu, jeżeli nadal jest zdalny, jest przywracany do systemu głównego. W sytuacji, gdy drugi element ulegnie uszkodzeniu przed przywróceniem pierwszego komponentu do pracy, system przechodzi w stan niezdatności, trwającej aż do chwili zakończenia odnowy przełącznika i jednego z elementów systemu.

Przy założeniu:

- system kolejkowy typu $M/M/G$,
- uszkodzenie przełącznika – wykrywane tylko w chwili kiedy jest on niezbędny (po odnowie elementów systemu operacyjnego),

wykorzystując model odnowy *RPT* (ang. *regenerative point technique*), oszacowano funkcje gotowości i niezawodności systemu. Przy wyznaczeniu form analitycznych zastosowano przekształcenia Laplace'a.

Kolejnym interesującym przykładem modelu zawodności przełącznika dwuelementowego systemu z jednym stanowiskiem obsługiwanym, jest praca [70]. W analizowanym modelu:

- priorytet naprawy przysługuje przełącznikowi,
- rozkład prawdopodobieństwa czasów naprawy elementu uszkodzonego w stanie rezerwy jest inny niż rozkład prawdopodobieństwa czasów naprawy elementu uszkodzonego w czasie realizacji zadań operacyjnych.

Pozostałe założenia oraz metoda rozwiązania pozostały zgodne z [233].

Modyfikacją przedstawionego problemu jest uwzględnienie w systemie dwóch przełączników. Jeden z przełączników służy do przełączania elementu ze stanu rezerwy do stanu operacyjnego, drugi przełącznik ma za zadanie przełączyć uszkodzony element do stanu naprawy. Szereg modeli przedstawiających zagadnienie zawodności danych przełączników z wykorzystaniem modelu odnowy *RPT*, w teorii procesów odnowy Markowa został opracowany w pracach [77, 80, 81, 82]. Funkcją celu danych modeli jest analiza wpływu procesu zawodności przełączników oraz ich odnowy profilaktycznej na podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu obsługiwanego.

Przedstawione podstawowe grupy modeli systemu z rezerwą strukturalną oraz określonym potencjałem obsługowym obejmują różny typ problemów, jakie są rozwiązywane w tym obszarze, jednocześnie wskazują na zróżnicowanie stopnia skomplikowania zagadnienia, a co za tym idzie konieczność uwzględnienia szeregu założeń upraszczających.

Problem analizy potencjału obsługowego systemu technicznego jest bardzo złożony ze względu na fakt, iż na potencjał obsługowy stanowiska roboczego wpływa:

- zdatność infrastruktury,
- niezawodność personelu,
- niezawodność wyposażenia wspierającego, itp.

W przedstawionym punkcie ograniczono analizę tylko do modeli, które zajmują się problemem dostępności stanowisk obsługiwanego bez wnikania, który z powyższych czynników jest bezpośrednią przyczyną ewentualnej ich niegotowości. W kolejnych rozdziałach skupiono się na poszczególnych źródłach potencjalnej niezdatności stanowiska obsługiwanego.

Podstawowa klasyfikacja dostępnych modeli systemu technicznego z potencjałem obsługiwanego przedstawiona została w tabelach 2.2.1 ÷ 2.2.2. Opis typu modelu został przedstawiony przy wykorzystaniu notacji Kendala.

Tabela 2.2.1. Podstawowa klasyfikacja modeli funkcjonowania systemu technicznego z uwzględnieniem potencjału obsługiwanian

<i>Typ systemu</i>	<i>Liczba stanowisk remontowych</i>	<i>Typ rezerwy</i>	<i>Struktura niezawodnościowa</i>	<i>Cel modelowania</i>	<i>Metoda modelowania</i>	<i>Przykładowe publikacje</i>
jednoelementowy	1	-	-	T_o	łańcuchy Markowa	[32]
jedno-/ dwuelementowy		-/zimna	-/równoległa	$A(t), A, R(t), MTBF, E[T_o]$	Model uszkodzeń: Stress-Strenght	[88] [89]
dwuelementowy		zimna	równoległa	$C_r(T), A(t)$	analityczna	[276]
				$C_s(T), P(n_s=n)$		[4]
				$R(t), A(t)$		[271]
				$A(t), A$		[214]
				procesy symulacji		[124]
n elementowy		gorąca	„k z n”	$R(t), A(t)$	analityczna/procesy symulacyjne	[49, 50, 51]
				$C_s(N, \alpha)$	procesy Markowa	[245]
				N_w	analityczna	[254]
	zimna	równoległa	$A(t), MSUP$	łańcuchy Markowa	[207]	
		szeregowo-równoległa	$A(t)$	programowanie nieliniowe	[215]	
n elementowy	1	ciepła	szeregowa	$A(t), R(t)$	analityczna	[120]
				$R(t)$		[91]
				$A(t), R(t)$	procesy Markowa	[42]
<i>MTBF</i> – Mean Time Between Failures (średni czas pomiędzy uszkodzeniami) <i>MSUP</i> – Mean System Up Time (średni czas zdatności systemu)				$P(n_s=n)$ – prawdopodobieństwo, że liczba uszkodzonych elementów wynosi n		

Tabela 2.2.2. Podstawowa klasyfikacja modeli kolejkowych systemów z potencjałem obsługiwaniam

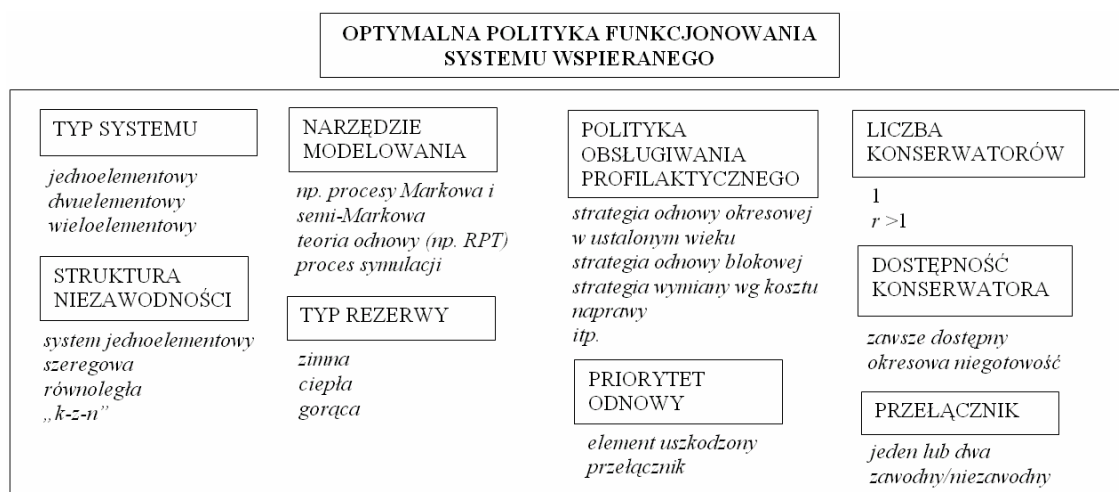
<i>Opis systemu*</i>	<i>Liczba stanowisk remontowych</i>	<i>Cel modelowania</i>	<i>Przykładowe publikacje</i>	<i>Uwagi</i>	
<i>M/O/M</i>	1	$\alpha_o, C_s(T)$	[92]	wykorzystanie algorytmu branch & bound	
		$A(t), R(t)$	[13, 14]	zawodność stanowiska remontowego	
[233]			zawodność przełącznika		
<i>M/M/G</i>		$A(t), A, R(t), E(N_{rf})$	[28]	zawodność stanowiska remontowego	
		$R(t), MTSF$	[160]	system z elementami zależnymi	
		$A(t), MTSF$	[85]		
		$A(t), MTSF, E[T_z]$	[70]	zawodność przełącznika	
		$A(t), A, R(t), MTSF$	[178, 179]		
<i>G/O/G</i>				[90]	odnowa profilaktyczna stanowiska obsługiwaniam
		$R(t), A(t), MDT, MTSF$	[163, 164]		
	$A(t), R(t), E[T_z]$	[87]			
<i>M/O/G</i>		$A(t), MTSF$	[77, 80, 81, 82]	dwa przełączniki	
<i>G/M/M</i>	$A(t), R(t)$		[234]	zawodność przełącznika	
			[235]		
<i>M/M/M</i>	<i>r</i>	$A(t)$	[217]		
N_{rf} – losowa liczba uszkodzeń stanowiska obsługiwaniam w okresie $(0, t]$ T_z – losowy czas zajętości stanowiska remontowego *A/B/C: A – rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy elementu pracującego B – rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy elementów rezerwowych (dla rezerwy zimnej $B = 0$) C – oznacza rozkład prawdopodobieństwa czasu naprawy elementów					

2.3. Modele z rezerwą strukturalną uwzględniające problem dostępności ekipy remontowej

Jednym z podstawowych czynników, od których zależy niezawodność obsługiwanego obiektu/systemu technicznego, jest dostępność i efektywność pracy ekip remontowych, w polskiej literaturze teorii odnowy zwanych konserwatorami.

W opinii autora, istotność zagadnienia dostępności konserwatora w chwili i miejscu pojawienia się takiej potrzeby jest poparta licznym dorobkiem literaturowym, opracowanym na przestrzeni ostatnich czterdziestu lat, analizującym szereg problemów związanych z brakiem możliwości realizacji procesów odnowy z przyczyn niegotowości odpowiedniej kadry remontowej. Za wyodrębnieniem z obszaru badań zagadnienia dostępności konserwatora wraz z wpływem na funkcjonowanie obsługiwanego systemu przemawiają:

- różnorodność czynników, jakie mają wpływ na prawidłowe zdefiniowanie optymalnej polityki funkcjonowania systemu wspieranego (rys. 2.3.1),
- szereg negatywnych konsekwencji, jakie wywołuje brak ekipy remontowej,
- problem opłacalności utrzymania szeregu konserwatorów w systemie,
- złożoność zagadnienia jak również inne podejście do problemu w porównaniu do poprzednio omówionych modeli.



Rys. 2.3.1. Podstawowe czynniki wpływające na dobór optymalnej polityki funkcjonowania systemu wspieranego [39, 106, 258]

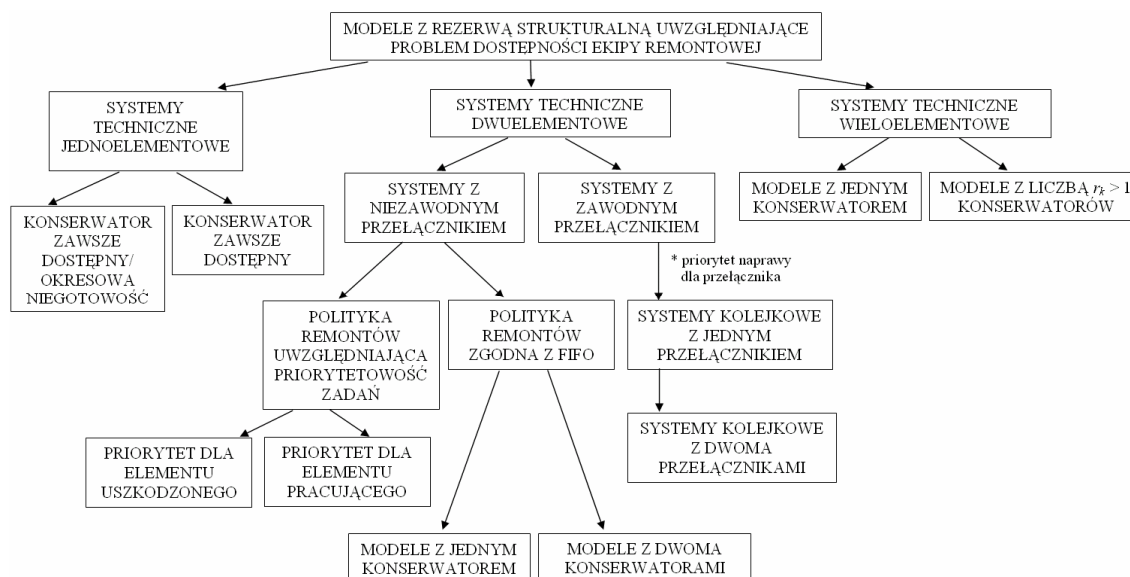
W większości opracowanych modeli, dostępnych w literaturze, zakłada się, że system techniczny jest lub może być poddany procesom odnowy natychmiast po wykryciu jego uszkodzenia (pełna gotowość stanowisk obsługiwanego oraz dostępność ekip remontowych). Jednakże w praktyce często wymagania odnośnie procesu obsługiwanego oraz inne czynniki (np. ekonomiczne) sprawiają, że nie ma możliwości podjęcia natychmiastowej obsługi, m.in. ze względu na:

- koszty związane z utrzymaniem systemu obsługi w pełnej gotowości, które są bardzo wysokie, stąd tendencja do ich obniżenia poprzez np. korzystanie z usług konserwatora w pewnych okresach czasu lub na wezwanie;
- realizowaną strategię odnowy – system obsługi również podlega procesom odnowy, w trakcie których (nawet jeżeli konserwator jest dostępny), nie są realizowane operacje przywrócenia zdadności systemu technicznego.

Ogólna klasyfikacja dostępnych modeli funkcjonowania systemu technicznego z uwzględnieniem dostępności ekipy remontowej może zostać przeprowadzona ze względu na dwa podstawowe kryteria: typu systemu oraz liczbę konserwatorów:

- systemy jedno- i wieloelementowe z jednym konserwatorem (*single-unit/multi-unit systems with one repairman*),
- systemy dwuelementowe z jednym/dwoma konserwatorami (*two-unit systems with one repairman/two repairmen*),
- systemy wieloelementowe z liczbą $r_k > 1$ konserwatorów (*multi-unit systems with r_k repairmen*).

Podstawowa klasyfikacja modeli z rezerwą strukturalną, uwzględniających problem dostępności ekipy remontowej, omawianych przez autora, została przedstawiona na rysunku 2.3.2.



Rys. 2.3.2. Modele z rezerwą strukturalną uwzględniające problem dostępności ekipy remontowej

W przypadku modeli analizujących system jednoelementowy problem badawczy przede wszystkim dotyczy braku dostępności konserwatora w chwili uszkodzenia się obiektu technicznego, ze względu na ograniczony czas pracy systemu obsługi. W dostępnej literaturze istnieją dwie koncepcje rozwiązań danego problemu:

1. Konserwator dostępny jest do chwili T_o^k , gdzie $0 \leq T_o^k \leq T$ i okres $[0, T]$ definiuje czas pracy systemu. Jeżeli obsługiwany system uszkodzi się w okresie $[0, T_o^k]$ realizowana jest operacja jego naprawy. Natomiast, gdy uszkodzenie nastąpi w okresie $(T_o^k, T]$, jego odnowa jest opóźniona do chwili rozpoczęcia kolejnego okresu pracy systemu. Tak przedstawiony model rozpatrywany jest m.in. w pracy [30]. Funkcja celu obejmuje optymalizację parametru T_o^k ze względu na kryterium funkcji oczekiwanego zysku w okresie pracy systemu (*expected reward function*), przy założeniu że konserwator jest dostępny do chwili T_o^k a system jest niezdatny, jeżeli N_u uszkodzeń nie zastało usuniętych.
2. System obsługiwaną funkcjonuje do chwili S_k , gdzie S_k oznacza chwilę zakończenia K -tej odnowy. Podobnie jak w w/w modelu, jeżeli system uszkodzi się w okresie $[0, S_k]$, podejmowana jest jego naprawa. Natomiast, gdy uszkodzenie nastąpi w okresie $(S_k, T]$, realizacja odnowy jest opóźniona do chwili rozpoczęcia kolejnego okresu pracy systemu. Przykład opisanej koncepcji przeanalizowano m.in. w pracy [31]. Podobnie jak w pracy [30], funkcja celu modelu wykorzystuje kryterium funkcji oczekiwanego zysku w okresie pracy systemu w procesie optymalizacji liczby N_k odnow. W modelu wykorzystano model wymiany mieszanej (*combined replacement model*).

Innym ciekawym przykładem modelu definiującego problem obsługi funkcjonowania systemu jednoelementowego jest praca [241], w której system może znaleźć się w jednym z trzech stanów niezawodności: zdatności, częściowej niezdatności oraz niezdatności.

W pracy tej, wykorzystując proces odnowy *RPT*, dokonano porównania dwóch modeli, w których:

1. konserwator jest zawsze dostępny,
2. może wystąpić okresowa niegotowość konserwatora.

Funkcja oczekiwanego zysku (*expected profit function*) w okresie $(0, t]$, przypadającego na jednostkę czasu, wyznaczana jako różnica między oczekiwanymi przychodami w badanym okresie a kosztami funkcjonowania systemu, opisana została następującą formułą:

$$C_{pf} = c_{rw}E[T_o] - c_rE[T_r] - c_vE[N_v] \quad (2.3.1)$$

gdzie:

c_{rw} – przychód na jednostkę czasu zdatności systemu

c_v – jednostkowy koszt wizyty konserwatora

N_v – losowa liczba wizyt konserwatora w systemie w okresie $(0, t]$

Jednocześnie, poza ogólnymi modelami jednoelementowymi, w których skupiono się na analizie zachowania obsługiwanych obiektów technicznych wraz z oceną ich podstawowych charakterystyk niezawodnościowych, pojawiły się prace, w których poruszane problemy można zaklasyfikować do siedmiu podstawowych grup (zgodnie z rys. 2.3.2):

- uwzględnienie wielozadaniowości systemu obsługiwanego (*PM*, *CM*, kontrole stanu systemu);
- uwzględnienie czasu opóźnienia realizacji procesów odnowy (*administrative delay time/arrival time*);
- priorytetowość realizowanych funkcji i zadań,
- obsługa systemu przez dwóch konserwatorów (regularny/ekspert) i ich wpływ na koszty funkcjonowania oraz charakterystyki niezawodnościowe systemu,
- zawodność przełącznika,
- wpływ dostępności $r_k \geq 1$ liczby konserwatorów na charakterystyki niezawodnościowe wieloelementowego systemu obsługiwanego,
- ‘zagadnienie konserwatora’ (*machine interference/repairman problem*)

Najczęściej omawianym w literaturze jest system dwuelementowy, w którym jeden element pełni zadania operacyjne, natomiast drugi stanowi jego rezerwę strukturalną, pełniąc funkcję części wymiennej.

Pierwsze modele funkcjonowania systemu technicznego z uwzględnieniem systemu obsługiwanego pojawiły się w latach 60. i 70. XX w. i dotyczyły przede wszystkim analizy stochastycznego zachowania się systemu wspieranego przy założeniu określonych rozkładów prawdopodobieństwa, definiujących charakter realizowanych procesów (np. [173]).

Podstawowe modele obsługiwanego systemu dwuelementowego z uwzględnieniem dostępności ekipy remontowej przede wszystkim opierają się na pewnych założeniach upraszczających, jak np.: niezależność elementów opisanych identycznymi rozkładami prawdopodobieństwa czasów poprawnej pracy i naprawy, przyjęcie warunków pełnej odnowy, realizacja procesu odnowy profilaktycznej zgodnej z ustaloną klasyczną strategią obsługiwanego. Celem danych modeli przede wszystkim jest wyznaczenie optymalnych parametrów obsługiwanego, które pozwolą na zapewnienie maksymalnego czasu operacyjnego systemu przy minimalnych kosztach jego funkcjonowania.

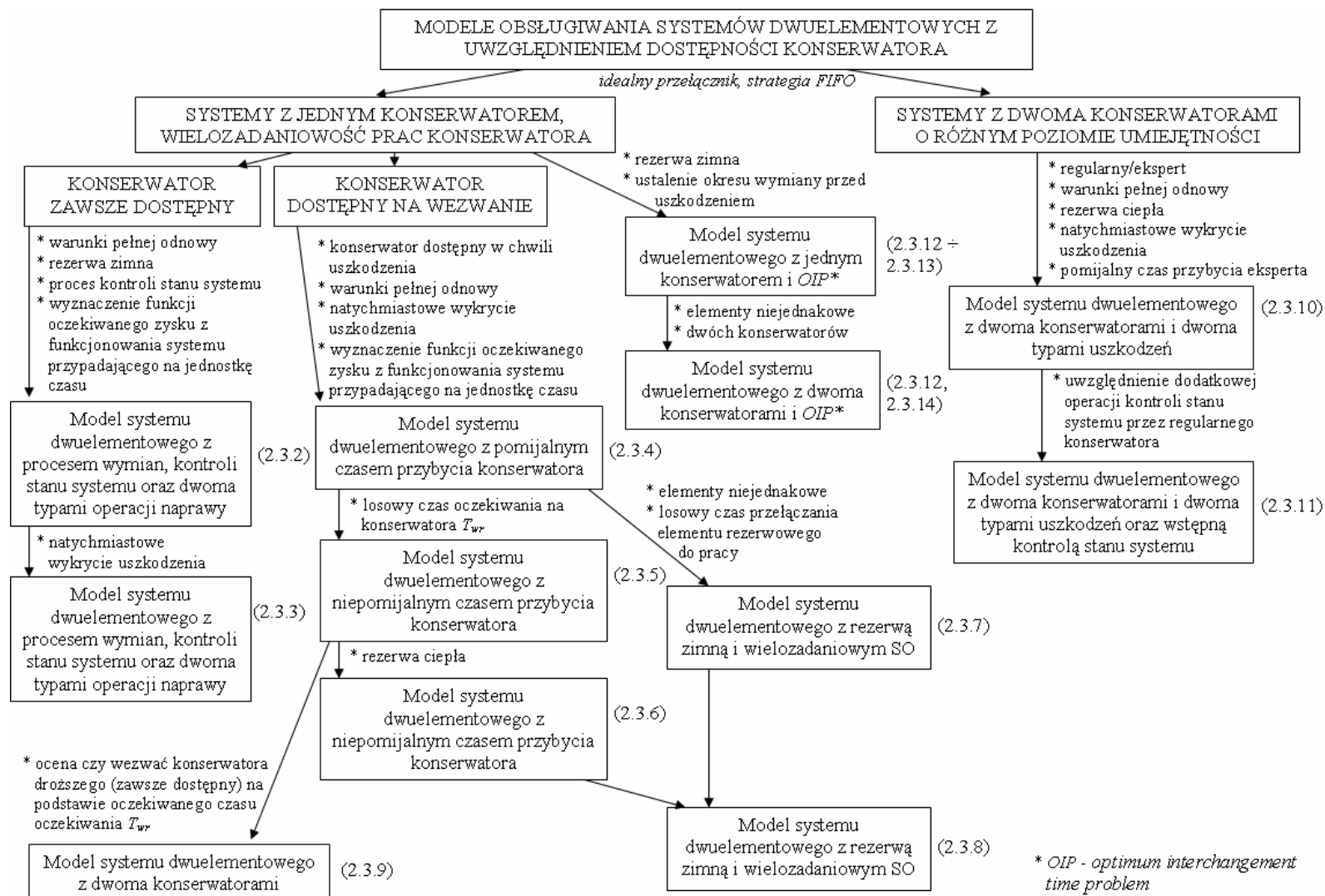
Jednakże w systemach, które funkcjonują w rzeczywistych warunkach operacyjnych nie stosuje się klasycznych postaci strategii odnowy:

- ze względu na ich niską efektywność,
- warunki pełnej odnowy zwykle nie mogą być spełnione,

- w systemie można wyróżnić różne typy uszkodzeń,
- konserwator często realizuje różne zadania obsługi (operacje kontroli stanu zdatności systemu, procesy odnowy profilaktycznej, naprawy uszkodzonych elementów systemu).

Dlatego też, w miarę rozwoju teorii odnowy oraz pojawienia się nowych problemów do rozwiązania, ogólne modele ulegały kolejnym modyfikacjom. Pierwszym zagadnieniem, zasługującym na szczególne zainteresowanie jest wielozadaniowość systemu obsługi.

Podstawowa klasyfikacja modeli obsługi systemów dwuelementowych z uwzględnieniem wielozadaniowego procesu obsługi, analizowanych w danej pracy, została przedstawiona na rysunku 2.3.3.



Rys. 2.3.3. Modele obsługi systemów dwuelementowych z uwzględnieniem dostępności konserwatora

Pierwsze prace w badanym obszarze zakładały, że system techniczny podlega operacjom kontroli stanu zdatności systemu, naprawy bieżącej oraz odnowy profilaktycznej, przy czym konserwator jest zawsze dostępny w chwili i miejscu wystąpienia potrzeby.

Przykładem może być praca [222], w której przeanalizowano podstawowe charakterystyki niezawodnościowe dwuelementowego systemu z rezerwą zimną, podlegającemu, z określonym prawdopodobieństwem, dwóm typom uszkodzeń.

Uszkodzenie elementu pracującego systemu jest wykrywane dzięki operacji diagnozy stanu obiektu. Z chwilą jego wykrycia składane jest zamówienie na nowy element wymienny. Jeżeli nowa część jest dostarczona przed zakończeniem naprawy, element jest wymieniany na nowy, w przeciwnym wypadku – następuje rezygnacja z zamówienia.

Przy uwzględnieniu następujących założeń:

- warunki pełnej odnowy,
- idealny przełącznik,
- czasy: poprawnej pracy elementów, operacji kontroli stanu systemu, oraz dostawy są zgodne z wykładniczym rozkładem prawdopodobieństwa,
- czasy naprawy opisane ogólnym rozkładem prawdopodobieństwa,

wykorzystując model odnowy *RPT*, wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu oraz analizę oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0, t]$, przypadającego na jednostkę czasu, opisanego formułą:

$$C_{pf} = c_{rw}E[T_o] - c_{rI}E[T_{rI}] - c_{rII}E[T_{rII}] - c_wE[T_w] - c_{inI}E[T_{inI}] - c_oE[N_o] \quad (2.3.2)$$

gdzie:

- c_{rI} – jednostkowy koszt odnowy elementu po uszkodzeniu typu I
- c_{rII} – jednostkowy koszt odnowy elementu po uszkodzeniu typu II
- c_{inI} – jednostkowy koszt operacji kontroli stanu systemu
- T_{rI} – losowy okres zajętości konserwatora ze względu na realizację operacji odnowy elementu po uszkodzeniu typu I
- T_{rII} – losowy okres zajętości konserwatora ze względu na realizację operacji odnowy elementu po uszkodzeniu typu II
- T_{inI} – losowy okres zajętości konserwatora ze względu na realizację operacji kontroli stanu systemu
- N_o – losowa liczba złożonych zamówień na elementy wymienne w okresie $(0, t]$

Przykładem wykorzystania omawianego modelu może być problem funkcjonowania systemu komputerowego, przedstawiony w pracy [76]. W modelu tym system składa się z

dwóch terminali i jednostki CPU. Elementy systemu podlegają uszkodzeniom typu software i hardware. Podobnie jak w pracy [222], do wyznaczenia charakterystyk niezawodnościowych systemu wykorzystano model odnowy *RPT*.

Jednakże bez względu na liczbę i rodzaj realizowanych operacji obsługiwanego, jednym z podstawowych parametrów, które determinują poziom niezawodności systemu wspieranego oraz wpływają na koszty jego funkcjonowania, jest dostępność ekipy remontowej. Ogólnie w teorii niezawodności można spotkać się z trzema koncepcjami uwzględniającymi problem dostępności konserwatora:

- modele, w których konserwator jest zawsze dostępny,
- modele uwzględniające okres opóźnienia realizacji odnowy (czas oczekiwania na przybycie konserwatora),
- modele uwzględniające dwa typy konserwatorów – tzw. regularny zawsze dostępny w systemie, realizujący wybrane operacje odnowy (najczęściej naprawy I-go typu), oraz konserwator – ekspert, wzywany w ściśle określonych sytuacjach.

Problem dostępności konserwatora został już wspomniany przy omawianiu systemów jednoelementowych. Jednakże najwięcej prac w tym obszarze powstało dla przypadku obsługi systemu dwuelementowego. Jedną z pierwszych prac wskazującą, iż czas opóźnienia, związany z oczekiwaniem na konserwatora, ma istotny wpływ na poziom kosztów funkcjonowania systemu wspieranego, jest praca [167].

W pracy tej dla dwuelementowego systemu o równoległej strukturze niezawodnościowej z rezerwą zimną porównano koszty jego funkcjonowania przy uwzględnieniu trzech różnych modeli obsługiwanego, w których:

1. konserwator jest zawsze dostępny, oczekując na uszkodzenie obiektu technicznego,
2. konserwator jest dostępny w chwili uszkodzenia – czas przybycia konserwatora pomijalnie mały,
3. uwzględnienie czasu oczekiwania na konserwatora – z chwilą uszkodzenia się elementu systemu, wzywany jest konserwator, który przybywa po losowym czasie T_{wr} . Czas oczekiwania na konserwatora jest ograniczony do ustalonego okresu T_{wr}^{\max} . Jeżeli odnowa nie rozpocznie się w planowanym czasie lub nastąpi uszkodzenie drugiego elementu – realizowane jest tzw. natychmiastowe awaryjne wezwanie konserwatora.

Przy uwzględnieniu założeń:

- idealny przełącznik,
- warunki pełnej odnowy,

- natychmiastowe wykrycie uszkodzenia,
- pomijalność czasu przybycia konserwatora systemu w przypadku wezwania awaryjnego,
- zgodność czasów poprawnej pracy elementów z wykładniczym rozkładem prawdopodobieństwa,

wykorzystując procesy semi-Markowa i model odnowy porównano poszczególne charakterystyki systemu, przy czym funkcja oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, przypadającego na jednostkę czasu opisano formułami:

$$C_{pf1} = c_{rw}E[T_o] - c_{vz} \quad (2.3.3)$$

gdzie:

- C_{pf1} – oczekiwany zysk z funkcjonowania systemu w jednostce czasu dla modelu 1.
- c_{vz} – jednostkowy koszt zatrudnienia konserwatora na jednostkę czasu

$$C_{pf2} = c_{rw}E[T_o] - c_r E[T_r] - c_v E[N_v] \quad (2.3.4)$$

gdzie:

- C_{pf2} – oczekiwany zysk z funkcjonowania systemu w jednostce czasu dla modelu 2.

$$C_{pf3} = c_{rw}E[T_o] - c_r E[T_r] - c_{vr} E[N_{vr}] - c_{va} E[N_{va}] \quad (2.3.5)$$

gdzie:

- C_{pf3} – oczekiwany zysk z funkcjonowania systemu w jednostce czasu dla modelu 3.
- c_{vr} – jednostkowy koszt regularnej wizyty konserwatora
- c_{va} – jednostkowy koszt awaryjnej wizyty konserwatora
- N_{vr} – losowa liczba regularnych wizyt konserwatora w okresie $(0,t]$
- N_{va} – losowa liczba awaryjnych wizyt konserwatora w okresie $(0,t]$

W kolejnej pracy [166] autorzy przedstawili dwuelementowy system z rezerwą ciepłą, funkcjonujący według trzeciego modelu obsługiwanego. Przy uwzględnieniu założeń zgodnych z [167] oraz wykorzystując model odnowy *RPT*, funkcja oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych:

$$C_{pf} = c_{rw}E[T_o] - c_{ro}E[T_{ro}] - c_{rs}E[T_{rs}] - c_{vr}E[N_{vr}] - c_{va}E[N_{va}] \quad (2.3.6)$$

gdzie:

- c_{ro} – jednostkowy koszt naprawy elementu uszkodzonego w stanie operacyjnym na jednostkę czasu
- c_{rs} – jednostkowy koszt naprawy elementu uszkodzonego w stanie rezerwy na jednostkę czasu
- T_{ro} – losowy czas odnowy elementu uszkodzonego w stanie operacyjnym

T_{rs} – losowy czas odnowy elementu uszkodzonego w stanie rezerwy

Rozwinięcie omawianego problemu zostało przedstawione m.in. w pracy [161], gdzie przeanalizowano podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu dwuelementowego z rezerwą zimną, składającego się z niejednakowych komponentów, przy uwzględnieniu:

- dowolnego rozkładu prawdopodobieństwa czasów poprawnej pracy, wymiany, naprawy oraz operacji kontroli stanu systemu;
- losowości czasu przełączenia elementu rezerwowego w stan operacyjny;

oraz założeniu, że wezwanie konserwatora następuje tylko w chwili pojawienia się uszkodzenia elementu pracującego.

Pozostałe założenia modelu zgodne z [222].

Przy wykorzystaniu procesów semi Markowa wyznaczono funkcję oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych:

$$C_{pf} = c_{rw}E[T_o] - c_{rl}E[T_{rl}] - c_{rll}E[T_{rll}] - c_vE[N_v] \quad (2.3.7)$$

Kolejna modyfikacja będąca syntezą modelu przedstawionego w pracy [222], oraz pracy [166], została przedstawiona w [150].

W omawianym modelu przedstawiono dwuelementowy system z rezerwą zimną, w którym po uszkodzeniu elementu pracującego, system oczekuje na przybycie konserwatora przez określony maksymalny okres czasu T_{wr}^{\max} , lub do chwili uszkodzenia się kolejnego elementu, po czym realizowane jest wezwanie awaryjne.

W modelu tym przyjęto założenia pracy [222], uwzględniając:

- okres spoczynku (*rest time*) – jeżeli element funkcjonuje poprawnie przez pewien okres czasu T , jest on przekazywany w stan spoczynku, przy założeniu że w danej chwili element rezerwowy jest zdalny oraz konserwator jest dostępny w systemie;
- czas przygotowania do realizacji naprawy typu I-go jest zmienną losową

Podstawowe charakterystyki niezawodnościowe tak zdefiniowanego modelu zostały opracowane przy wykorzystaniu modelu odnowy RPT. Funkcja oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych:

$$C_{pf} = c_{rw}E[T_o] - c_{rl}E[T_{rl}] - c_{rll}E[T_{rll}] - c_wE[T_w] - c_{in1}E[T_{in1}] - c_{F1}E[T_{F1}] - c_oE[N_o] \quad (2.3.8)$$

gdzie:

c_{F1} – jednostkowy koszt realizacji procesu przygotowania elementów do naprawy typu I.

T_{F1} – losowy czas realizacji procesu przygotowania elementów do naprawy typu I.

Ponadto, na szczególne zainteresowanie zasługuje praca [190], w której uwzględniono w procesie obsługiwanego tzw. czas opóźnienia administracyjnego (*administrative delay time*), przeznaczony na wezwanie konserwatora na miejsce uszkodzenia.

W pracy przedstawiono system dwuelementowy z rezerwą zimną, w którym każdy element może przebywać w jednym z trzech stanów niezawodnościowych. Z chwilą uszkodzenia elementu pracującego, wzywany jest konserwator, który przybywa po losowym okresie czasu. Po jego przybyciu, podejmuje on naprawę elementu uszkodzonego. Jeżeli w danym okresie częściowo uszkodzi się drugi element – uzyskuje on pierwszeństwo naprawy.

Uwzględniając założenia:

- idealny przełącznik,
- zgodność czasów naprawy oraz oczekiwania z rozkładem wykładniczym,
- opis czasów do uszkodzenia systemu ogólnym rozkładem prawdopodobieństwa,

przy wykorzystaniu modelu odnowy *RPT* wyznaczono oczekiwany czas poprawnej pracy systemu oraz funkcję gotowości.

W literaturze analizującej problem opóźnienia rozpoczęcia odnowy ze względu na brak konserwatora można wyróżnić także modele z tzw. dwoma typami konserwatorów.

Przykładem może być praca [168], w której przedstawiono dwuelementowy system z rezerwą zimną, obsługiwany przez dwóch konserwatorów o różnym czasie realizacji operacji odnowy oraz koszcie pracy.

Każde uszkodzenie systemu wiąże się z koniecznością wezwania konserwatora (tańszego). Jeżeli nie podejmie on realizacji operacji odnowy w ustalonym czasie T_{wr}^{max} naprawa jest podjęta przez drugiego konserwatora (droższego), który jest zawsze dostępny. W przypadku uszkodzenia systemu (oba elementy niezdatne) również podejmowana jest natychmiastowa odnowa przez drugiego konserwatora. Przy uwzględnieniu:

- funkcjonowania idealnego przełącznika,
- natychmiastowości i niezawodności wykrycia uszkodzenia,
- zgodności czasów poprawnej pracy elementów z rozkładem wykładniczym,
- opisu ogólnym rozkładem prawdopodobieństwa czasów naprawy (różny dla obu konserwatorów) oraz czasu oczekiwania,

wykorzystując procesy semi Markowa, funkcja oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0, t]$, w warunkach stacjonarnych:

$$C_{pf} = c_{rw}E[T_o] - c_{r1}E[T_{r1}] - c_{r2}E[T_{r2}] - c_{v1}E[N_{v1}] - c_{v2}E[N_{v2}] \quad (2.3.9)$$

gdzie:

- c_{r1} – jednostkowy koszt realizacji procesu odnowy przez pierwszego konserwatora na jednostkę czasu
- c_{r2} – jednostkowy koszt realizacji procesu odnowy przez drugiego konserwatora na jednostkę czasu
- c_{v1} – jednostkowy koszt wizyty pierwszego konserwatora
- c_{v2} – jednostkowy koszt wizyty drugiego konserwatora
- T_{r1} – losowy czas zajętości pierwszego konserwatora
- T_{r2} – losowy czas zajętości drugiego konserwatora
- N_{v1} – losowa liczba wizyt pierwszego konserwatora w okresie $(0,t]$
- N_{v2} – losowa liczba wizyt drugiego konserwatora w okresie $(0,t]$

W latach 90. XX w. pojawiło się wiele prac, w których wyróżniono dwóch konserwatorów ze względu na ich poziom umiejętności (regularny – zawsze dostępny oraz ekspert – dostępny na wezwanie), oraz wpływ ich dostępności na podstawowe charakterystyki niezawodnościowe dwuelementowego systemu technicznego.

Przykładem może być model funkcjonowania dwuelementowego systemu z rezerwą ciepłą, przedstawiony w pracy [240].

Element pracujący podlega częściowej lub pełnej niezdatności, przy czym komponent rezerwowy może ulec jedynie częściowej niezdatności. Regularny konserwator realizuje jedynie odnowy elementów częściowo niezdatnych. W przypadku wystąpienia pełnej niezdatności elementu wzywany jest ekspert.

Przy uwzględnieniu następujących założeń:

- warunki pełnej odnowy,
- polityka *FIFO* realizacji procesów obsługiwanie elementów niezdatnych,
- pomijalność czasu przybycia eksperta,
- wykładniczy charakter czasów poprawnej pracy elementów,
- dowolny charakteru czasów naprawy elementów,
- natychmiastowe i niezawodne wykrycie uszkodzenia elementu,

wykorzystując procesy semi Markowa i model odnowy *RPT* wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu oraz funkcję oczekiwanego profitu z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych:

$$C_{pf} = c_{rw}E[T_o] - c_{rg}E[T_{rg}] - c_{re}E[T_{re}] - c_{ve}E[N_{ve}] - c_{dw} \quad (2.3.10)$$

gdzie:

c_{rg} – jednostkowy koszt realizacji procesu odnowy przez regularnego konserwatora na jednostkę czasu

c_{re} – jednostkowy koszt realizacji procesu odnowy przez eksperta na jednostkę czasu

c_{ve} – jednostkowy wizyty eksperta

T_{rg} – losowy czas zajętości regularnego konserwatora

T_{re} – losowy czas zajętości eksperta

N_{ve} – losowa liczba wizyt eksperta w okresie $(0,t]$

Rozwinięcie danego modelu zostało opracowane w pracy [239], gdzie dodatkowo uwzględniono realizację tzw. wstępnej kontroli stanu systemu (*pre-inspection*). Z chwilą uszkodzenia się elementu pracującego, regularny konserwator przeprowadza operację wstępnej analizy, oceniając czy jest zdolny podjąć się naprawy, czy też należy wezwać eksperta.

Przyjmując podstawowe założenia, zgodne z [240], przy wykorzystaniu procesów semi Markowa i modelu odnowy *RPT*, wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodnościowe, przy czym funkcja oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych:

$$C_{pf} = c_{rw}E[T_o] - c_{rg}E[T_{rg}] - c_{re}E[T_{re}] - c_{ve}E[N_{ve}] \quad (2.3.11)$$

Na szczególne zainteresowanie zasługuje praca [229], w której uwzględniono możliwość niegotowości regularnego konserwatora do realizacji zadania operacyjnego w chwili i miejscu, kiedy nastąpi potrzeba (tzw. czas tolerancji – ang. *patience time*).

Podstawowe modele analizujące funkcjonowanie systemu obsługiwanego z regularnym konserwatorem i ekspertem zakładają, że czas przystąpienia do operacji odnowy przez regularnego konserwatora jest pomijalny. Jednakże w rzeczywistych systemach technicznych może wystąpić sytuacja, gdy konserwator nie może podjąć się realizacji zadania ze względów np. ekonomicznych, organizacyjnych lub z powodu realizacji innych zadań remontowych. W takiej sytuacji czas niezdatności systemu obsługiwanego wydłuża się, negatywnie wpływając na poziom jego charakterystyk niezawodnościowych.

Uwzględniając założenia zgodne z [239], dotyczące funkcjonowania systemu obsługiwanego oraz dodatkowo biorąc pod uwagę, że:

- ekspert wzywany jest w jednej z dwóch sytuacji: jeżeli regularny konserwator nie może podjąć się realizacji zadania, lub gdy upłynie założony czas oczekiwania na regularnego konserwatora,

- czasy poprawnej pracy, naprawy oraz oczekiwania na konserwatora regularnego są zgodne z dowolnym rozkładem prawdopodobieństwa,

wykorzystując model odnowy *RPT* wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodności systemu, przy czym funkcja oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0, t]$, w warunkach stacjonarnych jest zgodna z formułą (2.3.11).

Na szczególne zainteresowanie zasługuje także problem określenia optymalnego okresu wymiany elementu pracującego, tuż przed jego uszkodzeniem (*optimum interchangement time problem*), na rezerwy w celu minimalizacji kosztów funkcjonowania systemu obsługiwanego.

Jednym z przykładów analizujących omawiany problem jest model, przedstawiony w pracy [3]. Omówiono dwuelementowy system z rezerwą zimną i jednym konserwatorem. Wykorzystując metodę analityczną, problem optymalizacji opisano następującym układem równań, definiującym średni koszt t_n -tej jednostki czasu pracy elementu operacyjnego:

$$\begin{cases} C_r(t_n) = \frac{\sum_{i=1}^{t_n} C_{ri} + c_i}{t_n} \\ C_r(t_n + 1) > C_r(t_n) \\ C_r(t_n - 1) < C_r(t_n) \end{cases} \quad (2.3.12)$$

gdzie:

C_{ri} – całkowite koszty funkcjonowania systemu, jeżeli element pracujący jest wymieniany po i -tej jednostce czasu pracy:

$$C_{ri} = (1 - A)c_{rw} + c_r E[T_r] + c_v E[N_v] \quad (2.3.13)$$

c_i – jednostkowy koszt wymiany elementu (*interchangement cost*)

t_n – chwila wymiany elementu (*interchangement time*)

Modyfikacja przedstawionego modelu została przedstawiona m.in. w pracy [231], w której autorzy zaproponowali model optymalizacji czasu wymiany prewencyjnej elementu pracującego dla systemu dwuelementowego składającego się z elementów niejednakowych z rezerwą zimną, obsługiwanych przez dwóch konserwatorów (regularnego i eksperta).

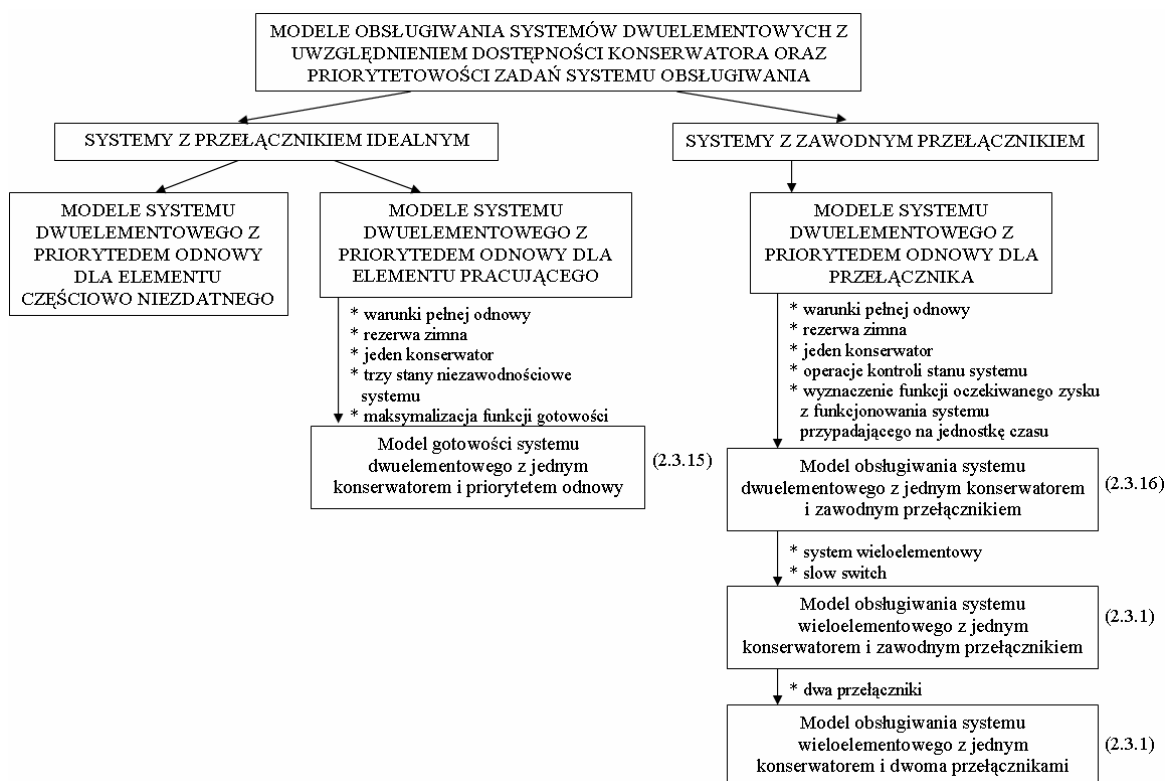
Problem optymalizacji opisano układem równań (2.3.12), przy czym całkowite koszty funkcjonowania systemu, jeżeli element pracujący jest wymieniany po i -tej jednostce czasu pracy, zostały opisane formułą:

$$C_{ri} = (1 - A)c_{rw} + c_{rg} E[T_{rg}] + c_{re} E[T_{re}] + c_{ve} E[N_{ve}] \quad (2.3.14)$$

Kolejnym interesującym zagadnieniem jest uwzględnienie priorytetowości zadań w systemie obsługi. Wcześniej omówione modele bazowały na wykorzystaniu strategii FIFO w procesie odnowy systemu technicznego. Jednakże, w dostępnej literaturze można wyróżnić szereg prac, w których system obsługi realizuje operacje odnowy według określonych reguł pierwszeństwa odnowy:

- pierwszeństwo naprawy przysługuje elementowi częściowo niezdatnemu w stosunku do elementu całkowicie niezdatnego (np. [101]);
- priorytet odnowy przypisany elementowi pracującemu w stosunku do komponentu nadmiarowego (np. [96, 121, 249, 250, 279, 280]).

Przegląd modeli obsługi systemów technicznych z uwzględnieniem dostępności konserwatora oraz priorytetowości zadań systemu obsługi, które są analizowane w dalszej części pracy, przedstawiono na rysunku 2.3.4.



Rys. 2.3.4. Modele obsługi systemów dwuelementowych z uwzględnieniem dostępności konserwatora oraz priorytetowości zadań systemu obsługi

Problem priorytetowości obsługi, zależny od poziomu niezdatności elementów systemu, został opisany m.in. w pracy [101]. Autorzy przedstawili dwuelementowy system z rezerwą zimną obsługiwany przez jednego konserwatora, w którym element systemu może znaleźć się w jednym z trzech stanów niezawodnościowych.

Wykorzystując procesy semi-Markowa, przy uwzględnieniu następujących założeń:

- wykładniczy charakter czasów poprawnej pracy elementów,
- czasy naprawy elementów zgodne z rozkładem ogólnym,
- idealny przełącznik,

system przeanalizowano pod kątem podstawowych charakterystyk niezawodnościowych.

Od początku lat 90. XX w. pojawiło się wiele prac, w których priorytet zarówno odnowy jak i pracy został przydzielony elementowi operacyjnemu w stosunku do komponentu rezerwowego.

W pracy [121] przedstawiono model funkcjonowania dwuelementowego systemu z rezerwą zimną oraz jednym konserwatorem, zawsze dostępnym. Przyjmując założenia:

- warunki pełnej odnowy,
- czasy poprawnej pracy i naprawy elementu operacyjnego opisane dowolnym rozkładem prawdopodobieństwa,
- proces funkcjonowania elementu rezerwowego opisany rozkładem wykładniczym,
- idealny przełącznik,

przeanalizowano gotowość systemu oraz podstawowe charakterystyki niezawodnościowe, wykorzystując procesy odnowy Markowa.

Przykładowo, wskaźnik gotowości systemu opisano formułą:

$$A = \frac{\lambda_o}{\lambda_o + \mu_o} + \frac{1}{\lambda_s} \frac{(1 - \bar{F}_o(\mu_s))(1 - \bar{F}_{s1}(\lambda_s))}{(\lambda_o + \mu_o)(1 - \bar{F}_o(\mu_s)\bar{F}_{s1}(\lambda_s))} \quad (2.3.15)$$

gdzie:

λ_i – intensywność uszkodzeń i -tego elementu (o – operacyjnego, s – rezerwowego)

$F_o(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasów poprawnej pracy elementu operacyjnego

$F_{s1}(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasów poprawnej pracy elementu nadmiarowego

W kolejnych latach pojawił się szereg modyfikacji omawianego modelu, uwzględniających:

- niejednakowość komponentów (np. [279]),
- dwa typy konserwatorów (np. [249, 250]),
- wieloelementowość systemu obsługiwanego (np. [96, 280]).

Modele te, wykorzystując procesy odnowy *RPT* przede wszystkim mają na celu analizę podstawowych charakterystyk niezawodnościowych systemu obsługiwanego.

Jednakże cechą wspólną omawianych dotychczas modeli jest założenie o wykorzystaniu w systemie idealnego przełącznika, co nie zawsze musi być zgodne z rzeczywistymi warunkami pracy analizowanego systemu. W pracy [98] autor przedstawił problem funkcjonowania dwuelementowego systemu z rezerwą zimną i jednym konserwatorem, w którym przełącznik funkcjonuje sprawnie z określonym prawdopodobieństwem p_{sw} .

W losowych chwilach czasu system podlega operacjom kontroli jego stanu zdatości. W przypadku wykrycia uszkodzenia, podejmowana jest jego odnowa. Przełącznik w danym momencie jest wykorzystywany do rozłączenia elementu uszkodzonego i podłączenia do pracy elementu rezerwowego. Przy założeniu:

- wykładniczego charakteru realizowanych procesów inspekcji, uszkodzania się elementów oraz ich odnowy;
- pierwszeństwa naprawy przysługującego przełącznikowi w stosunku do elementu uszkodzonego;
- warunków pełnej odnowy;

przy wykorzystaniu modelu odnowy *RPT* wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu obsługiwanego oraz funkcję oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych:

$$C_{pf} = c_{rw}E[T_o] - c_rE[T_r] \quad (2.3.16)$$

W kolejnej pracy [97], autorzy zaimplementowali w modelu idee tzw. powolnego przełącznika (*slow switch*), przy zachowaniu podstawowych założeń, zgodnych z [98].

Przyjęto, że czas przełączenia elementu rezerwowego w stanie operacyjnym trwa ustalony okres czasu T_s .

Funkcja oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych wyznaczana zgodnie z formułą (2.3.1).

Jednakże, w wielu systemach rzeczywistych, zwłaszcza w obszarze funkcjonowania systemów elektronicznych, niezbędne jest funkcjonowanie dwóch przełączników, celem zapewnienia zdatości operacyjnej obiektu technicznego. Przykład modelu systemu dwuelementowego z rezerwą zimną, jednym stanowiskiem obsługiwanym (jeden konserwator) oraz dwoma przełącznikami został przedstawiony m.in. w pracach [77] oraz [82].

Pierwszy z przełączników pełni funkcję włączania elementu rezerwowego do stanu operacyjnego. Drugi ma na celu przełączenie uszkodzonego elementu na stanowisko obsługiwanego. Przy uwzględnieniu, że:

- wykrycie uszkodzenia przełącznika następuje z chwilą jego wykorzystania,

- uszkodzenie przełączników następuje z określonym prawdopodobieństwem,
- przyjęto warunki pełnej odnowy,
- czasy poprawnej pracy elementu zgodne z wykładniczym rozkładem prawdopodobieństwa,
- czasy odnowy opisane ogólnymi rozkładami prawdopodobieństwa,
- czasy przełączenia są pomijalne,
- wykorzystano model odnowy *RPT* w procesach odnowy Markowa,

wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu oraz funkcję oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0, t]$, w warunkach stacjonarnych, zgodną z formułą (2.3.1).

Omówione modele dotyczą analizy funkcjonowania systemu dwuelementowego. Podstawowy przegląd dostępnych modeli w literaturze został przedstawiony w tabeli 2.3.1.

Tabela 2.3.1. Przegląd modeli systemów dwuelementowych z uwzględnieniem dostępności konserwatora

<i>Charakterystyki niezawodnościowe modelu</i>	<i>Liczba r_k</i>	<i>Typ rezerwy strukturalnej</i>	<i>Metoda modelowania</i>	<i>Przykładowe publikacje</i>
$R(t), MTSF$	1	zimna	model odnowy Markowa	[169]
$A(t), A, E(T_r), E(N_u), C_{pf}, MTSF$				[76, 82]
$A(t), A, E(N(t)), MTTFF$				[121]
$A(t), A, MTSF$			procesy semi-Markowa	[190]
$A, C_{pf}(t), C_{pfb}, MTSF$				[101]
$A(t), A, E(T_{rI}), E(T_{rII}), E(N_{vI}), E(N_{vII}), C_{pf}(t), C_{pf}$				[161]
$A(t), A, E(T_r), E(N_v), C_{pf}(t), C_{pf}$				[167]
$A(t), A, E(T_{rI}), E(T_{rII}), E(N_{vI}), E(N_{vII}), C_{pf}(t), C_{pfb}, MTSF, E(N_o), E(T_w)$				[150]
$A(t), A, MTTF, R(t), E(T_{rg}), E(T_{re}), E(N_{ve}), C_{pf}(t), C_{pfb}$				[229]
$A(t), A, E(T_r), E(N_v), C_{pf}(t), C_{pfb}, MTSF$			model odnowy <i>RPT</i>	[80, 96]
$MTSF, A(t), A, E(T_{up}), E(T_r), C_{pf}(t), C_{pf}$				[78]
$MTSF, A(t), A, E(T_r), E(N_v), C_{pf}(t), C_{pf}$				[77]
$MTSF, A(t), A, E(T_r), E(N_o), C_{pf}(t), C_{pf}$				[222]

<i>Charakterystyki niezawodnościowe modelu</i>	<i>Liczba r_k</i>	<i>Typ rezerwy strukturalnej</i>	<i>Metoda modelowania</i>	<i>Przykładowe publikacje</i>
$A(t), A, E(T_r), E(N_v), C_{pf}(t), C_{pf}$ MTSF	1	zimna	analityczna	[98]
$A(t), A, R(t), MTTFF, P_{idl}(t), P_{idl}$				[279]
$C_s(N, n), C_s(T, t)$				[137]
MTSF		ciepła	procesy semi-Markowa	[162]
$A(t), A, R(t), E(T_r), MTSF, C_{pf}(t), C_{pf}$				[166]
$A(t), A, MDT, MTBF$				[202]
MTSF, $A(t), E(T_r), E(N_v), C_{pf}$	2	zimna	analityczna	[74]
MTSF, $A(t), A, C_{pf}(t), C_{pf}, E(T_{rg}), E(T_{re}), E(N_{vg}), E(N_{ve})$				[239]
$A(t), A, MTSF, R(t), E(T_{r1}), E(T_{r2}), E(N_{v1}), E(N_{v2}), C_{pf}(t), C_{pf}$		ciepła	procesy semi-Markowa	[168]
MTSF, $A(t), E(T_{rg}), E(T_{re}), E(N_{vg}), E(N_{ve}), C_{pf}(t), C_{pf}$				[240]
MTSF, $A(t), A, E(T_{re}), E(N_{ve}), C_{pf}(t), C_{pf}$	2	gorąca	model odnowy RPT	[189]
MTSF, $A(t), A, E(T_{r1}), E(T_{r2}), E(N_{v1}), E(N_{v2}), C_{pf}(t), C_{pf}$				[83]

W dostępnej literaturze można znaleźć także szereg prac badających systemy wieloelementowe, w celu opracowania podstawowych funkcji opisujących charakterystyki niezawodnościowe systemu (np. [12, 52, 251]). Podstawowe modele rozwiązywane są z wykorzystaniem procesów odnowy, teorii Cauchy’ego, procesów Markowa, czy też teorii masowej obsługi.

Jednocześnie, klasyczna postać modelu systemu z rezerwą strukturalną, obsługiwanego przez $r_k \geq 1$ konserwatorów na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat uległa pewnym modyfikacjom, przy czym podstawowe z nich obejmują:

- uwzględnienie niejednakowości elementów pracujących w systemie (np. [86, 136]);
- zależności uszkodzeń poszczególnych elementów systemu (np. [114, 180]);
- analizę wpływu liczby $r_k > 1$ konserwatorów na podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu obsługiwanego (np. [8, 11, 93]).

Na szczególne zainteresowanie zasługuje praca [107], w której rozpatrzono n elementowy system z jednym konserwatorem wzywanym, gdy liczba N_u elementów ulegnie uszkodzeniu (ang. N_u policy). W systemie n_2 elementów operacyjnych realizuje zadania podstawowe,

podczas gdy s oczekuje w rezerwie. Jeżeli któryś z elementów uszkodzi się, jest zastępowany zapasowym (jeżeli ten jest dostępny), po czym podlega odnowie.

Uwzględniając założenia o:

- idealnym przełączniku,
- wykładniczym charakterze czasów poprawnej pracy elementów,
- warunkach pełnej odnowy,

z wykorzystaniem metody analitycznej oraz procesu symulacji wyznaczono, dla każdego typu rezerwowania strukturalnego, funkcję niezawodności systemu oraz średni czas do jego uszkodzenia ($MTTR$).

Podstawowa modyfikacja omawianego modelu obejmuje uwzględnienie funkcjonowania liczby $r_k > 1$ konserwatorów w systemie obsługiwanym. Przykładowo, w pracy [260] rozpatrzono n elementowy system techniczny, w którym n_2 elementów pracuje a s pozostaje w rezerwie ciepłej oraz r_k konserwatorów realizuje operacje odnowy. Przy uwzględnieniu założeń przedstawionych w [107], oraz przyjmując, że każdy konserwator może odnawiać tylko jedną maszynę w danej chwili, wykorzystując procesy odnowy oraz transformację Laplace'a, wyznaczono funkcję niezawodności systemu.

W kolejnej pracy [103] przeanalizowano gotowość systemu n elementowego o strukturze niezawodnościowej typu „ k z n ”. Natomiast w pracy [102], przedstawiono problem optymalizacji liczby konserwatorów realizujących zadania odnowy poszczególnych podsystemów systemu o strukturze szeregowej, wg kryterium minimalizacji całkowitych kosztów jego funkcjonowania, przy ograniczeniu poziomu gotowości:

$$\begin{cases} \min C_r = \sum_{j=1}^{n_s} c_{rk} r_{kj} \\ A(t_g) \geq A_g \\ r_{kj} \leq r_{kj}^{\max} \end{cases} \quad (2.3.17)$$

gdzie:

n_s – liczba podsystemów połączonych szeregowo

c_{rk} – koszt pracy konserwatora realizującego odnowę j -tego podsystemu

r_{kj} – liczba konserwatorów w j -tym podsystemie

r_{kj}^{\max} – maksymalna liczba konserwatorów, która może realizować operacje odnowy w j -tym podsystemie

$A(t_g)$ – gotowość systemu w losowej chwili czasu t_g

A_g – wymagany minimalny poziom gotowości systemu w losowej chwili czasu t_g

Rozwiązanie modelu, pozwalającego na wyznaczenie optymalnej liczby konserwatorów w systemie, zostało opracowane przy wykorzystaniu programowania dynamicznego.

Po roku 2000., pojawił się szereg prac analizujących problem niezawodnego funkcjonowania wieloelementowego systemu naprawialnego o strukturze niezawodnościowej typu „ k z n ”, obsługiwane przez liczbę r_k konserwatorów. Opublikowano wiele prac z danego zakresu wykorzystujących m.in. procesy Markowa (np. [8, 11, 67]), teorię zbiorów rozmytych (np. [93]), czy modele odnowy (np. [272]).

Ponadto, analizując stan wiedzy z zakresu modelowania systemów technicznych, obsługiwanych przez określoną liczbę i typ konserwatorów, nie można pominąć tzw. ‘zagadnienia konserwatora’.

„Przyjmując założenia, że czasy poprawnej pracy elementów są zmiennymi losowymi o takim samym (dowolnego typu) rozkładzie prawdopodobieństwa i czasy obsługi mają również jednakowy (dowolnego typu) rozkład, proces funkcjonowania systemu można badać przy wykorzystaniu procesów masowej obsługi, traktując pojawiające się uszkodzenia jako strumień zgłoszeń obsługiwanych przez pewną liczbę konserwatorów, [133]. Jeżeli liczba konserwatorów r_k jest mniejsza od liczby elementów systemu n , to w systemie obsługiwania może pojawić się kolejka do $(n - r_k)$ zgłoszeń.

W literaturze polskiej tego typu systemy masowej obsługi zostały wyczerpująco omówione m.in. w pracach [73, 131, 133].

Z kolei w literaturze zagranicznej, omawiane zagadnienie jest definiowane jako problem odnowy maszyn (ang. *machine interference/repair problem lub machine repairman problem*). Przegląd podstawowych modeli został przedstawiony m.in. w [39], gdzie ujęto analizę prac, które ukazały się w latach 70. i 80. XX w. Kolejny przegląd przedstawiono w pracy [106], gdzie omówiono modele, które ukazały się po 1985 roku, klasyfikując je m.in. według typu systemu masowej obsługi, dostępności stanowiska obsługiwanego, typu obiektów technicznych, wykorzystywanej reguły zgłoszeń do systemu, czy kryteriów optymalizacji.

Podstawowe problemy, jakie są analizowane w badanym obszarze naukowym, obejmują:

- dobór strategii obsługiwanego (np. [9, 115, 165, 181]);
- analizę charakterystyk typowych dla systemów masowej obsługi (np. [68, 192, 193, 256, 261]);
- wpływ organizacji zaopatrzenia zasobów wspierających na gotowość systemu obsługiwane (np. [58]),
- optymalizację niezbędnej liczby konserwatorów (np. [68, 274]).

W modelach tych przede wszystkim wykorzystywane są procesy Markowa [67], procesy symulacji [8, 58], czy modele odnowy [115, 251, 272].

Różnorodność rozpatrywanych problemów w obszarze modelowania systemów technicznych, obsługiwanych przez liczbę r_k konserwatorów wskazuje na znaczne zainteresowanie danym zagadnieniem na przestrzeni ostatnich czterdziestu lat. Jednakże żadna z omawianych grup modeli nie uwzględnia m.in.:

- możliwości popełnienia błędu przez konserwatora, czy
- wpływu zmiennych warunków otoczenia na realizowane zadania obsługiwanie.

W rzeczywistych systemach (np. transportowych) człowiek bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo i efektywność realizowanych operacji obsługiwanie. *„Przy ocenie niezawodności systemu trzeba więc brać pod uwagę nie tylko uszkodzenia części technicznej systemu, ale także możliwość popełnienia błędu przez konserwatora”* [262].

Problem modelowania niezawodnościowego człowieka jest zagadnieniem skomplikowanym ze względu na konieczność uwzględnienia, oprócz teorii niezawodności, także psychologii, socjologii, ergonomii, czy fizjologii człowieka. Obecnie istnieje szereg prac, poświęconych problemom wpływu błędu konserwatora na ogólne charakterystyki niezawodnościowe systemu obsługiwanego. W Polsce jedną z wczesnych prac analizujących ten problem jest [262]. W literaturze zagranicznej wpływ fizycznej kondycji konserwatora na intensywność procesu napraw, a tym samym gotowość systemu, został przeanalizowany m.in. w [75, 79].

Przykład analizy systemu jednoelementowego, obsługiwanego przez konserwatora, który może znajdować się w danej chwili t w „dobrej” lub „złej kondycji” został przedstawiony w [75].

System może uszkodzić się z powodu:

- usterki technicznej,
- błędu operatora, pomimo że jest on w dobrej kondycji,
- błędu operatora, gdy jest on w złej kondycji.

Operator rozpoczyna pracę będąc w dobrej kondycji, która może ulec pogorszeniu z intensywnością λ_a . Intensywność jego poprawy kondycji z kolei wynosi λ_b . Uwzględniając założenia:

- czasy poprawnej pracy elementu zgodne z rozkładem wykładniczym,
- czasy odnowy opisane dwoma rozkładami prawdopodobieństwa, w zależności od typu kondycji konserwatora,
- prawdopodobieństwo że w chwili t konserwator jest w dobrej kondycji wynosi p_λ ,

- idealny przełącznik,

wykorzystano model odnowy *RPT* do wyznaczenia podstawowych charakterystyk niezawodnościowych oraz funkcji oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych, wyznaczanej zgodnie z formułą (2.3.16).

Z kolei w pracy [79] przedstawiono model dwuelementowego systemu z rezerwą zimną i jednym konserwatorem o określonej kondycji fizycznej (dobra/zła). Istotne jest także, że oprócz analizy wpływu zdolności operacyjnej konserwatora na gotowość systemu, w modelu tym uwzględniono także zawodność przełącznika, odpowiedzialnego za włączenie elementu rezerwowego do pracy z chwilą uszkodzenia się komponentu pracującego.

Podstawowe założenia modelu obejmują:

- pierwszeństwo naprawy przysługuje elementowi operacyjnemu,
- prawdopodobieństwo poprawnej pracy przełącznika wynosi p_{sw} .

Pozostałe założenia zgodne z [75].

Wykorzystując model odnowy *RPT* oraz diagram stanów systemu wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu oraz funkcję oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych, zgodną z formułą (2.3.16).

Kolejne zagadnienie, zasługujące na zainteresowanie, dotyczy analizy wpływu warunków otoczenia na funkcjonowanie systemu naprawialnego.

W pracy [84] przedstawiono wpływ warunków pogodowych uwzględniając, że:

- system posiada trzy stany niezawodnościowe,
- czasy poprawnej pracy elementów oraz czasy zmiany warunków pogodowych zgodne z rozkładem wykładniczym,
- czasy naprawy opisane dowolnym rozkładem prawdopodobieństwa, niezależnym od zmian pogody,
- w systemie zawsze dostępny jest jeden konserwator,
- warunki pełnej odnowy,
- konserwator realizuje operację kontroli warunków pogodowych, z chwilą gdy element przejdzie w stan częściowej niezdatności.

Przy wykorzystaniu modelu odnowy *RPT* wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu oraz funkcję oczekiwanego zysku z funkcjonowania systemu w okresie $(0,t]$, w warunkach stacjonarnych, zgodną z formułą (2.3.4).

Z kolei w pracy [228] uwzględniono wpływ zmiennego otoczenia na funkcjonowanie systemu trzelementowego, obsługiwanego przez jednego konserwatora.

Otoczenie systemu przyjmuje jeden z dwóch poziomów, przy czym zmiana poziomu pierwszego na drugi odbywa się z intensywnością λ_{a1} . Natomiast zmiana poziomu drugiego na pierwszy odbywa się z intensywnością $\lambda_{\beta1}$.

Uwzględniając założenia modelu:

- warunki pełnej odnowy systemu,
- konserwator zawsze dostępny,
- wykładniczy charakter czasów poprawnej pracy elementów, zależny od poziomu otoczenia zewnętrznego systemu,

przy wykorzystaniu procesów Markowa, wyznaczono funkcje gotowości, niezawodności oraz częstotliwość uszkodzeń systemu.

Podsumowując, przeanalizowane grupy modeli systemu z rezerwą strukturalną oraz określoną dostępnością konserwatorów pozwoliły na zdefiniowanie podstawowych problemów, jakie analizowano w tym obszarze naukowym na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat. Jednocześnie, przeprowadzone studia literaturowe pozwalają na zwrócenie uwagi, że modele te nie obejmują szeregu problemów, jakie mogą pojawić się w rzeczywistych systemach technicznych, np.:

- brak analizy parametrów organizacyjnych pracy konserwatora (czas przybycia eksperta pomijalny, brak współpracy między konserwatorem regularnym a ekspertem, itp.);
- brak analizy wpływu negatywnego i celowego działania konserwatora w systemie.

2.4. Pozostałe modele wsparcia logistycznego

Analizując stan wiedzy obejmujący zagadnienie wsparcia logistycznego funkcjonowania systemów technicznych (wojskowych, transportowych, produkcyjnych, itp.) można także wyróżnić szereg dodatkowych problemów, związanych z realizacją przepływów materiałowych oraz niezbędnej informacji. Główne z nich przedstawiono poniżej.

2.4.1. Problem optymalnej organizacji procesu transportowania niezbędnych zasobów logistycznych

W opisanych grupach modeli systemu wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego problem organizacji procesu transportowego był na ogół pomijany (T_{tr} pomijalny). Jedynie w pracy [92] zwrócono uwagę na konieczność uwzględnienia w procesie modelowania systemu logistycznego realizacji procesów transportowych, jednakże przyjęte założenia, zgodne z teorią masowej obsługi, pozwoliły na uproszczenie analizowanego problemu poprzez włączenie fazy transportowej do procesu naprawy systemu.

Zagadnienie modelowania procesów transportowych w analizowanym obszarze badań przede wszystkim obejmuje dwa podstawowe problemy:

- proces optymalizacji zadań transportowych w systemie (np. [5, 201, 284],
- zagadnienie utrzymania środków transportowych na określonym poziomie użytkowania (np. [119, 204].

Podstawowe metody modelowania omawianych zagadnień wykorzystują procesy Markowa [284], założenia masowej obsługi [119], oraz procesy symulacji [204].

Przykład modelu optymalizacji kosztów zapasów oraz transportowania w systemie logistycznym został przedstawiony w [5].

W pracy przeanalizowano proces zaopatrzenia przedsiębiorstwa produkcyjnego w części z magazynu głównego. Wieloetapowy proces produkcji jest zasilany z centrali magazynowej, przy wykorzystaniu procesu transportowego pod warunkiem, że koszty transportu są niższe niż koszty utrzymania zapasów w magazynie przedsiębiorstwa. Wykorzystano system zaopatrzenia typu ssącego „pull”, bazującego na koncepcji *JiT* (*Just in Time*).

Uwzględniając podstawowe założenia modelu:

- deterministyczny popyt na produkty finalne,
- ustalona wielkość produkcji na każdym etapie produkcyjnym,
- ograniczenie powierzchni magazynowej,
- ustalona wielkość minimalnej partii zamówienia,
- skończony horyzont planowania,

model optymalizacji funkcjonowania systemu logistycznego obejmuje minimalizację kosztów zapasów oraz transportowania.

Problem utrzymania środków transportowych na założonym poziomie użytkowania został w przystępny sposób przedstawiony w pracy [119], gdzie omówiono model niezawodnościowy i kosztowy systemu pojazdów przeznaczonych do realizacji losowej liczby zadań.

W procesie modelowania matematycznego wykorzystano założenia masowej obsługi, przy uwzględnieniu dodatkowych założeń:

- system dysponuje określoną liczbą pojazdów,
- system realizuje wszystkie zgłoszenia zadań transportowych nawet jeżeli do wykonania ich części istnieje konieczność wynajęcia pojazdów z innego systemu,

wyznaczono:

- gotowość systemu pojazdów do realizacji sumarycznego zadania przy wykorzystaniu tylko własnych pojazdów:

$$A(T) = \frac{W_{wl}(T)}{W_{pop}(T)} \quad (2.4.1.1)$$

gdzie:

$W_{wl}(T)$ – sumaryczne zadanie systemu możliwe do realizacji przy wykorzystaniu tylko własnych pojazdów

$W_{pop}(T)$ – sumaryczne zadanie transportowe nakładane na system pojazdów

- średnie koszty funkcjonowania systemu pojazdów w kolejnych okresach T_i :

$$\bar{C}_s(T) = \frac{1}{n_{T_i}} \sum_{i=1}^{n_2} C_s(T_i) \quad (2.4.1.2)$$

gdzie:

n_{T_i} – liczba podokresów prognostycznych T_i

Jednocześnie za kryterium racjonalizacji systemu pojazdów przyjęto maksimum wartości oceny systemu postaci:

$$\bar{K}(T) = w_1 A(T) + (1-w) \frac{c_{wy} \bar{D}}{\bar{C}_s(T)} \quad (2.4.1.3)$$

gdzie:

w_1 – współczynnik wagi z jakim gotowość systemu wpływa na wartości funkcji oceny systemu

c_{wy} – jednostkowy koszt wykonania zadania transportowego własnym pojazdem

D – zmienna losowa definiująca zapotrzebowanie na pojazdy

Innym ciekawym zagadnieniem jest problem ustalenia optymalnego harmonogramu wymiany pojazdów w przedsiębiorstwie transportowym, przedstawiony w pracy [204].

W omawianym modelu problem decyzyjny sformułowano w postaci zadania wielokryterialnego programowania kombinatorycznego. Jednym z kryteriów decyzyjnych przyjęto średni współczynnik gotowości taboru w okresie prognostycznym T :

$$\bar{A}(T) = \left(\sum_{i=1}^{n_3+n_3'} \sum_{j=1}^{n_2} A_{ij} z_{ij} \right) \left(\sum_{i=1}^{n_3+n_3'} \sum_{j=1}^{n_2} z_{ij} \right)^{-1} \quad (2.4.1.4)$$

gdzie:

n_3 – liczba pojazdów z danego przedziału ładowności, aktualnie eksploatowanych w przedsiębiorstwie transportowym

n_3' – liczba pojazdów, które potencjalnie mogą zostać wprowadzone do eksploatacji w danym przedsiębiorstwie transportowym w okresie prognostycznym T

z_{ij} – zmienna binarna, wyrażona wzorem:

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{gdy } i\text{-ty pojazd eksploatowany jest w } j\text{-tym podokresie okresu } T \\ 0, & \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases} \quad (2.4.1.5)$$

Model opracowano dwuetapowo: przy wykorzystaniu metody metaheurystycznej (PSA) oraz, w drugim kroku, poprzez wygenerowanie rozwiązania najlepszego z wykorzystaniem metody interaktywnej (LBS).

2.4.2. Problem dostępności wyposażenia wspierającego i jej wpływ na charakterystyki niezawodnościowe systemu obsługiwanego

Prawidłowe funkcjonowanie stanowiska remontowego zależy z jednej strony od gotowości konserwatora, ale także od liczby i niezawodności dostępnych urządzeń i narzędzi wspierających.

Również i w tym obszarze obecny stan wiedzy pozwala na wyróżnienie szeregu podstawowych zagadnień, jak:

- analiza niezawodności wyposażenia wspierającego, niezbędnego do realizacji zadań podstawowych, (ogólne modele – np. [205], czy modele analizujące niezawodność konkretnych systemów technicznych – np. układu wentylacji i klimatyzacji – [170], czy wyposażenia serwisu klienta – [146]);
- problem zawodności wyposażenia obsługiwanego na stanowisku remontowym (uszkodzone wyposażenie podlega operacjom wymiany) (np. [28, 29]);

- optymalizacja liczby zapasów części wymiennych oraz wyposażenia testowego w celu ekonomicznego funkcjonowania systemu obsługiwanego (np. [7]).

Podstawowe metody modelowania problemu dostępności wyposażenia wspierającego procesy obsługiwanego przede wszystkim obejmują procesy odnowy Markowa [29, 95, 205], programowanie dynamiczne [146], oraz procesy symulacji [7].

Na szczególne zainteresowanie zasługują prace [29, 95], w których przedstawiono problem funkcjonowania systemu dwuelementowego, przy założeniu że wyposażenie wspierające może ulegać procesom losowego uszkodzania się w czasie.

Zakładając:

- funkcjonowanie idealnego przełącznika,
- przyjęcie warunków pełnej odnowy systemu,
- wykładniczy charakter czasów poprawnej pracy i uszkodzeń wyposażenia wspierającego,
- realizację procesów odnowy polegającej na wymianie uszkodzonego elementu,

wyznaczono podstawowe charakterystyki niezawodnościowe systemu obsługiwanego oraz wyposażenia, w tym:

- prawdopodobieństwo wymiany uszkodzonego wyposażenia wspierającego w chwili t :

$$P_{wi} = \frac{\lambda_{rf} \mu_{rf} (\mu_1 + \mu_2)}{\int_0^{\infty} t d(F_1(t)G_2^{rf}(t) + F_2(t)G_1^{rf}(t))} \quad (2.4.2.1)$$

gdzie:

λ_{rf} – intensywność uszkodzeń wyposażenia wspierającego

μ_{rf} – intensywność naprawy wyposażenia wspierającego

$G_i^{rf}(t)$ – funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej liczbę uszkodzeń wyposażenia wspierającego w trakcie realizacji odnowy systemu technicznego

- oczekiwana liczba uszkodzeń wyposażenia wspierającego w okresie $(0, t]$:

$$E[N_{rf1}] = \frac{\lambda_{rf} (\mu_1 + \mu_2)}{\int_0^{\infty} t d(F_1(t)G_2^{rf}(t) + F_2(t)G_1^{rf}(t))} \quad (2.4.2.2)$$

gdzie:

N_{rf1} – losowa liczba uszkodzeń wyposażenia wspierającego w okresie $(0, t]$

2.4.3. Problem zawodności przepływu informacji w systemie technicznym

Skuteczność funkcjonowania systemu technicznego zależy w dużej mierze od dopływu odpowiednich informacji. Większość wspomnianych modeli analizujących problem realizacji zadań podstawowych obiektu technicznego opiera się na założeniu, że niezbędna informacja jest przekazywana w systemie w sposób natychmiastowy i niezawodny.

W dostępnej literaturze można wyróżnić także modele uwzględniające problem optymalizacji polityki obsługiwanego systemu technicznego, funkcjonujących w warunkach tzw. niepełnej informacji. Jedne z pierwszych przeglądów stanu wiedzy obszaru modelowania niezawodnościowego z uwzględnieniem niepełnej informacji, zostały opracowane w:

- pracy [196], gdzie niepełność informacji jest rozumiana w sensie braku informacji o rozkładach prawdopodobieństw realizowanych procesów, stanu systemu czy struktury kosztów;
- pracy [216], gdzie niepewność informacji jest tożsama z brakiem informacji o rozkładach prawdopodobieństw realizowanych procesów.

W badanym obszarze zagadnienia podstawowe zagadnienia literaturowe obejmują:

- problem doboru optymalnej organizacji systemu informacyjnego (np. [1, 40, 47, 141, 187, 194]), obejmujący przede wszystkim zagadnienie projektowania efektywnego systemu decyzyjnego;
- analizę niezawodności sprzętu informatycznego (np. 108, 174), zajmującą się stroną techniczną zagadnienia;
- ocenę niezawodności przepływu informacji uwzględniającą następujące cechy:
 - wiarygodność informacji (np. [187]);
 - niepełność informacji (np. [196]), oraz
 - niepewność informacji (np. [186]);
- ocenę niezawodności i/lub bezpieczeństwa systemu technicznego: w warunkach niepewności [23], z uwzględnieniem wiarygodności obiektu technicznego [22];
- problem monitorowania diagnostycznego zakłóceń procesu przepływu informacji w systemach logistycznych [199] oraz systemach technicznych [198];
- problem nadmiarowości informacyjnej – polegający na zwielokrotnieniu pewnej informacji w celu zwiększenia prawdopodobieństwa wykrycia i usunięcia ewentualnych zakłóceń i błędów, które powstały podczas jej przetwarzania i przesyłania (np. [21, 243, 283]).

Podstawowe metody modelowania niezawodności przepływu informacji w procesie eksploatacji systemu technicznego przede wszystkim obejmują metody analityczne [186, 187], oraz procesy symulacji [10].

W ramach przedstawionej analizy nakreślono jedynie podstawowe problemy modelowania funkcjonowania systemów technicznych, wspieranych przez efektywne systemy wspierające.

Ze względu na złożoność zagadnienia, poszerzona analiza omawianego problemu nadaje się na temat oddzielnej pracy, w związku z tym zostanie ona pominięta.

2.5. Podsumowanie

Przedstawiona analiza dostępnej literatury z zakresu modelowania optymalnych parametrów strategii obsługi, jak również zagadnienia modelowania procesu zaopatrzenia systemu technicznego w elementy wymienne, oraz modeli uwzględniających dostępność systemu obsługi (stanowisko obsługi, konserwator) pozwala na pewne podsumowanie istniejącego stanu wiedzy.

Problematyka projektowania efektywnego systemu wsparcia logistycznego obiektów technicznych obejmuje aspekty związane ze sferą techniczną (np. cechy niezawodnościowe systemu), organizacyjną (np. wybór strategii obsługi, organizacja zaopatrzenia), jak również i ekonomiczną (koszty odnowy oraz realizowanych procesów wspierających). Konieczność uwzględnienia dwóch obszarów modelowania, obejmujących:

- problem doboru optymalnych parametrów strategii obsługi,
- problem doboru organizacji procesów logistycznych,

wymaga pełnej integracji omawianych systemów oraz definicji podstawowych relacji, występujących między nimi. Jednakże przeprowadzone studia literaturowe dowodzą, że często dane zagadnienia są analizowane osobno, lub proces modelowania optymalnych parametrów funkcjonowania systemu wspieranego opiera się na wykorzystaniu podejścia sekwencyjnego (w pierwszym kroku optymalizacja parametrów obsługi, po czym dobór efektywnego procesu zaopatrzenia). Taka sytuacja wiąże się z brakiem możliwości uzyskania efektywnego rozwiązania zagadnienia, jakim jest dobór optymalnego systemu wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego w sensie niezawodnościowym oraz ekonomicznym.

Jedne z niewielu prac, podkreślających złożoność omawianego problemu oraz przedstawiających metodę rozwiązania polegającą na optymalizacji wielokryterialnej, powstały w obszarze logistyki wojskowej [49, 50, 51].

Złożoność zagadnienia w badanej literaturze wiąże się z brakiem możliwości pełnego opisu matematycznego modelu systemu wsparcia logistycznego, ze względu na konieczność uwzględnienia szeregu założeń ograniczających możliwość jego zastosowania w praktyce (założenie o wykładniczym charakterze realizowanych procesów, pomijalność czasów realizowanych procesów, idealny przełącznik, itp.).

Podstawowe wady przedstawionych grup opisanych modeli systemu wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego można zaklasyfikować następująco:

1° Brak integracji pomiędzy cechami niezawodnościowymi systemu technicznego a procesem jego zaopatrzenia w części wymienne

Badane modele obszaru analizy wielokryterialnej doboru optymalnych parametrów systemu wsparcia logistycznego funkcjonowania obiektu technicznego przede wszystkim uwzględniają relacje pomiędzy wybraną strategią odnowy profilaktycznej systemu, która pozwala na określenie informacji o chwilach wymiany profilaktycznej elementów (definicja zapotrzebowania na części wymienne), a parametrami procesu zaopatrzenia (np. modele doboru optymalnej strategii sterowania zapasami przy zdefiniowanej strategii odnowy obiektu, opisane w punkcie 2.1). Podstawowe strategie odnowy, analizowane w literaturze badanego zagadnienia, przede wszystkim obejmują strategię odnowy blokowej oraz politykę wymian według wieku systemu.

Z drugiej strony, w dostępnej literaturze można wyróżnić modele, w których skupiono się na problemie oceny: kiedy wymienić uszkodzony element, a kiedy powinien podlegać on naprawie (np. [191]), co również determinuje parametry optymalnej polityki sterowania zapasami.

Jednakże, uznano za niedostateczne uwzględnienie w literaturze następujących zagadnień:

- analiza wpływu procesu uszkodzeń na realizowany proces zaopatrzenia;
- ocena wpływu struktury niezawodnościowej systemu na poziom parametrów procesu zaopatrzenia;
- praca elementów w różnym wieku w systemie podlegającym losowemu procesowi degradacji w czasie (w dostępnej literaturze można znaleźć jedynie prace, uwzględniające proces wymiany uszkodzonego elementu na część wymienną w określonym wieku T_{ai} [218]);
- wieloasortymentowość części wymiennych;
- analiza wpływu realizacji strategii wymian grupowych (wymianie podlegają elementy systemu, które są nadal zdatne) na poziom niezawodności i koszty funkcjonowania systemu wspieranego;
- zależność uszkodzeń elementów współpracujących w systemie.

2° Podstawowe kryterium optymalizacji funkcjonowania systemu technicznego, bez względu na typ omawianego modelu, obejmuje minimalizację oczekiwanych kosztów, ponoszonych w procesie jego eksploatacji

Proces funkcjonowania systemu technicznego jest w badanym obszarze naukowym przede wszystkim poddawany analizie ekonomicznej. W związku z tym, podstawowym kryterium optymalizacji parametrów systemu są oczekiwane koszty jego funkcjonowania,

przypadające na jednostkę czasu (np. w pracach [61, 232, 238]). Drugim podstawowym kryterium optymalizacji parametrów funkcjonowania systemu technicznego, pod względem jego zastosowania w przeanalizowanych modelach wsparcia logistycznego, jest poziom gotowości obiektu wspieranego (np. [33, 135, 215]).

Jednocześnie istnieje niewiele opracowań, w których przyjęto inne kryterium optymalizacji modelu – np. wymagany poziom obsługi (np. [92]), czy kryterium bezpieczeństwa systemu (np. [118]).

3^o Niedostateczne uwzględnienie problemu zawodności przepływu informacji w procesie eksploatacji systemu technicznego

Przedstawione modele wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego (patrz punkty 2.1 ÷ 2.3) przede wszystkim bazują na założeniu, że przepływ informacji o uszkodzeniu elementu technicznego w systemie jest natychmiastowy i niezawodny. Istnieje niewiele opracowań analizujących niezawodność systemu z niepełną lub niepewną informacją, których przegląd został przedstawiony m.in. w pracach [196, 216].

W związku z tym, uznano za niedostateczne uwzględnienie w literaturze następujących zagadnień:

- analiza niezawodności urządzeń monitorujących stan systemu technicznego (problem dostępności i wiarygodności informacji, gdy wyposażenie kontrolne ulegnie uszkodzeniu);
- analiza niezawodności procesu kontroli stanu uszkodzonego systemu (możliwość popełnienia błędnej oceny uszkodzeń przez konserwatora);
- ocena wiarygodności informacji konserwatora (np. działanie wprowadzające w błąd).

4^o Modele rezerwowania systemów z uwzględnieniem potencjału obsługiwanego w niedostateczny sposób uwzględniają problem realizacji strategii odnowy stanowisk remontowych i jego wpływu na charakterystyki niezawodnościowe systemu wspieranego

W dostępnej literaturze obszaru wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego można wyróżnić modele analizujące wpływ dostępności stanowiska obsługiwanego (bez oceny przyczyn jego niezdadności) na poziom niezawodności systemu obsługiwanego (patrz rozdział 2.2). Jednakże istnieje niewiele opracowań, w których rozpatrzono problem realizacji procesów obsługiwanego stanowiska remontowego, które wymagają uwzględnienia okresowej jego niegotowości do podjęcia realizacji zadań odnowy systemu technicznego (np. [30, 31]).

Z drugiej strony, realizacja odnowy stanowiska remontowego wiąże się z koniecznością organizacji właściwego procesu zaopatrzenia w niezbędne zasoby wspierające, co nie pozostaje bez wpływu na stronę ekonomiczną funkcjonowania systemu technicznego.

W dostępnej literaturze opracowania uwzględniające zagadnienie organizacji efektywnego procesu zaopatrzenia w zasoby wspierające, niezbędne w procesie odnowy stanowiska remontowego, ograniczone są jedynie do analizy optymalizacji dostępności wyposażenia wspierającego.

5^o Modele rezerwowania systemów z uwzględnieniem potencjału obsługiwanego w niedostateczny sposób uwzględniają problem realizacji zadań przygotowawczych do wykonania procesu obsługi właściwej systemu technicznego

Przeanalizowane modele wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego bazują w większości na założeniu, że rozpoczęcie czasu realizacji odnowy następuje z chwilą uszkodzenia się elementu technicznego, przy założeniu że w magazynie znajdują się niezbędne części wymienne. Jednakże w rzeczywistych systemach technicznych, proces tzw. odnowy właściwej jest zwykle opóźniony o czas przygotowań do jej realizacji, m.in. niezbędny na zgromadzenie niezbędnych zasobów logistycznych.

Analiza wpływu czasu przygotowań do realizacji właściwego procesu odnowy na poziom charakterystyk niezawodnościowych procesu wspieranego jest przede wszystkim przeprowadzana w obszarze logistyki wojskowej (np. [49, 50, 51]).

6^o Modele rezerwowania systemów obsługiwanych przez konserwatora (konserwatorów) w niedostateczny sposób uwzględniają problem zdolności operacyjnych konserwatora (niezawodna realizacja zadań)

Efektywność realizowanego procesu odnowy w dużej mierze zależy od predyspozycji operacyjnych konserwatora. W dostępnej literaturze zagadnienia przede wszystkim można wyróżnić prace analizujące wpływ kondycji (dobra/zła) konserwatora na realizowane procesy odnowy (np. [75, 79]). Jednakże, uznano za niedostateczne uwzględnienie w literaturze następujących zagadnień:

- wpływ poziomu umiejętności konserwatora na realizowane operacje odnowy (np. możliwość uszkodzenia systemu, błędne przeprowadzenie odnowy);
- analiza statystyczna problemu „złej woli konserwatora” (celowe działanie konserwatora na niekorzyść systemu technicznego).

7^o Modele rezerwowania systemów obsługiwanych przez konserwatora (konserwatorów) w niedostateczny sposób analizują zagadnienie organizacji pracy konserwatora

Podstawowe ograniczenia upraszczające analizowane zagadnienie obejmują pomijalność czasów przybycia konserwatorów do systemu, problem jednozadaniowości konserwatora, czy niezawodność realizowanej pracy konserwatora.

Przeprowadzone studia literaturowe modelowania systemów technicznych, obsługiwanych przez konserwatora (konserwatorów) pozwalają na stwierdzenie, że w niedostatecznym stopniu uwzględniono następujące zagadnienia:

- niepomijalność czasu przybycia eksperta do systemu,
- proces współpracy w realizacji odnowy systemu pomiędzy konserwatorem regularnym a ekspertem;
- wielozadaniowość systemu obsługi;
- możliwość realizacji obsługi wielu niejednakowych systemów przez jednego konserwatora.

8^o W przeanalizowanych modelach w niedostateczny sposób uwzględniany jest problem realizacji zadań systemu wsparcia logistycznego oraz czasu ich trwania

W wielu przeanalizowanych modelach doboru wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego są uwzględniane założenia upraszczające, dotyczące pomijalności:

- czasu przesyłu informacji,
- oczekiwania na konserwatora,
- czasu przygotowań wstępnych do procesu odnowy systemu technicznego,
- czasu realizowanych operacji transportowania,
- czasu niezbędnego na identyfikację uszkodzenia elementu technicznego,
- czasu przełączania (systemy z rezerwą strukturalną).

W wyniku przedstawionych uproszczeń, pojawia się rozbieżność pomiędzy wynikami, uzyskanymi w procesie analizy modelu matematycznego, a poziomem realizacji zadań podstawowych rzeczywistego systemu technicznego.

Ponadto, opracowane w literaturze modele logistycznego wsparcia funkcjonowania systemu technicznego przede wszystkim oparte są na wykorzystaniu relacji następstwa zdarzeń. W rezultacie, najważniejszą wadą analizowanych opracowań, zdaniem autora, jest brak modeli wykorzystujących zależności czasowe pomiędzy analizowanymi systemami.

3. MODELE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW Z REZERWĄ CZASOWĄ

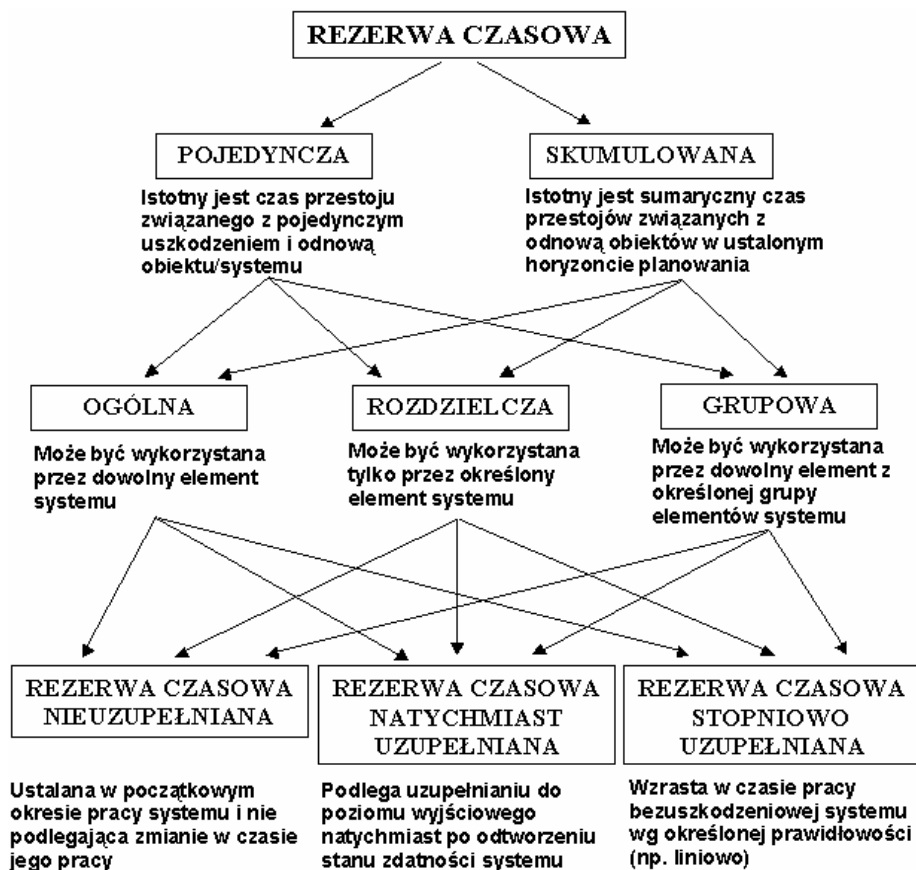
W przypadku złożonych systemów, w których istotny staje się problem modelowania relacji pomiędzy dwoma odrębnymi podsystemami, mających wpływ na ogólną gotowość systemu, wiele prac proponuje uwzględnienie rezerwowania czasowego jako metody poprawy ogólnej niezawodności [244, 262].

Pojęcie nadmiaru czasowego w eksploatacji należy rozumieć jako rezerwę czasu upływającego od chwili powstania uszkodzenia elementu do chwili uszkodzenia się systemu technicznego [262]. *Rezerwowanie czasowe polega na uwzględnieniu dodatkowego czasu na wykonanie zadania (w stosunku do czasu niezbędnego na jego realizację), który może być wykorzystany do odtworzenia stanu zdolności systemu lub polepszenia jego charakterystyk technicznych* [244, 262]. Oznacza to, iż systemy z rezerwą czasową odznaczają się własnością polegającą na tolerowaniu awarii o krótkim (zwykle określonym) czasie trwania.

W literaturze dostępnych jest wiele prac obejmujących problematykę rezerwowania czasowego, np. [26, 27, 244, 262]. Jednocześnie, w zależności od [244, 262]:

- typu tolerancji awarii,
- sposobu wykorzystania rezerwy czasowej,
- sposobu uzupełniania rezerwy czasowej,

można wyróżnić dziewięć podstawowych rodzajów rezerwy czasowej, które zostały przedstawione na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Podstawowa klasyfikacja rodzajów rezerwy czasowej

Opracowanie własne na podst. [27, 244, 262]

Dobór odpowiedniego rodzaju rezerwy czasowej zależy przede wszystkim od:

- typu modelowanego systemu;
- rodzaju zadania operacyjnego;
- definicji typu wydajności, jaki jest istotny w systemie (np. czy interesująca jest wydajność systemu w pewnym horyzoncie czasowym), oraz
- zachowania się systemu w chwili uszkodzenia (czy pojedyncze uszkodzenie powinno wpływać na niezawodność systemu).

Podstawowa klasyfikacja modeli systemów z rezerwą czasową wraz z niezbędnymi informacjami, uwzględniająca wymienione cechy, została przedstawiona w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Podstawowa klasyfikacja modeli systemu z rezerwą czasową

<i>Typ rezerwy czasowej</i>	<i>Cel modelowania</i>	<i>Podstawowa definicja rezerwy czasowej</i>	<i>Metoda modelowania</i>	<i>Możliwość zastosowania</i>	<i>Przykładowe publikacje</i>
rezerwa czasowa pojedyncza ogólna/grupowa natychmiast uzupełniana	$R(t)$, $MTBF$, $MTRR$, A	czas, w którym system może tolerować pojawiające się zakłócenia elementów systemu bez wpływu na jego niezawodność; może być wykorzystany na realizację czynności pomocniczych, zadań dodatkowych, operacji odnowy uszkodzonych elementów	analityczna	optymalizacja nadmiaru strukturalnego i czasowego elementów/systemów elektronicznych, telekomunikacyjnych i systemów radarowych	[138]
	$N(t)$, $I-A(t)$	czas mierzony od chwili uszkodzenia elementu do chwili pojawienia się uszkodzenia systemu, pod warunkiem że odnowa elementu została podjęta natychmiast po jego uszkodzeniu		m.in. w procesie określenia niezdatności systemów elektronicznych,	[253]
rezerwa czasowa skumulowana rozdzielcza/ grupowa nieuzupełniana	$R(t)$	ustalony czas przeznaczony na pełne i bezbłędne zrealizowanie zadania operacyjnego polegającego na wykonaniu zadań	procesy semi- Markowa	m.in. do wyznaczenia niezawodności systemów telekomunikacji, wielofazowych	[144]
	C_r , $R(t)$	cząstkowych w n następujących po sobie fazach	algorytmy genetyczne	systemów transportowych, systemów przesyłu danych, itp.	[145]
rezerwa czasowa skumulowana ogólna nieuzupełniana	$R(t)$	różnica pomiędzy czasem ustalonym na realizację zadania a rzeczywistym czasem, niezbędnym do jego wykonania	analityczna + symulacja Monte Carlo	zastosowanie w systemach transportowych, informatycznych, systemach usługowych (analiza dostępności usługi)	[27, 148]
	T_γ				[26]

<i>Typ rezerwy czasowej</i>	<i>Cel modelowania</i>	<i>Podstawowa definicja rezerwy czasowej</i>	<i>Metoda modelowania</i>	<i>Możliwość zastosowania</i>	<i>Przykładowe publikacje</i>
rezerwa czasowa skumulowana ogólna nieuzupełniana	<i>MTBF</i>	rezerwa czasowa – tożsama z nadmiarem czasu, jaki został przeznaczony na realizację określonego zadania w odniesieniu do czasu jaki jest w rzeczywistości niezbędny na wykonanie zadania operacyjnego	procesy semi-Markowa	m.in. systemy przesyłu danych	[244]
rezerwa czasowa skumulowana ogólna natychmiast uzupełniana	<i>A(t)</i>			m.in. zastosowanie w systemach elektronicznych	
rezerwa czasowa skumulowana ogólna uzupełniana stopniowo				m.in. systemy komputerowe, produkcyjne	
				np. systemy przesyłu informacji	
				np. przemysłowe linie przesyłowe	

Jedną z pierwszych prac uwzględniających zagadnienie rezerwy czasowej jest [227], w której założono, że system uszkodza się dopiero wówczas gdy czas naprawy niesprawności elementu/elementów jest większy od pewnej zmiennej losowej T_r o rozkładzie $\Phi(x)$.

Prawdopodobieństwo uszkodzenia się systemu w jednym cyklu odnowy opisano następującą formułą:

$$P_u = \int_0^{\infty} \Phi(x) dG(x) \quad (3.1)$$

Kontynuacja zagadnienia tolerancji czasu awarii elementu systemu jest ujęta m.in. w pracy [69], w której przeanalizowano funkcję dystrybuanty prawdopodobieństwa czasu zdatności systemu. Przy założeniu:

- system może przebywać w jednym z dwóch stanów niezawodnościowych (zdatny/niezdatny),
- warunki pełnej odnowy,
- ciągłość funkcji dystrybuanty,

funkcja dystrybuanty prawdopodobieństwa czasu zdatności systemu w określonym przedziale czasu $(0,t)$ opisana jest wzorem:

$$F_{ut}(T_o) = \sum_{n=1}^{\infty} F^n(T_o) [G^{n-1}(t-T_o) - G^n(t-T_o)] \quad T_o \in (0,t) \quad (3.2)$$

Kontynuacja badanego problemu została przedstawiona w pracy [211], w której autor wyznaczył funkcję dystrybuanty prawdopodobieństwa czasu niezbędnego do zakończenia jedno- i dwufazowego zadania operacyjnego.

Następnie w pracy [116] wyznaczono, przy następujących założeniach:

- element uszkodza się maksymalnie jeden raz w ciągu określonego okresu obserwacji,
- element nie znajduje się w stanie niezdatności na koniec okresu obserwacji,

funkcję dystrybuanty prawdopodobieństwa niezdatności systemu:

$$G_{dw}(T_r) = \sum_{n=1}^{\infty} G^n(T_r) [F^n(T-T_r) - F^{n+1}(T-T_r)] \quad T_r \in [0,T] \quad (3.3)$$

Przedstawione modele stanowią podstawę teoretyczną prac, opracowanych w kolejnych latach.

Analiza stanu wiedzy obszaru zagadnienia zależności czasowych byłaby niepełna bez uwzględnienia pracy [253], gdzie przedstawiono model niegotowości systemu przy

uwzględnieniu warunków pełnej i niepełnej odnowy, oraz prac [144, 145], analizujących niezawodność systemu wieloelementowego z zależnością czasową.

Na szczególne zainteresowanie zasługuje praca [138], w której przedstawiono model niezawodności systemu z zależnością czasową poprzez uzależnienie modelu matematycznego od wielkości charakterystyk niezawodnościowych takiego samego systemu, ale funkcjonującego bez rezerwy czasowej.

Przy uwzględnieniu następujących założeń:

- czasy niezdatności elementu pomijalne w procesie oszacowania oczekiwanego czasu pomiędzy uszkodzeniami, jeżeli były one krótsze od założonej rezerwy czasowej;
- system powraca do stanu zdatności w okresie rezerwy czasowej z określonym prawdopodobieństwem p_{yr} ;

wyznaczono:

$$1 - \Phi(t) = 1 - F(t) + p_{yr} \int_0^t [1 - \Phi(x)] dF(x) \quad (3.4)$$

gdzie:

p_{yr} – prawdopodobieństwo, że system z rezerwą czasową powróci do stanu zdatności funkcjonalnej w założonym okresie rezerwy czasowej

Inne ciekawe ujęcie problemu zostało przedstawione w pracach [27, 148]. W pracy [27] przedstawiono ogólny model systemu ze skumulowaną rezerwą czasową. Wyznaczenie niezawodności systemu opracowano w oparciu o znajomość dystrybuanty rozkładu gotowości w przedziale czasu:

$$P\{T \geq T_r\} = 1 - F_A\left(\frac{T_r}{\Delta t}\right) \quad (3.5)$$

gdzie:

Δt – szerokość przedziału czasowego

$F_A(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa gotowości systemu, wyznaczana [69]:

$$F_A(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F^n(A\Delta t) [G^{n-1}(\Delta t - A\Delta t) - G^n(\Delta t - A\Delta t)] \quad (3.6)$$

Model został przeanalizowany przy wykorzystaniu procesów symulacji Monte Carlo, natomiast kontynuacja omawianego problemu, dla przypadku funkcjonowania systemu transportowego, została przedstawiona w pracy [26].

Z kolei w pracy [148] przedstawiono zastosowanie zagadnienia zależności czasowej w procesie analizy gwarantowanej dostępności usług realizowanych przez system. „Analiza

taka ma szczególne znaczenie w przypadku systemów udostępniających usługi na mocy umowy z usługobiorcą, w której jako miara jakości usługi określona zostaje dostępność usługi, mierzona w zadanym przedziale czasu”.

Problem oszacowania gwarantowanej dostępności usługi w zadanym horyzoncie czasowym, tzn. poziomym, który zostanie zrealizowany przez system z odpowiednio dużym prawdopodobieństwem, wyznaczono analitycznie za pomocą formuły:

$$\begin{cases} \min P\{A < A_{g1}\} \\ F_A(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F^n(A\Delta t) [G^{n-1}(\Delta t - A\Delta t) - G^n(\Delta t - A\Delta t)] \end{cases} \quad (3.7)$$

gdzie:

A_{g1} – poziom gwarantowanej dostępności systemu

Ponownie rozwiązanie modelu bazuje na wykorzystaniu procesów symulacji Monte Carlo.

Liczny dorobek literaturowy z obszaru modelowania niezawodności systemów z rezerwą czasową, jak również szereg prac przedstawiających przykłady aplikacji teorii dla systemów rzeczywistych, potwierdza istotność badanego zagadnienia.

Z drugiej strony, biorąc pod uwagę charakter procesu eksploatacji oraz fakt, iż procesy wspierające przede wszystkim mają na celu zapewnienie ciągłości realizacji procesów obsługi, problem rezerwowania czasowego może być zaimplementowany do modelowania podstawowych charakterystyk niezawodnościowych i ekonomicznych systemu wparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego.

4. CEL, ZAŁOŻENIA I ZAKRES PRACY

W literaturze zagadnienia brakuje prac, które by kompleksowo analizowały problem wzajemnych relacji pomiędzy systemami: logistycznym i technicznym oraz ich wpływu na ogólną niezawodność realizowanych podstawowych funkcji i zadań. Najczęściej problemy funkcjonowania systemu technicznego (np. ustalenie optymalnych polityk: obsługiwanie oraz zarządzania zapasami) są rozwiązywane oddzielnie lub sekwencyjnie.

Jednym z możliwych rozwiązań, pozwalającym na uwzględnienie w procesie analizy funkcjonowania systemu technicznego wpływu niezawodności systemu logistycznego jest zintegrowanie obu systemów w jeden „nadsystem” wraz z definicją podstawowych relacji, występujących pomiędzy nimi oraz, dla tak opracowanego modelu, przeprowadzenie oceny niezawodności.

Pojęcie nadsystemu (ang. *system of systems*) jest przede wszystkim znane i wykorzystywane w logistyce wojskowej. Obecnie istnieją ponad 40 definicji tego pojęcia [209]. W przypadku modelowania relacji pomiędzy systemem technicznym i logistycznym najbardziej odpowiednia jest definicja zaproponowana przez Crossley’ a [45], w której nadsystem jest określany jako *system, w którym pewne zadania są realizowane wspólnie przez minimum dwa odrębne systemy, które mogą funkcjonować oddzielnie, ale muszą współpracować ze sobą w celu zapewnienia określonego potencjału. Utrata zdolności operacyjnej któregośkolwiek elementu tych systemów wiąże się z obniżeniem potencjału operacyjnego całego nadsystemu.*

Ponadto, uwzględniając specyfikę realizacji procesów logistycznych przyjęto, iż nadsystem ten odznacza się własnością polegającą na tolerowaniu awarii o krótkim czasie trwania (tzw. system z rezerwą czasową) (patrz rozdział 3). Wykorzystanie tzw. zależności czasowej pomiędzy realizowanymi procesami pozwala w prosty sposób przedstawić matematyczne relacje pomiędzy analizowanymi systemami.

Uwzględniając powyższe, postawiony został cel pracy:

Opracowanie modelu wsparcia logistycznego systemu eksploatacji w aspekcie niezawodności obu systemów oraz nadsystemu.

Cel rozprawy doktorskiej wymaga realizacji zadań cząstkowych, które obejmują:

- określenie podstawowych definicji związanych z modelem wsparcia logistycznego systemu eksploatacji (niezawodność systemów, system z rezerwą czasową);
- przyjęcie założeń teoretycznych opisujących modelowany nadsystem z rezerwą czasową;

- budowę analitycznego modelu nadsystemu z rezerwą czasową wraz z jego analizą wrażliwości;
- budowę symulacyjnego modelu nadsystemu z rezerwą czasową;
- analizę wrażliwości modelu na zmienne parametry procesu zaopatrzenia systemu technicznego w niezbędne zasoby oraz zmianę wielkości rezerwy czasowej;
- weryfikację modelu nadsystemu z rezerwą czasową;
- podsumowanie i wnioski.

4.1. Podstawowe definicje i założenia

4.1.1. niezawodność systemu technicznego

W oparciu o tradycyjne rozumienie definicji, niezawodność systemu technicznego jest definiowana jako *zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność oraz zapewnienie środków obsługi* [197].

Z punktu widzenia funkcjonowania nadsystemu, istotne jest zdefiniowanie pojęcia nieuszkodzalność systemu technicznego które, zgodnie z [197], definiowane jest jako *zdolność systemu do realizacji zadania operacyjnego, w ustalonym przedziale czasu dla określonych warunków otoczenia*.

Funkcjonowanie modelowanego systemu technicznego zostało oparte na następujących podstawowych założeniach, obejmujących jego cechy niezawodnościowe:

- pracujące systemy są, w ujęciu niezawodnościowym, dwustanowe (zdatny/niezdatny);
- system składa się z pewnej liczby jednakowych elementów, pozostających ze sobą w ustalonej strukturze niezawodnościowej, determinującej chwilę przejścia systemu w stan niezdatności;
- w rozważaniach przeanalizowano trzy przypadki nadsystemu, w którym system techniczny posiada strukturę niezawodnościową typu: szeregową, równoległą oraz „ k z n ” ($k = 1$ – struktura szeregową, $k = n$ – struktura równoległą);
- elementy systemu są statystycznie identyczne i niezależne, a czas ich poprawnej pracy charakteryzowany jest znaną funkcją rozkładu prawdopodobieństwa;
- operacja odnowy jest podjęta natychmiast po pojawieniu się uszkodzenia systemu;
- operacje obsługowe polegają na przeprowadzeniu procesu wymiany uszkodzonego elementu na nowy (część wymienną); polityka obsług obejmuje jedynie operacje korekcyjne;

- chwila uszkodzenia się systemu technicznego jest jednocześnie chwilą dostarczenia zgłoszenia o zapotrzebowaniu do systemu wsparcia logistycznego (przepływ informacji natychmiastowy i niezawodny);
- wymiana uszkodzonych elementów systemu może być dokonana jeżeli w systemie wsparcia logistycznego znajdują się niezbędne części wymienne;
- w trakcie realizacji operacji obsługowej pozostałe zdadne elementy systemu technicznego nie mogą się uszkodzić;
- w strukturze progowej – zakłada się, iż pierwsze uszkodzone elementy, które nie powodują uszkodzenia systemu technicznego –podlegają natychmiastowej wymianie;
- w strukturze równoległej – zakłada się, iż pierwsze uszkodzone elementy, które nie powodują uszkodzenia systemu wspieranego – nie podlegają natychmiastowej wymianie lecz oczekują na uszkodzenie się w sumie n elementów (z chwilą, gdy wszystkie elementy ulegną uszkodzeniu następuje odnowa systemu);
- przyjęto warunki pełnej odnowy systemu technicznego;
- czasy odnowy systemu technicznego są statystycznie niezależne, losowe; czas odnowy może być opisany znaną funkcją rozkładu prawdopodobieństwa.

4.1.2. Niezawodność systemu wsparcia logistycznego

W omawianym modelu pojawienie się uszkodzenia systemu technicznego jest traktowane jako sygnał zapotrzebowania w systemie wspierającym. W oparciu o przedstawione podstawowe definicje w obszarze wsparcia logistycznego, omówione w rozdziale 1, niezawodność systemu logistycznego jest definiowana jako jego *zdolność do niezakłóconej realizacji procesu wspierającego system techniczny w określonym przedziale czasu i przy ustalonych warunkach operacyjnych*. W związku z tym uszkodzenie się systemu logistycznego jest rozumiane jako *brak możliwości realizacji zapotrzebowania systemu technicznego w zasoby, niezbędne do przywrócenia systemowi wspieranemu stanu zdadności*.

Podstawowe założenia teoretyczne, pozwalające na opracowanie modelu matematycznego badanego systemu, obejmują:

- cechy niezawodnościowe systemu logistycznego:
 - czas poprawnej pracy systemu charakteryzowany jest znaną funkcją prawdopodobieństwa;
 - problem zdadności/niezdadności systemu logistycznego jest istotny w chwili pojawienia się uszkodzenia systemu technicznego (nie rozpatruje się problemu występowania niezdadności systemu wsparcia logistycznego w okresie zdadności systemu technicznego);

- proces odnowy systemu wsparcia logistycznego obejmuje operację uzupełnienia stanu zapasów części wymiennych (proces zaopatrzenia);
- charakterystykę procesu zaopatrzenia systemu technicznego w części wymienne:
 - elementy utrzymywane w zapasie nie ulegają uszkodzeniu (rezerwa zimna);
 - posiadany zapas jest pomniejszany zgodnie z pojawiającym się zapotrzebowaniem systemu technicznego w czasie;
 - czas dostawy części wymiennych do systemu logistycznego jest zmienną losową i charakteryzowany może być znaną funkcją rozkładu prawdopodobieństwa;
 - losowość procesów: zużycia elementów w systemie technicznym oraz procesów zaopatrzenia powoduje, że może pojawić się brak zapasu w systemie wspierającym;
 - czas realizacji zapotrzebowania systemu technicznego obejmuje okres od chwili pojawienia się zapotrzebowania na części wymienne (uszkodzenie systemu technicznego) do chwili ich dostarczenia do systemu wspieranego; jeżeli w chwili pojawienia się uszkodzenia systemu technicznego, niezbędne części wymienne znajdują się w systemie logistycznym, czas realizacji zapotrzebowania jest pomijalny, w przeciwnym wypadku czas realizacji zapotrzebowania równy jest pozostałemu okresowi realizacji zamówienia (od chwili pojawienia się zapotrzebowania na części wymienne w systemie technicznym do chwili fizycznej dostawy do systemu wspierającego zamówionych elementów wymiennych);
 - z chwilą wyczerpania się zapasów system logistyczny przechodzi w stan niezdatności;
 - cykl zaopatrzenia obejmuje okres od momentu złożenia zamówienia na części wymienne (chwila t_0 , w której zapas elementów osiąga poziom zamawiania) do chwili osiągnięcia przez stan magazynowy kolejnego poziomu zamawiania (cykl zaopatrzenia obejmuje pracę Q elementów);
 - sterowanie zapasami w systemie logistycznym odbywa się według stałego poziomu zamawiania; z chwilą gdy liczba części wymiennych osiągnie poziom zamawiania s generowane jest nowe zamówienie (chwila t_0).

4.1.3. Niezawodność nadsystemu z rezerwą czasową

Podstawowym zadaniem nadsystemu jest realizacja procesu operacyjnego – zapewnienie ciągłości pracy bez opóźnień w systemie. Biorąc pod uwagę przedstawione definicje niezawodności systemu technicznego oraz systemu wspierającego, niezawodność nadsystemu jest definiowana jako: *jego zdolność do realizacji zadania operacyjnego, nieprzerwanej uszkodzeniem w określonych warunkach i w ustalonym przedziale czasu*. Jednocześnie

uszkodzenie jest definiowane jako: *przekroczenie ustalonej rezerwy czasowej T_γ , przeznaczonej na dostarczenie niezbędnych zasobów z systemu wsparcia logistycznego oraz na odnowę systemu technicznego.*

Zgodnie z przedstawioną definicją, modelowany nadsystem odznacza się tzw. *pojedynczą rezerwą czasową* [244]. Oznacza ona własność systemów polegającą na tolerowaniu awarii o krótkim czasie trwania (istotny jest czas przestoju wywołany pojedynczym uszkodzeniem i naprawą systemu: jeżeli w zadanym czasie od uszkodzenia nastąpi odnowa, to awaria nie wpływa na niezawodność całego nadsystemu).

Funkcjonowanie omawianego nadsystemu dopuszcza zatem pojawianie się uszkodzeń w systemie technicznym (niezdatność systemu technicznego), które to uszkodzenia są następnie usuwane, przy wykorzystaniu procesów logistycznych, realizowanych w systemie wsparcia logistycznego oraz procesów odnowy, realizowanych w systemie technicznym.

Podsumowując, podstawowe założenia teoretyczne, pozwalające na opracowanie modelu analitycznego omawianego nadsystemu z rezerwą czasową, dotyczące jego cech niezawodnościowych, obejmują:

- okres rezerwy czasowej T_γ jest zmienną losową, charakteryzowaną dla całego okresu operacyjnego poprzez znaną funkcję prawdopodobieństwa;
- rezerwa czasowa jest rezerwą pojedynczą, ogólną (może być wykorzystana przez dowolny element systemu technicznego) oraz natychmiast uzupełnianą (podlega uzupełnianiu natychmiast po odtworzeniu stanu zdatności systemu wspieranego, zgodnie z założonym rozkładem prawdopodobieństwa);
- nadsystem z rezerwą czasową przechodzi w stan niezdatności z chwilą przekroczenia rezerwy czasowej ($t_{s+n+\gamma}$), przeznaczonej na przywrócenie zdatności systemowi technicznemu, i pozostaje w nim do chwili usunięcia niezdatności danego systemu.

Przedstawione założenia teoretyczne oraz definicje niezawodności pozwalają na opracowanie modelu matematycznego nadsystemu z rezerwą czasową.

5. ANALITYCZNY MODEL SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ

Opracowanie analitycznego modelu wsparcia logistycznego systemu eksploatacji z uwzględnieniem niezawodności obu podsystemów oraz nadsystemu, przy uwzględnieniu założeń przedstawionych w rozdziale 4, zostało zrealizowane w kolejnych krokach:

1. *opracowanie modelu niezdatności nadsystemu, w którym system techniczny jest systemem naprawialnym, jednoelementowym, z liczbą zapasów równą s oraz z pomijalnym czasem odnowy;*
2. *opracowanie modelu niezdatności nadsystemu, w którym system techniczny jest systemem naprawialnym, jednoelementowym, z liczbą zapasów równą s oraz z niepomijalnym czasem odnowy;*
3. *uogólnienie modelu niezdatności systemu do przypadku systemu wieloelementowego, pracującego w określonej strukturze niezawodnościowej;*
4. *wyznaczenie funkcji gotowości nadsystemu z rezerwą czasową;*
5. *opracowanie modelu wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego.*

Prawdopodobieństwo, że nadsystem w chwili t znajduje się w stanie zdatności/niezdatności, zależy od [73, 262, 278]:

- zmiennych losowych, opisujących czas poprawnej pracy systemów: logistycznego i wspieranego;
- struktury niezawodnościowej systemu technicznego;
- zmiennej losowej, opisującej czas odnowy systemu technicznego;
- zmiennej losowej, opisującej czas dostawy części wymiennych do systemu wsparcia logistycznego;
- metody sterowania zapasami, wykorzystywanej w systemie logistycznym.

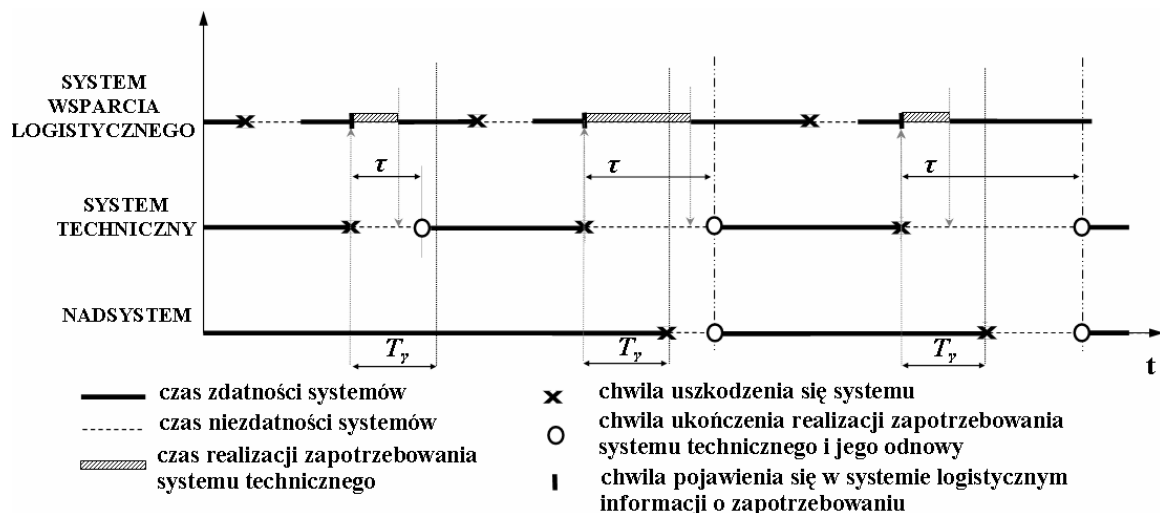
W związku z tym, że niezdatność systemu logistycznego przy założeniu, że system ten dostarcza tylko części wymienne, nie może wystąpić w innym okresie niż w trakcie realizacji zadania wspierającego (realizacja zapotrzebowania), dlatego też w dalszych obliczeniach niezawodność systemu wsparcia logistycznego będzie uzależniona jedynie od dostępności części wymiennych.

5.1. Niezdatność nadsystemu z jednoelementowym systemem technicznym, z pomijalnym czasem odnowy

W pierwszym etapie modelowania nadsystemu założono, że w systemie technicznym pracuje jeden element, natomiast czasy odnowy (wymiany elementu uszkodzonego) tego systemu są nieznaczące w stosunku do czasu poprawnej pracy elementu i mogą być pominięte (np. [73]). W celu określenia prawdopodobieństwa, że w chwili t nadsystem będzie znajdował się w stanie niezdatności przy określonej wielkości zapasu w systemie logistycznym, należy stworzyć model opisujący możliwość pojawienia się braku zapasu w pojedynczym cyklu zaopatrzeniowym oraz długość okresu trwania ewentualnego braku w systemie. Następnie należy przeanalizować, jakie jest prawdopodobieństwo, że okres braku niezbędnych elementów wymiennych w systemie logistycznym przekroczy dopuszczalną rezerwę czasową T_γ , a w konsekwencji pojawi się niezdatność nadsystemu. Ostatnim etapem jest wyznaczenie okresu trwania ewentualnej niezdatności nadsystemu.

Zgodnie z przedstawionymi założeniami elementy zapasowe znajdujące się w systemie logistycznym są traktowane jako rezerwa zimna. Po uszkodzeniu się systemu technicznego (elementu pracującego) informacja o zapotrzebowaniu na część wymienną jest przekazywana do systemu wsparcia logistycznego. Oznaczmy przez τ czas niezdatności systemu logistycznego, zdefiniowany jako brak części wymiennych, niezbędnych w procesie przywracania zdadności systemu technicznego. W sytuacji, gdy niezbędne w procesie odnowy części wymienne znajdują się w systemie wsparcia logistycznego to czas realizacji zapotrzebowania τ jest pomijalny. 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 posiadanego 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 systemu technicznego do chwili realizacji dostawy t_d).

Modelowany nadsystem jest uszkodzony, jeżeli system logistyczny jest uszkodzony (brak części wymiennych) i czas realizacji dostawy części wymiennych jest dłuższy niż rezerwa czasowa T_γ (rys. 5.1.1).



Rys. 5.1.1. Model nadsystemu składającego się z jednoelementowego, naprawialnego systemu technicznego (z pomijalnym czasem odnowy) oraz systemu wsparcia logistycznego

Zgodnie z przedstawionym schematem można wstępnie oszacować zakres wielkości zmiennej losowej τ . Zmienna ta teoretycznie może przyjąć wartość minimalną ($\tau = 0$) w dwóch przypadkach:

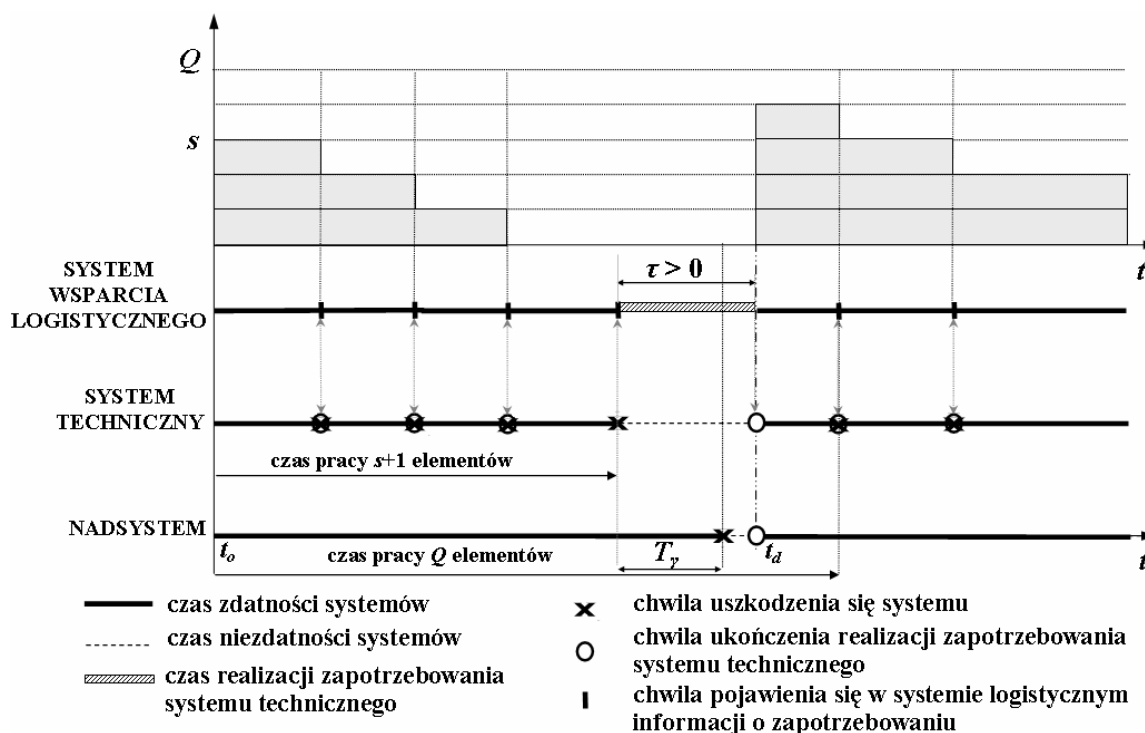
- gdy elementy wymienne niezbędne w procesie odnowy systemu technicznego znajdują się w systemie wsparcia logistycznego,
- gdy dostawa nowych elementów wymiennych zrealizowana jest w tej samej chwili, w której nastąpi uszkodzenie ostatniego elementu pracującego w systemie technicznym (przed dostawą zapasów części wymiennych nie było).

Z kolei wartość maksymalną τ może przyjąć w przypadku, gdy uszkodzenie ostatniego zdadnego elementu systemu technicznego, wskutek którego system logistyczny przechodzi w stan niezdatności, ma miejsce natychmiast po złożeniu zamówienia, zaś dostawa zostanie zrealizowana w czasie nieskończenie odległym od chwili t_0 .

Jeżeli dostawa nastąpi w okresie obejmującym zdefiniowany czas rezerwy czasowej to nadsystem pozostaje w stanie zdadności. Jednocześnie, niezdatność nadsystemu pojawi się w sytuacji, gdy czas niezdatności systemu logistycznego będzie dłuższy niż określona rezerwa czasowa (przeznaczona na przywrócenie zdadności systemowi wspieranemu). Oznaczmy przez ζ czas niezdatności nadsystemu, zdefiniowany jako przekroczenie dopuszczalnej rezerwy czasowej, przeznaczonej na przywrócenie zdadności 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 przeznaczonej 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_r przez realizowany proces logistyczny.

W celu opracowania modelu matematycznego omawianego nad systemu należy dodatkowo uwzględnić metodę sterowania zapasami, wg której funkcjonuje system wsparcia logistycznego. Model nad systemu z uwzględnieniem wielkości zapasów elementów wymiennych w funkcji czasu, wynikającym z przyjętego modelu sterowania zapasami został przedstawiony na rysunku 5.1.2.



Rys. 5.1.2. Uproszczony model nad systemu z uwzględnieniem wielkości zapasów elementów wymiennych w funkcji czasu ($Q = 5, s = 3$)

Zastosowanie modelu stałej wielkości zamawiania jako normy sterowania zapasami elementów w systemie wsparcia logistycznego, pozwala na zdefiniowanie zachowania się nad systemu 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 obniżenia 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 bazuje na wyznaczeniu dwóch charakterystyk, opisujących prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności systemu wsparcia logistycznego (braku niezbędnych części wymiennych) oraz prawdopodobieństwo, że czas przywrócenia zdatności systemu technicznego przekroczy dopuszczalną rezerwę czasową T_γ .

W przypadku systemów z rezerwą zimną czas ich pracy jest sumą czasu pracy elementów (np. [65, 73, 131]):

$$T^n = T_1 + T_2 + T_3 + \dots T_n \quad (5.1.1)$$

Przy założeniu, że czasy pracy elementów są niezależnymi zmiennymi losowymi, rozkład czasu pracy systemu jest splotem rozkładów czasu pracy elementów, zgodnie ze wzorem [73, 131]:

$$F^{s+1}(t) = \int_0^t F^s(t-x)dF(x) \quad (5.1.2)$$

W związku z tym, dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca losowy czas do uszkodzenia się systemu logistycznego, przy założeniu ciągłości zmiennych, może być wyznaczona jako [73]:

$$\Psi(\tau) = F^{s+1}(t)(E(t+\tau) - E(t)) \quad (5.1.3)$$

gdzie:

$F^{s+1}(t)$ – kompozycja rozkładów prawdopodobieństw opisujących czas poprawnej pracy kolejnych $s+1$ elementów (($s+1$) – krotny splot funkcji)

$E(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu dostawy części wymiennych do systemu wsparcia logistycznego

Z kolei gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej, opisująca czas realizacji zapotrzebowania w niezbędne części wymienne $\psi(\tau)$ może być zdefiniowana jako [151]:

$$\psi(\tau) = \int_0^\infty f^{s+1}(t)\varepsilon(t+\tau)dt \quad (5.1.4)$$

gdzie:

$f^{s+1}(t)$ – ($s+1$)-krotny splot funkcji gęstości rozkładów prawdopodobieństwa, opisujących czas poprawnej pracy $s+1$ kolejnych elementów w systemie technicznym, wyznaczana zgodnie ze wzorem [73, 131]:

$$f^{s+1}(t) = \int_0^t F^s(t-x)f(x)dx \quad (5.1.5)$$

$\varepsilon(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu dostawy części wymiennych do systemu logistycznego

Znając prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności systemu logistycznego, należy określić prawdopodobieństwo, że omawiany nadsystem będzie znajdował się w stanie niezdatności, spowodowanym brakiem części wymiennych w systemie wsparcia logistycznego, przez okres dłuższy niż założona rezerwa czasowa. Przy założeniu, że zmienna ξ określa losowy okres niezdatności nadsystemu, dystrybuanta, opisująca rozkład prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu, może być określona wzorem [227]:

$$B(\xi) = \Phi(t)(\Psi(t+\xi) - \Psi(t)) \quad (5.1.6)$$

gdzie:

$\Phi(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa opisująca okres rezerwy czasowej

$\Psi(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas realizacji zapotrzebowania systemu technicznego w niezbędne części wymienne

Jednocześnie, gęstość rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca okres niezdatności nadsystemu, zgodnie z [73], można określić jako:

$$b(\xi) = \int_0^{\infty} \varphi(t)\psi(t+\xi)dt \quad (5.1.7)$$

gdzie:

$\varphi(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa opisująca okres rezerwy czasowej

$\psi(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas reakcji systemu logistycznego

Prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności nadsystemu w czasie pojedynczego cyklu zaopatrzenia, wynikające z braku elementów wymiennych, można m.in. opisać formułą:

$$P_{NN1j} = \int_0^{\infty} b(\tau)d\tau \quad (5.1.8)$$

Przedstawiony analityczny model niezdatności nadsystemu z rezerwą czasową, w którym znajduje się $s+1$ elementów, bazuje przede wszystkim na wykorzystaniu operacji splotu funkcji. Znalezienie rozkładu prawdopodobieństwa $F^{s+1}(t)$, $f^{s+1}(t)$, $G^{s+1}(t)$, $g^{s+1}(t)$ jest dla

dużych s na ogół bardzo kłopotliwe. Przykładowo, jeżeli rozkład $F(t)$ jest wykładniczy, wówczas rozkład $F^{s+1}(t)$ jest rozkładem Erlanga rzędu $s+1$. Jeżeli rozkład $F(t)$ jest rozkładem Erlanga rzędu r to rozkład $F^{s+1}(t)$ jest rozkładem Erlanga rzędu $r(s+1)$ [131].

5.2. Niezdatność nadsystemu z jednoelementowym systemem technicznym, z niepomiąlnym czasem odnowy

W poprzednim podpunkcie rozpatrywano założenie, że odnowa elementu następuje natychmiastowo w chwili awarii elementu/systemu. Jednakże w praktyce często zdarza się, że czasu trwania operacji odnowy nie można pominąć w procesie analizy niezawodności obiektu/systemu.

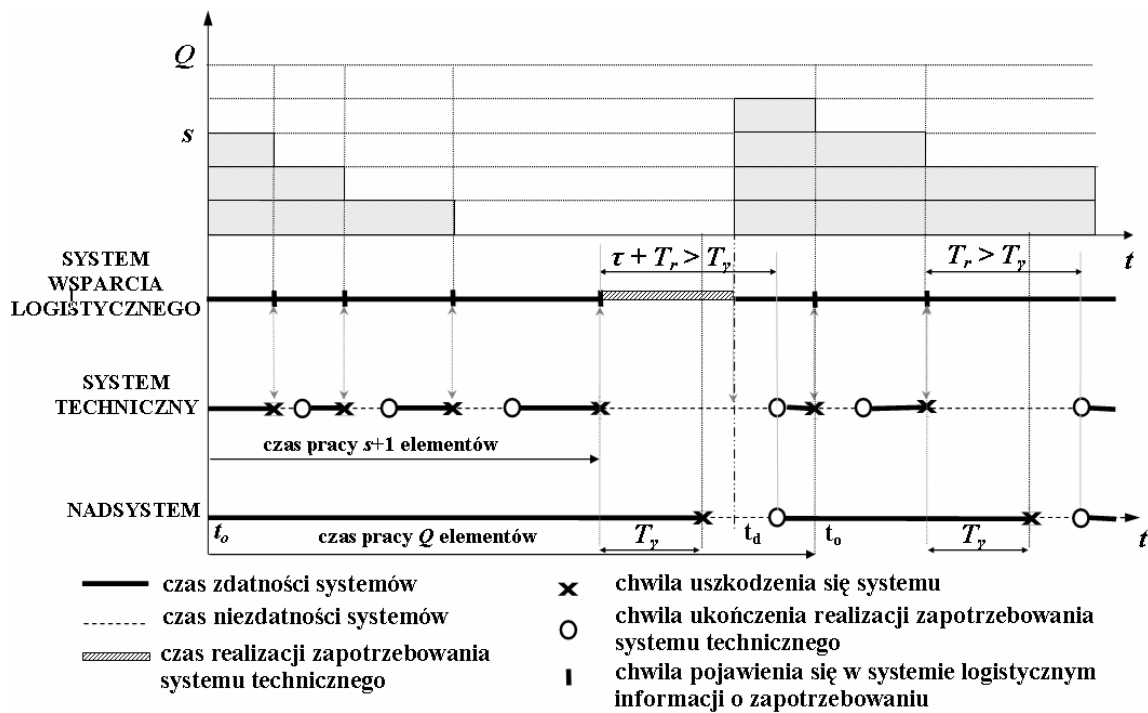
W sytuacji, gdy czas odnowy systemu technicznego jest niepomiąlny w stosunku do czasu jego zdatności, należy uwzględnić, iż czas realizacji zapotrzebowania systemu technicznego będzie zależał z jednej strony od czasu realizacji zapotrzebowania w niezbędne części wymienne τ , jak również od losowego czasu 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 systemu technicznego,
- nadsystem może przebywać w stanie niezdatności obejmującej zarówno możliwy czas niezdatności systemu wsparcia logistycznego, jak również czas odnowy systemu technicznego.

W omawianym przypadku nadsystem z rezerwą czasową może przejść w stan niezdatności, jeżeli:

- czas dostawy elementów wymiennych, niezbędnych w procesie odnowy systemu technicznego, przekroczył dostępną rezerwę czasową (okres niezdatności nadsystemu obejmuje pozostały czas dostawy elementów wymiennych oraz czas odnowy systemu technicznego, licząc od chwili przekroczenia dopuszczalnej rezerwy T_γ);
- czas odnowy systemu wspieranego przekroczył dostępną rezerwę czasową (okres niezdatności nadsystemu obejmuje pozostały czas odnowy systemu technicznego, licząc od chwili przekroczenia dopuszczalnej rezerwy T_γ).

Funkcjonowanie tak zdefiniowanego nadsystemu zostało zobrazowane na rysunku 5.2.1.



Rys. 5.2.1. Uproszczony model nadsystemu z niepomiernym czasem odnowy systemu technicznego z uwzględnieniem wielkości zapasów elementów wymiennych w funkcji czasu ($Q = 5, s = 3$)

Opóźnienie pojawienia się uszkodzenia systemu wsparcia logistycznego powoduje, że dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca czas realizacji zapotrzebowania na części wymienne przez system wsparcia logistycznego, może zostać opisana zmodyfikowaną formułą (5.1.3):

$$\Psi(\tau) = U(t)(E(t + \tau) - E(t)) \quad (5.2.1)$$

gdzie:

$U(t)$ – kompozycja dystrybuant rozkładów prawdopodobieństw opisujących czas poprawnej pracy oraz czas odnowy kolejnych $s+1$ elementów systemu technicznego (($s+1$)-krotny splot funkcji)

Rozkłady $F^{s+1}(t)$ oraz $G^{s+1}(t)$ można wyznaczyć przy wykorzystaniu formuły (5.1.2) oraz:

$$G^{s+1}(t) = \int_0^t G^s(t-x)dG(x) \quad (5.2.2)$$

gdzie:

$G^{s+1}(t)$ – kompozycja rozkładów prawdopodobieństw, opisujących czas wymiany kolejnych $s+1$ elementów (($s+1$)-krotny splot funkcji)

Jednocześnie rozkład $U(t)$ opisany jest wzorem [73]:

$$U(t) = \int_0^t F^{s+1}(t-x) dG^{s+1}(x) \quad (5.2.3)$$

Natomiast gęstość rozkładu prawdopodobieństwa opisująca okres realizacji zapotrzebowania na części wymienne przez system logistyczny [73, 151]:

$$\psi(\tau) = \int_0^{\infty} u(t) \varepsilon(t+\tau) dt \quad (5.2.4)$$

gdzie:

$u(t)$ – kompozycja rozkładów prawdopodobieństw, opisujących łączny czas pracy i wymiany kolejnych $s+1$ elementów, zgodnie ze wzorem:

$$u(t) = f_i^{s+1}(t) \quad (5.2.5)$$

gdzie:

$f_1(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej określającej łączny czas pracy i wymiany elementu ($T_o + T_r$), zgodnie z [73]:

$$f_1(t) = \int_0^t f(x) g(t-x) dx \quad (5.2.6)$$

gdzie:

$g(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas odnowy systemu technicznego

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 [73]:

$$B_1(\xi_1) = \int_0^{\xi_1} B(\xi_1 - x) dG(x) \quad (5.2.7)$$

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

Gęstość rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca okres niezdatności nadsystemu wynikającej zarówno z możliwego braku elementów wymiennych, jak również czasu

realizacji operacji odnowy systemu wspieranego, można opisać jako kompozycję dwóch funkcji [73, 151]:

$$b_1(\xi_1) = \int_0^{\xi_1} b(x)g(\xi_1 - x)dx \quad (5.2.8)$$

gdzie:

$b(t)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa, opisująca okres niezdatności nadsystemu wynikającej tylko z braku elementów wymiennych

W rozpatrywanym modelu nadsystem w trakcie jednego cyklu zaopatrzeniowego ($Q - 1$) razy przejdzie w stan niezdatności spowodowany jedynie zbyt długim czasem naprawy. Przez $w(\xi_1)$ nazwijmy funkcję gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, opisującą okres niezdatności nadsystemu z powodu przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej przez czas naprawy:

$$w(\xi_1) = \int_0^{\infty} f_2(t)g(t + \xi_1)dt \quad (5.2.9)$$

gdzie:

$f_2(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, zmiennej losowej definiującej czas do chwili pojawienia się i -tego uszkodzenia nadsystemu w jednym cyklu zaopatrzenia:

$$f_2(t) = \begin{cases} \int_0^t f(x)\varphi(t-x)dx & \text{dla } i = 1 \\ \int_0^t f_{21}(x)\varphi(t-x)dx & \text{dla } i = 2, 3, \dots, s \\ \int_0^t f_{22}(x)\varphi(t-x)dx & \text{dla } i = s + 2, s + 3, \dots, Q \end{cases} \quad (5.2.10)$$

gdzie:

$f_{2j}(t)$ – funkcje gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, zmiennej losowej definiującej czas poprawnej pracy oraz czas odnowy do chwili i -tego uszkodzenia systemu technicznego:

$$f_{21}(t) = \int_0^t f^i(x)g^{i-1}(t-x)dx \quad (5.2.11)$$

$$f_{22}(t) = \int_0^t f_{21}(x)\psi(t-x)dx \quad (5.2.12)$$

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: $b_1(\xi_1)$ (formuła (5.2.8)). W związku z tym, biorąc pod uwagę wszelkie możliwe przejścia nadsystemu w stan niezdatności w trakcie jednego cyklu zaopatrzenia, gęstość prawdopodobieństwa, opisująca okres niezdatności nadsystemu można przedstawić jako:

$$b_2(\xi_1) = \frac{1}{Q} b_1(\xi_1) + \frac{Q-1}{Q} w(\xi_1) \quad (5.2.13)$$

gdzie:

$b_2(\xi_1)$ – gęstość prawdopodobieństwa opisująca okres każdorazowej niezdatności nadsystemu podczas jednego cyklu zaopatrzenia

Zgodnie ze wzorem (5.2.13) losowy czas realizacji dostaw, losowy czas odnowy oraz poziom zamawiania bezpośrednio wpływają na kształt funkcji $b_1(\xi_1)$. Z kolei kształt funkcji $g(\xi_1)$ opisuje losowy czas wymiany elementu pracującego w systemie technicznym. Jednocześnie Q nadaje wagę ewentualnemu zdarzeniu polegającemu na braku elementów wymiennych w systemie wsparcia logistycznego [118].

Prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności w jednym cyklu zaopatrzenia można wyznaczyć zgodnie ze wzorem:

$$P_{NNj} = \int_0^{\infty} b_2(t) dt \quad (5.2.14)$$

5.3. Niezdatność nadsystemu z wieloelementowym systemem technicznym

Przyjmując, że system techniczny jest systemem wieloelementowym o określonej strukturze niezawodności, model opisujący czas niezdatności nadsystemu z rezerwą czasową zależy także od przyjętej struktury niezawodności, która determinuje chwile przejścia systemu technicznego w stan niezdatności. W analizowanym przypadku, dystrybuantę prawdopodobieństwa, opisującą niezdatność systemu wsparcia logistycznego, można wyznaczyć zgodnie ze zmodyfikowaną formułą (5.2.1):

$$\Psi(\tau) = U_s(t)(E(t + \tau) - E(t)) \quad (5.3.1)$$

gdzie:

$U_s(t)$ – kompozycja dystrybuant rozkładów prawdopodobieństw opisujących czas poprawnej pracy oraz odnowy kolejnych $s+1$ elementów (($s+1$)-krotny spłot funkcji) (uzależniona od struktury niezawodnościowej systemu technicznego), opisana zmodyfikowaną formułą (5.2.3):

$$U(t) = \int_0^t F_s^{s+1}(t-x) dG_s^{s+1}(x) \quad (5.3.2)$$

gdzie:

$F_s^{s+1}(t)$ – kompozycja rozkładów prawdopodobieństw opisujących czas poprawnej pracy kolejnych $s + 1$ elementów (uzależniona od struktury niezawodnościowej systemu technicznego)

$G_s^{s+1}(t)$ – kompozycja dystrybuant rozkładów prawdopodobieństw czasu wymiany wszystkich elementów, których działanie pozwoli na przywrócenie nadsystemu do stanu zdatności (uzależniona od struktury niezawodnościowej systemu technicznego)

Gęstość prawdopodobieństwa, opisującą niezdatność systemu wsparcia logistycznego, można wyznaczyć zgodnie ze zmodyfikowaną formułą (5.2.4):

$$\psi(\tau) = \int_0^{\infty} u_s(t) \mathcal{E}(t + \tau) dt \quad (5.3.3)$$

gdzie:

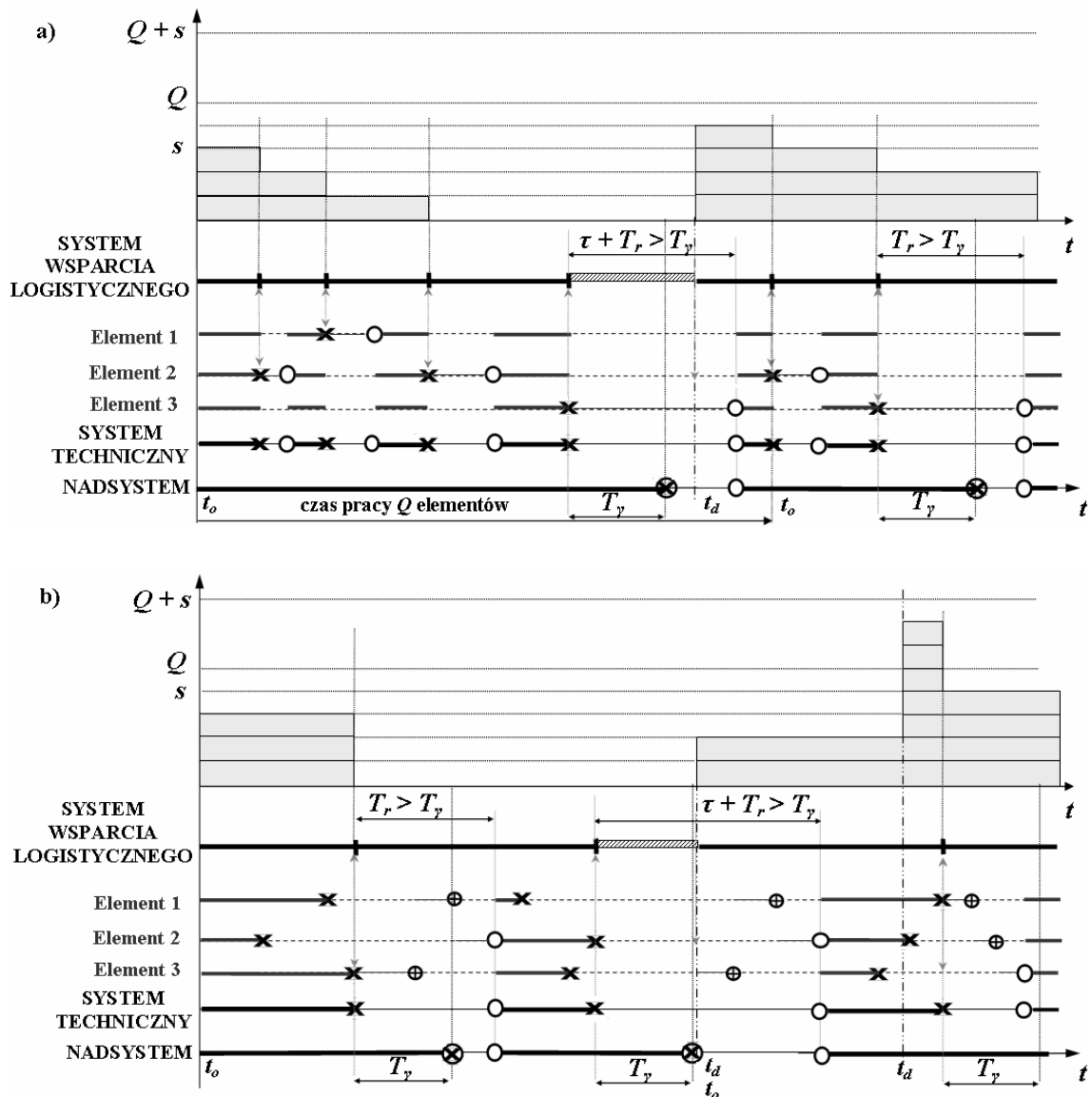
$u_s(t)$ – gęstość prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy systemu, gdy pojawi się niezdatność z powodu braku części wymiennych (uzależniona od struktury niezawodności systemu wspieranego)

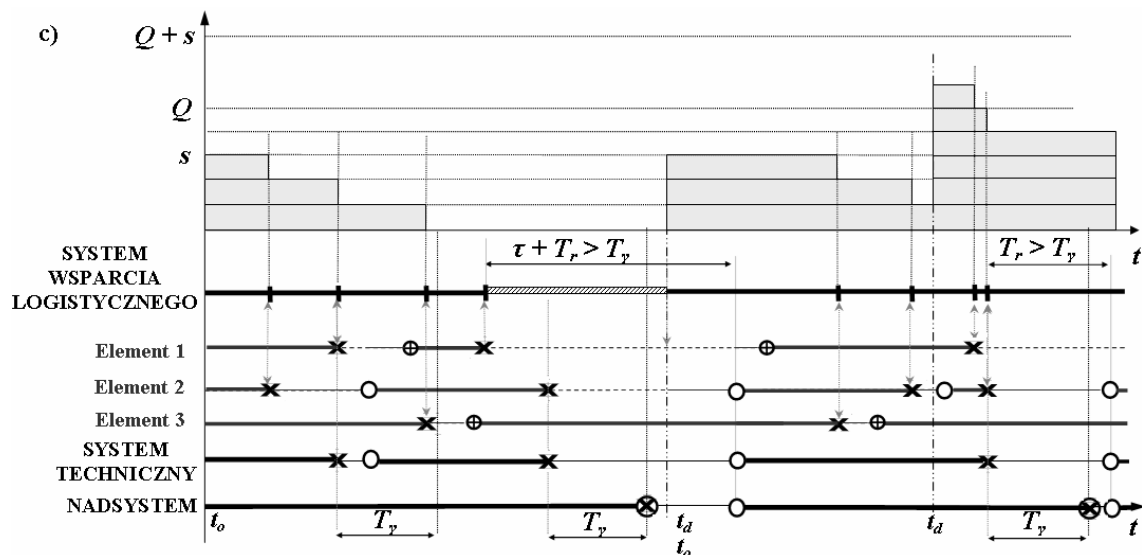
Pozostałe funkcje definiujące:

- funkcję dystrybuanty niezdatności nadsystemu $B(\zeta)$, wynikającej tylko z braku elementów wymiennych,
- funkcję dystrybuanty niezdatności nadsystemu $B_1(\zeta)$, wynikającej zarówno z braku elementów wymiennych jak również ze zbyt długiego czasu odnowy systemu technicznego,
- gęstość prawdopodobieństwa $b(\zeta)$, opisującą okres niezdatności nadsystemu, mogący wynikać z braku części wymiennych,
- gęstość prawdopodobieństwa $b_1(\xi_1)$, opisującą okres niezdatności nadsystemu, wynikający zarówno z braku elementów wymiennych jak i realizacji operacji obsługowych w systemie technicznym wieloelementowym, w jednym cyklu zaopatrzenia,

można wyznaczyć poprzez wykorzystanie zmodyfikowanych formuł przedstawionych dla modelu jednoelementowego, uwzględniających problem funkcjonowania systemu technicznego w wybranej strukturze niezawodnościowej.

Wyznaczenie analitycznych form omówionych funkcji związane jest z koniecznością analitycznego opisu funkcji czasu do uszkodzenia systemu technicznego $F_s(t)$ ($f_s(t)$), czasu odnowy tego systemu $G_s(t)$ ($g_s(t)$) dla różnych struktur niezawodnościowych, jak również z operacją wyznaczenia odpowiednich splotów tych funkcji. Analizie, zgodnie z przedstawionymi założeniami teoretycznymi, poddano przypadki trzech struktur niezawodnościowych: szeregową, progową oraz równoległą. Przykłady funkcjonowania nadsystemu w czasie, przy uwzględnieniu tych struktur niezawodnościowych systemu technicznego, determinujących chwile jego przejścia w stan niezdatności, zostały przedstawione na rysunku 5.3.1.





Rys. 5.3.1. Uproszczony model funkcjonowania nad systemu z rezerwą czasową dla różnych struktur niezawodnościowych systemu technicznego (a – szeregowej ($n = 3$), b – równoległej ($n = 3$), c – progowej ($n = 3, k = 2$)); ($Q = 5, s = 3$)

gdzie:

- - czas poprawnej pracy elementu/systemu (zdatności)
- - czas odnowy elementu/systemu (niezdatności)
- - czas oczekiwania w systemie (na naprawę elementu lub podczas naprawy innego elementu)
- ⊗ - chwila przejścia elementu/systemu w stan niezdatności
- - chwila przywrócenia zdatności systemu
- ⊕ - chwila zakończenia odnowy elementu (w strukturze równoległej i progowej)
- ⊗ - chwila uszkodzenia nad systemu w wyniku przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej na przywrócenie systemu technicznego do stanu zdatności

Zgodnie z przedstawionymi schematami, w zależności od struktury niezawodności systemu technicznego, badany nad system z rezerwą czasową charakteryzuje:

- różny czas niezdatności/zdatności systemów i nad systemu,
- różne chwile pojawienia się zapotrzebowania na elementy wymienne w systemie wsparcia logistycznego,
- różne chwile pojawienia się niezdatności nad systemu,

pomimo założenia o podobieństwie czasów pracy i odnów pojedynczych elementów tworzących system techniczny. Pozwala to na stwierdzenie, iż wyznaczenie postaci analitycznych funkcji modelu nad systemu z systemem technicznym wieloelementowym jest bardzo utrudnione. Praktyczna wartość danych wzorów jest niewielka ze względu na stopień komplikacji obliczeń dla dużej liczby zapasów s oraz możliwości przeprowadzenia badań analitycznych modelu przede wszystkim przy założeniu wykładniczych rozkładów

prawdopodobieństwa zmiennych losowych. Praktycznym rozwiązaniem postawionego problemu jest wykorzystanie modelu symulacyjnego, bazującego na opisanych formułach.

5.4. Funkcja gotowości nadsystemu z rezerwą czasową

Podstawową charakterystyką opisującą proces funkcjonowania każdego systemu technicznego jest jego gotowość. Zgodnie z [262] miarą gotowości obiektu/systemu jest prawdopodobieństwo, że badany obiekt/system znajduje się w stanie zdatności funkcjonalnej i zadaniowej w ustalonej chwili czasu t .

Obiekt/system znajduje się w stanie zdatności, jeżeli zachodzą dwa następujące rozłączne zdarzenia [73, 262]:

- a) czas zdatności do pierwszego uszkodzenia jest dłuższy niż czas t ;
- b) do chwili t zaszło dokładnie n odnowień i w chwili t obiekt jest w stanie zdatności operacyjnej.

W związku z tym, przy założeniu, że wszystkie elementy pracujące w systemie są opisane identycznymi funkcjami rozkładu prawdopodobieństwa czasu pracy oraz czasu naprawy, gotowość systemu/obiektu $A(t)$ można opisać następującą funkcją [73]:

$$A(t) = 1 - F(t) + \int_0^t [1 - F(t-x)] dH(x) \quad (5.4.1)$$

gdzie:

$F(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu pracy obiektu/systemu

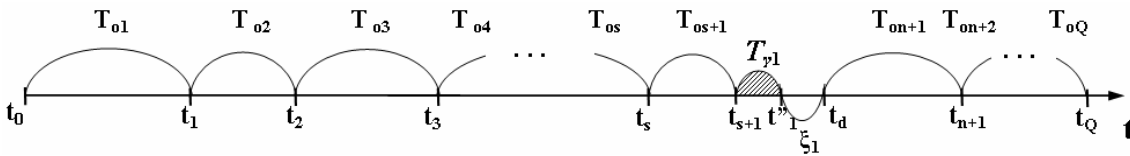
$H(t)$ – funkcja odnowy systemu

W przypadku omawianego nadsystemu z rezerwą czasową realizowany jest proces obsługiwanego ze skończonym czasem odnowy. Zgodnie z założeniami modelu i opisem funkcjonowania nadsystemu, czas odnowy nadsystemu obejmuje pozostały czas przywrócenia zdatności systemu technicznego, licząc od chwili przekroczenia ustalonej dostępnej rezerwy czasowej do chwili zakończenia operacji wymiany elementu/elementów uszkodzonych.

Wyznaczenie funkcji gotowości omawianego systemu można przeprowadzić w dwóch etapach. W pierwszym kroku założono, że czas odnowy systemu technicznego jest pomijalnie mały. W takiej sytuacji rozpatrywany proces odnowy przedstawiono na rysunku 5.4.1.

Zgodnie z przedstawionym schematem, z chwilą kiedy poziom zapasów w systemie wsparcia logistycznego osiągnie poziom zamawiania, rozpoczyna się nowy cykl zaopatrzenia nadsystemu. Jeżeli wszystkie elementy wymienne zostaną zużyte (ostatni element zapasowy ulegnie uszkodzeniu) nadsystem może przejść w stan niezdatności z powodu przekroczenia przez pozostały okres dostawy dostępnej rezerwy czasowej, przeznaczonej na tą operację. Po

uzupełnieniu poziomu zapasów w nadsystemie dalej realizowane są podstawowe operacje (proces uszkodzeń i wymiany elementów) aż do chwili ponownego osiągnięcia przez stan zapasów elementów wymiennych poziomu zamawiania (rozpoczyna się kolejny cykl zaopatrzenia).



Rys. 5.4.1. Proces odnowy nadsystemu z rezerwą czasową (T_r systemu technicznego pomijalny)

gdzie:

t_i – chwila uszkodzenia się systemu technicznego

t''_i – chwila uszkodzenia się nadsystemu

t_d - chwila dostawy części wymiennych

W związku z tym, funkcja gotowości może zostać opisana zmodyfikowaną formułą (5.4.1):

$$A(t) = 1 - F_s(t) + \int_0^t [1 - F_s(t-x)]h(x)dx \quad (5.4.2)$$

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 momentu wykorzystania wszystkich elementów wymiennych znajdujących się w zapasie:

$$h_1(t) = \sum_{i=1}^s f_s^i(t) \quad (5.4.3)$$

- 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:

$$h_2(t) = \int_0^t f_s(t-x)b(x)dx \quad (5.4.4)$$

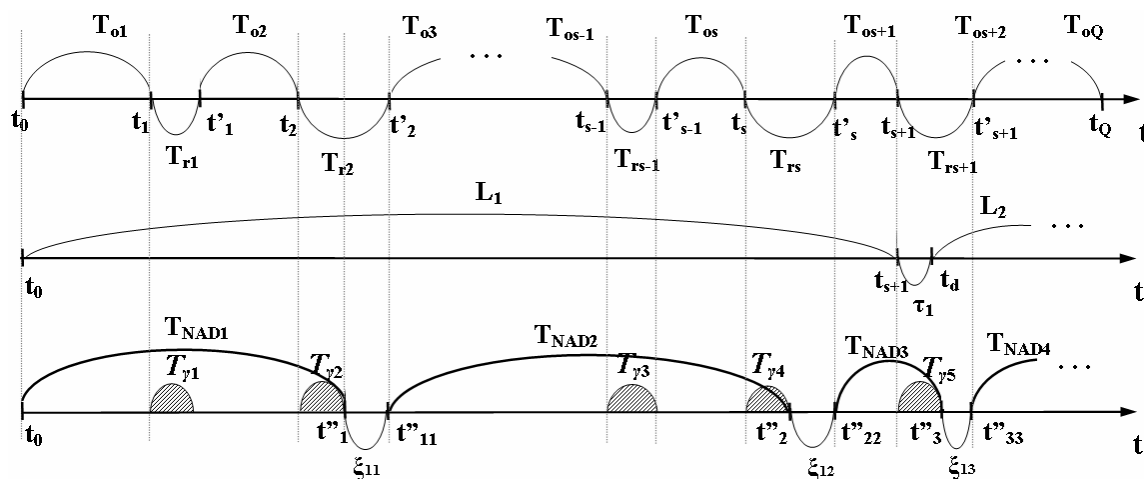
- po wykorzystaniu dostępnych części wymiennych, nadsystem może przejść w stan niezdatności spowodowany zbyt długim czasem realizacji dostawy do systemu wsparcia logistycznego ($\tau > T_\gamma$), przez co kolejne momenty uszkodzeń mogą zostać przesunięte w czasie o zadany okres realizacji zadania logistycznego:

$$h_3(t) = \sum_{i=s+2}^Q \int_0^t f_s^i(t-x) \psi(x) dx \quad (5.4.5)$$

W związku z tym funkcja gęstości odnowy $h(t)$ w badanym przypadku opisana jest wzorem:

$$h(t) = h_1(t) + h_2(t) + h_3(t) \quad (5.4.6)$$

Uwalniając założenie o pomijalnym czasie odnowy systemu technicznego, funkcja gęstości odnowy nadsystemu z rezerwą czasową jest zmienna w cyklu zaopatrzenia zgodnie z przedstawionym schematem (rysunek 5.4.2).



Rys. 5.4.2. Proces odnowy nadsystemu z rezerwą czasową (T_γ systemu technicznego niepomijalny)

gdzie:

t'_i – chwila zakończenia odnowy systemu technicznego

t''_{ii} – chwila przywrócenia zdatności nadsystemu

Pierwszy okres procesu odnowy nadsystemu, zgodnie z przedstawionym schematem, obejmuje czas od chwili złożenia zamówienia na elementy wymienne, do chwili wykorzystania ostatniej, dostępnej w systemie wsparcia logistycznego, części wymiennej. W tym okresie gotowość nadsystemu zależy od:

- czasu poprawnej pracy s elementów wymiennych,
- czasu wymiany uszkodzonych elementów systemu technicznego.

Drugi sub-okres obejmuje czas poprawnej pracy i wymiany $(s+1)$ -go elementu systemu technicznego. W tym okresie nadsystem może przejść w stan niezdatności z powodu braku części wymiennych i/lub zbyt długiego czasu wymiany uszkodzonego elementu.

Trzeci sub-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:

$$h_1(t) = \sum_{i=1}^s f_r^i(t) \quad (5.4.7)$$

gdzie:

$f_r(t)$ – kompozycja gęstości rozkładów prawdopodobieństwa funkcji $m(t)$ oraz $w(t)$, wyznaczana zgodnie ze wzorem:

$$f_r(t) = \int_0^t m(t-x)w(x)dx \quad (5.4.8)$$

gdzie:

$m(t)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa pojawienia się uszkodzenia nadsystemu, wyznaczana na podstawie formuły:

$$m(t) = \left[\int_0^t f(t-x) \cdot \varphi(x) dx \right] \int_t^\infty g(x) dx \quad (5.4.9)$$

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:

$$h_2(t) = \int_0^t m(t-x)b_2(x)dx \quad (5.4.10)$$

Chwila każdego kolejnego uszkodzenia się systemu i jego odnowy może zostać przesunięta w czasie, co odzwierciedla gęstość odnowy $h_3(t)$:

$$h_3(t) = \sum_{i=s+2}^Q \int_0^t f_r^i(t-x)\psi(x)dx \quad (5.4.11)$$

Jednocześnie funkcja gęstości odnowy nadsystemu z rezerwą czasową przyjmuje postać zgodnie ze wzorem (5.4.6). Funkcja gotowości jest wyznaczana zgodnie ze wzorem (5.4.2).

Jeżeli system techniczny zostanie uogólniony do systemu wieloelementowego, przedstawione funkcje $f_r(t)$, $\psi(t)$ oraz $b_2(t)$ należy dodatkowo uzależnić od struktury niezawodnościowej systemu technicznego.

5.4.1. Współczynnik gotowości nadsystemu z rezerwą czasową

Przedstawiony model matematyczny funkcji gotowości praktycznie rzadko jest wykorzystywany ze względu na stopień komplikacji obliczeń. Zwykle stosuje się tzw. wskaźnik gotowości, definiowany jako średni udział czasu, w którym badany system przebywa w stanie zdatności [131]:

$$A(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (5.4.1.1)$$

Podstawowy wzór definiujący omawiany wskaźnik w badanym okresie [262]:

$$A = \frac{T_Z}{T_Z + T_N} = 1 - \frac{T_N}{T_Z + T_N} \quad (5.4.1.2)$$

gdzie:

T_Z – oczekiwany czas zdatności systemu

T_N – oczekiwany czas niezdatności systemu

Wskaźnik gotowości w jednym cyklu zaopatrzenia dla nadsystemu z rezerwą czasową można przedstawić przy wykorzystaniu następujących formuł:

- dla nadsystemu w którym system techniczny jest jednoelementowy, z pomijalnym czasem odnowy:

$$A = 1 - \frac{E[\xi]}{QE[T_o] + E[\tau]} \quad (5.4.1.3)$$

- dla nadsystemu w którym system techniczny jest jednoelementowy, z niepomiąlnym czasem odnowy:

$$A = 1 - \frac{E[\xi_1]}{Q(E[T_o] + E[T_r]) + E[\tau]} \quad (5.4.1.4)$$

Wskaźnik gotowości dla nadsystemu, w którym system techniczny jest wieloelementowy, przedstawioną formułą (5.4.1.4) należy dodatkowo uzależnić od struktury niezawodnościowej analizowanego systemu.

Przedstawiony model funkcji gotowości oraz współczynnika gotowości nadsystemu z rezerwą czasową odznacza się pewną uciążliwością, związaną z koniecznością wyznaczenia n -krotnych splotów funkcji oraz znajomości struktury niezawodnościowej systemu technicznego, przez co, dla innych rozkładów niż wykładniczy, uzyskane postacie wzorów

odznaczałyby się bardzo dużym stopniem skomplikowania. Praktycznym rozwiązaniem problemu jest wykorzystanie procesu symulacji realizowanych zadań nadsystemu i, w wyniku jej przeprowadzenia, uzyskanie wartości współczynnika gotowości dla przyjętych założeń obliczeniowych.

5.5. Model wsparcia logistycznego funkcjonowania systemu technicznego

W analizowanym nadsystemie z rezerwą czasową nie każde uszkodzenie systemu technicznego spowoduje w konsekwencji przejście tego nadsystemu w stan niezdatności. Taka sytuacja jest bezpośrednio związana z wpływem procesu logistycznej realizacji dostawy części wymiennych do systemu technicznego na proces jego obsługi. Drugim parametrem sterującym, bezpośrednio definiującym prawdopodobieństwo niezdatności nadsystemu, jest kryterium rezerwy czasowej T_r . Konsekwentnie, im dłuższa rezerwa czasowa, przyjęta w nadsystemie, tym większa jego zdolność do tolerowania zakłóceń realizacji procesów systemu technicznego. W takiej sytuacji pojawia się istotne pytanie: jaki powinien być zaprojektowany system wsparcia logistycznego, który pozwoli na efektywne utrzymanie funkcjonującego (zdefiniowanego) systemu technicznego. Rozwiązaniem tak postawionego problemu jest model optymalizacji wsparcia logistycznego ze względu na kryterium minimalizacji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu, przy ustalonym warunku ograniczającym poziom gotowości nadsystemu:

$$\begin{cases} \min C_s(s, Q) \\ A(\infty) \geq A_{\min} \end{cases} \quad (5.5.1)$$

gdzie:

A_{\min} – minimalny poziom gotowości nadsystemu, ustalany ze względu na parametr dostępnej rezerwy czasowej

Tak zdefiniowany model optymalizacyjny wymaga przeanalizowania funkcji kosztów funkcjonowania nadsystemu z rezerwą czasową.

5.5.1. Funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu z rezerwą czasową

Zgodnie z teorią odnowy [18], oczekiwane koszty funkcjonowania systemu w jednostce czasu, przy założeniu warunków stacjonarnych, można wyznaczyć wzorem:

$$C_s(s, Q) = \frac{C_{sj}(s, Q)}{E[T_{cj}(s, Q)]} \quad (5.5.1.1)$$

gdzie:

$C_{sj}(s, Q)$ – funkcja oczekiwanych kosztów nadsystemu w j-tym cyklu zaopatrzenia

$T_{cj}(s, Q)$ – losowy czas trwania j -tego cyklu zaopatrzenia

W analizowanym przypadku oszacowanie oczekiwanego czasu trwania cyklu zaopatrzenia jest proste, zgodnie ze schematem (rys. 5.4.2) obejmuje on oczekiwane czasy: poprawnej pracy i wymiany Q elementów oraz oczekiwany czas realizacji zapotrzebowania systemu technicznego przez system wspierający $E[\tau]$:

$$E[T_{cj}(s, Q)] = Q(E[T_o] + E[T_r]) + E[\tau] \quad (5.5.1.2)$$

Natomiast koszty funkcjonowania nadsystemu w jednym cyklu zaopatrzenia obejmują [6, 18, 39, 44, 206]:

- oczekiwane koszty funkcjonowania systemu technicznego C_w – uwzględniające jedynie koszty wymiany elementów uszkodzonych systemu technicznego, wyrażone funkcją:

$$C_w = c_w H(t) \quad (5.5.1.3)$$

- oczekiwane koszty wsparcia logistycznego C_z – obejmujące koszty zamawiania C_o oraz koszty utrzymania zapasów C_h . Na uwagę zasługują koszty utrzymania zapasów, które są bezpośrednio związane z nakładami, jakie są ponoszone w trakcie składowania części wymiennych w magazynie (np. koszty utrzymania powierzchni magazynowej, tzw. koszty „zamrożonego kapitału”, itp.). Koszty te są wyrażane w funkcji czasu składowania, która zależy bezpośrednio od intensywności uszkodzeń elementów systemu technicznego oraz intensywności ich napraw:

$$C_z = c_o + c_p Q + c_h E \left\{ \int_0^{T_{cj}} I(t) dt \right\} \quad (5.5.1.4)$$

gdzie:

c_o – koszt obsługi jednego zamówienia

$I(t)$ – funkcja wielkości zapasów w chwili t w cyklu zaopatrzenia

- oczekiwane koszty niezdatności nadsystemu C_{dw} – uwzględniające koszty kar finansowych, wynikających z pojawienia się niezdatności nadsystemu oraz kosztów tzw. utraconych korzyści, będących liniową funkcją oczekiwanego czasu niezdatności nadsystemu:

$$C_{dw} = k_f H(t) + c_{dw} E[\xi] \quad (5.5.1.5)$$

gdzie:

k_f – jednorazowy koszt kary w wyniku pojawienia się niezdatności nadsystemu w jednym cyklu zaopatrzenia

c_{dw} – jednostkowy koszt niezdatności nadsystemu w jednostce czasu

Funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu wyraża się wzorem:

$$C_s(s, Q) = \left[c_w H(t) + c_o + c_p Q + c_h E \left\{ \int_0^{T_{ej}} I(t) dt \right\} + P_{NNj} (k_f H(t) + c_{dw} E[\xi_1]) \right] \times [Q(E[T_o] + E[T_r]) + E[\tau]]^{-1} \quad (5.5.1.6)$$

gdzie:

P_{NNj} – prawdopodobieństwo niezdatności nadsystemu w j -tym cyklu zaopatrzenia

Pomimo założenia, że dopuszczalne są okresy braku zapasów w magazynie systemu wsparcia logistycznego, jak również uwzględnienia możliwość pojawienia się uszkodzeń systemu technicznego – nie każdy brak zapasów czy niezdatność systemu technicznego muszą powodować uszkodzenie nadsystemu. Dlatego też w analizowanym przypadku w strukturze kosztów nie są uwzględniane koszty niezdatności analizowanych systemów w nadsystemie do chwili przekroczenia założonej rezerwy czasowej T_r .

6. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI ANALITYCZNEGO MODELU SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ

Opracowanie modelu analitycznego przedstawionego nadsystemu z rezerwą czasową byłoby niepełne bez przeprowadzenia analizy wrażliwości jego parametrów. Jednocześnie, opracowane formuły modelu, w stosunkowo prosty sposób, można wyznaczyć jedynie przy założeniu upraszczającym, że wszystkie zmienne losowe modelu są opisane wykładniczymi rozkładami prawdopodobieństwa (np. [131]).

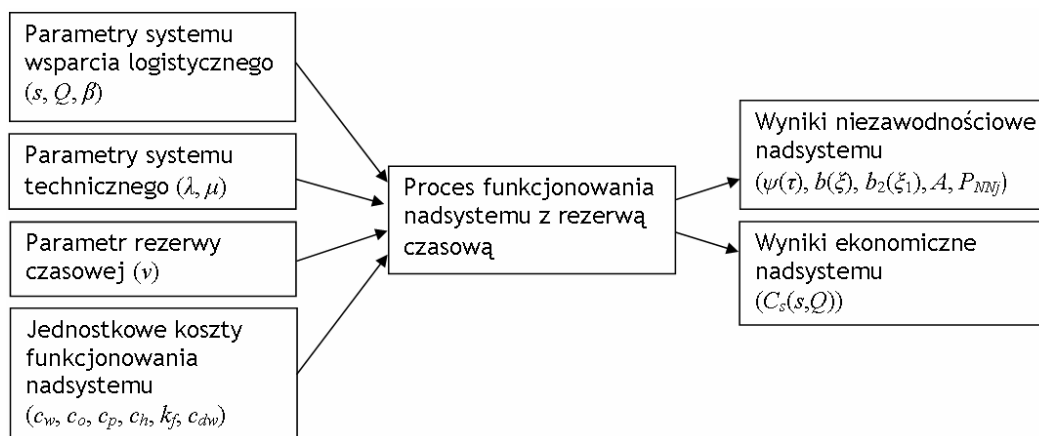
Uwzględniając powyższe, przyjęto następujące założenia w procesie analizy modelu matematycznego:

- nadsystem funkcjonuje w tzw. warunkach stacjonarnych;
- system techniczny jest jednoelementowy;
- czasy poprawnej pracy i odnowy systemu technicznego, czasy dostawy części wymiennych do systemu wsparcia logistycznego, jak również okres dostępnej rezerwy czasowej zostały opisane rozkładem wykładniczym;
- zgodnie z teorią kolejek, stosunek: $\rho = \frac{\lambda}{\mu} \leq 1$;
- koszty utrzymania zapasów są dziesięciokrotnie niższe od kosztów niezdatności nadsystemu.

W przeprowadzonych badaniach rozpatrzono dwie następujące sytuacje:

- a) w nadsystemie nie są utrzymywane żadne elementy zapasowe w magazynie wsparcia logistycznego ($s = 0, Q = 1$),
- b) polityka zarządzania zapasami w systemie wsparcia logistycznego przewiduje utrzymywanie 1, 2, lub 3 elementów zapasowych w magazynie (poziom zamawiania $s = 1, 2, 3; Q = 2, 3, 4$).

W wyniku przeprowadzonych obliczeń możliwe jest przeanalizowanie wpływu zmiany parametrów wejściowych modelu na zachowanie się nadsystemu. W oparciu o wstępną analizę zmienności poszczególnych parametrów wejściowych modelu, do szczegółowej analizy wrażliwości modelu nadsystemu z zależnością czasową przyjęto rodzaj i zakres zmienności parametrów wejściowych, który został przedstawiony w tabeli 6.1. Poza określonym zakresem zmienności, wpływ parametrów wejściowych modelu na podstawowe wyniki niezawodnościowe i ekonomiczne nadsystemu wydaje się pomijalny.



Rys. 6.1. Parametry wejściowe modelu nad systemu z rezerwą czasową mające wpływ na poziom jego funkcjonowania

Jednocześnie, badania wrażliwości analitycznego modelu nad systemu z rezerwą czasową przede wszystkim należy ograniczyć do oceny zmienności pięciu podstawowych funkcji (rys. 6.1):

- gęstości rozkładu prawdopodobieństwa opisującej okres realizacji zapotrzebowania na części wymienne przez system logistyczny $\psi(\tau)$;
- gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej okres niezdatności nad systemu $b(\xi)$ oraz $b_2(\xi_1)$;
- prawdopodobieństwa niezdatności nad systemu P_{NNj} ;
- wskaźnika gotowości A nad systemu;
- oczekiwanych kosztów funkcjonowania nad systemu $C_s(s, Q)$.

Tabela 6.1. Zakres zmienności parametrów wejściowych modelu nad systemu z rezerwą czasową

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Wielkość wyjściowa</i>	<i>Zakres zmienności (min:skok:max)</i>	<i>Objaśnienie</i>
1	λ	0,1	0,0001:0,05:1	intensywność uszkodzeń systemu technicznego
2	μ	0,2	0,1001:0,01:1	intensywność wymiany systemu technicznego
3	β	0,1	0,0001:0,05:1	intensywność dostaw systemu technicznego
4	ν	0,1	0,0001:0,05:1	intensywność parametru rezerwy czasowej
5	s	0	0:1:3	poziom zapasu alarmowego
6	Q	1	1:1:4	wielkość partii zamówienia

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Wielkość wyjściowa</i>	<i>Zakres zmienności (min:skok:max)</i>	<i>Objaśnienie</i>
7	c_w	50	0:100:4000	stały jednostkowy koszt wymiany uszkodzonego systemu technicznego
8	c_o	50	0:100:4000	stały jednostkowy koszt obsługi zamówienia
9	c_p	50	50:50:2000	stały jednostkowy koszt zakupu elementu wymiennego
10	c_h	100	0:100:10000	jednostkowy koszt utrzymania elementu wymiennego w jednostce czasu
11	c_{dw}	1000	0:100:4000	jednostkowy koszt niezdatności nadsystemu w jednostce czasu, zależny od czasu jego niezdatności
12	k_f	1000	0:100:10000	stały koszt kary finansowej, związany z każdorazową niezdatnością nadsystemu w wyniku przekroczenia ustalonej rezerwy czasowej T_r

Przy założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów w nadsystemie analityczne postacie formuł (5.1.2) ÷ (5.1.8), (5.4.1.3) oraz (5.5.3), (5.5.7) modelu z pomijalnym czasem odnowy systemu technicznego zostały przedstawione w tabeli 6.2.

Tabela 6.2. Analityczne postacie parametrów wyjściowych modelu nadsystemu z rezerwą czasową przy założeniu zgodności z rozkładem wykładniczym (pomijalny T_r)

<i>Formuła</i>		<i>Ogólna postać formuły dla rozkładu wykładniczego</i>
$F^{s+1}(t)$	(5.1.2)	$= 1 - \sum_{i=0}^s \frac{(\lambda t)^i}{i!} \cdot \exp(-\lambda t)$
$\Psi(\tau)$	(5.1.3)	$= \exp(-\beta \tau) \cdot (1 - \exp(-\beta \tau)) \cdot \left[1 - \sum_{i=0}^s \frac{(\lambda t)^i}{i!} \cdot \exp(-\lambda t) \right]$
$B(\xi)$	(5.1.6)	$= \exp(-\beta t) \cdot [1 - \nu \exp(-\nu t)] \cdot [1 - \exp(-\beta \tau)] \cdot \{[\exp(-\beta \xi) - 1] + \Delta\}$ gdzie: $\Delta = \sum_{i=0}^s \left[\frac{(\lambda t)^i}{i!} \cdot \exp(-\lambda t) - \frac{\lambda^i (t + \xi)^i}{i!} \exp(-\lambda t) \cdot \exp(-(\lambda + \beta)\xi) \right]$
$f^{s+1}(t)$	(5.1.5)	$= \frac{\lambda^{s+1} t^s}{s!} \cdot \exp(-\lambda t)$

Formuła		Ogólna postać formuły dla rozkładu wykładniczego
$\psi(\tau)$	(5.1.4)	$= \frac{\lambda^{s+1} \beta}{(\lambda + \beta)^{s+1}} \cdot \exp(-\beta\tau)$
$b(\xi)$	(5.1.7)	$= \frac{\lambda^{s+1} \beta \nu}{(\beta + \nu) \cdot (\lambda + \beta)^{s+1}} \cdot \exp(-\beta\xi)$
P_{NNlj}	(5.1.8)	$= \frac{\lambda^{s+1} \nu}{(\beta + \nu) \cdot (\lambda + \beta)^{s+1}}$
A	(5.4.1.3)	$= 1 - \frac{\lambda^{s+2} \nu}{\{(\beta + \nu) \cdot [Q \cdot \beta \cdot (s+1) \cdot (\lambda + \beta)^{s+1} + \lambda^{s+2}]\}}$
$E[T_{cj}(s, Q)]$	(5.5.3)	$= \frac{Q}{\lambda} + \frac{\lambda^{s+1}}{\beta \cdot (\lambda + \beta)^{s+1}}$
$C_s(s, Q)$	(5.5.7)	$= \frac{Q \cdot \beta \cdot (\lambda + \beta)^{s+1} + \lambda^{s+2}}{\lambda \cdot \beta \cdot (\lambda + \beta)^{s+1}} \cdot \left\{ c_w \cdot Q + c_o + c_p \cdot Q + c_h \cdot \left[\sum_{i=0}^{s-1} \frac{s-i}{\lambda} + \right. \right.$ $\left. + Q \cdot \max \left\{ 0; \frac{s+1}{\lambda} - \frac{1}{\beta} \right\} + \sum_{i=1}^{Q-(s+1)} \frac{Q-i}{\lambda} \right] +$ $\left. + \frac{\lambda^{s+1} \nu}{(\beta + \nu) \cdot (\lambda + \beta)^{s+1}} \cdot \left[k_f \cdot Q + k_{uk} \cdot \frac{\lambda^{s+1} \nu}{\beta \cdot (\beta + \nu) \cdot (\lambda + \beta)^{s+1}} \right] \right\}$

Uwolnienie założenia o pomijalności czasu odnowy systemu technicznego z jednej strony wpływa na poziom skomplikowania obliczeń modelu, wymagając realizacji obliczeń n -krotnych splotów matematycznych funkcji przedstawionych w rozdziale 5. Z drugiej strony, uzyskane wyniki pozwalają na przeprowadzenie analizy porównawczej obliczeń modeli z pomijalnym oraz niepomijalnym czasem wymiany elementu pracującego systemu wspieranego.

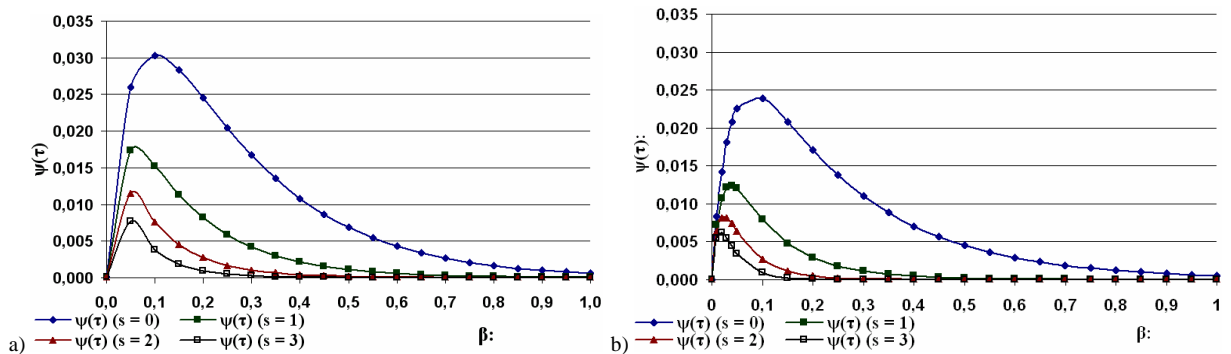
W kolejnych podrozdziałach omówiono tylko wybrane wyniki, uzyskane w procesie analizy wrażliwości. Szersza analiza została przedstawiona m.in. w [263, 265, 266, 267].

6.1. Intensywność dostaw elementów wymiennych

Czas realizacji zadań wspierających systemu logistycznego bezpośrednio wpływa na prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności nadsystemu oraz czas trwania niezdatności w pojedynczym cyklu zaopatrzenia. W związku z tym problem zaopatrzenia w niezbędne części wymienne zasługuje na szczególną uwagę w procesie analizy funkcjonowania nadsystemu.

Na wykresie 6.1.1 przedstawiono interpretację formalną wpływu zmiany parametru intensywności dostaw β na zachowanie się systemu wsparcia logistycznego, definiowane

zmiennością funkcji gęstości $\psi(\tau)$. Wyniki modelu, dla przyjętych założeń analizy wrażliwości, uzyskano przy założeniu, że oczekiwany czas realizacji zadania wspierającego $E[\tau]$ wynosi 5 jednostek czasu w przypadku modelu z pomijalnym czasem odnowy, oraz $E[\tau] = 3,33$ dla modelu z niepomiąlnym czasem wymiany uszkodzonego elementu pracującego.



Rys. 6.1.1. Zmienność wartości funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji zapotrzebowania systemu technicznego przez system logistyczny w funkcji zmiany parametru β a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomiąlnym T_r .

W badanym zakresie zmienności parametrów wejściowych, skracając oczekiwany czas dostawy $E[L]$ elementów wymiennych do systemu logistycznego prawdopodobieństwo, że czas realizacji zadania wspierającego będzie wynosił określoną wielkość oczekiwaną $E[\tau]$ wzrasta, osiągając maksimum dla:

- $\beta \approx 0,1$ ($s=0$), oraz $\beta \approx 0,05$ (pozostałe s) dla modelu z pomijalnym czasem T_r ;
- $\beta \approx 0,1$ ($s=0$), oraz $\beta \approx 0,03$ (pozostałe s) dla modelu z niepomiąlnym czasem T_r .

Punkt przegięcia analizowanego wykresu jest zmienny w zależności od poziomu oczekiwanego czasu reakcji systemu logistycznego $E[\tau]$. Po przekroczeniu wielkości maksymalnej, funkcja gęstości $\psi(\tau)$ maleje ze względu, iż oczekiwany czas dostawy $E[L]$ trwa zbyt krótko w stosunku do oczekiwanego czasu cyklu operacyjnego $(s+1)$ elementów pracujących w systemie technicznym, aby możliwe było uzyskanie wartości oczekiwanej czasu realizacji zadania logistycznego.

Z kolei, wpływ zmiany parametru intensywności dostaw β na funkcje gęstości prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu został przedstawiony na rysunku 6.1.2. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że oczekiwany czas niezdatności nadsystemu $E[\xi]$ wynosi 2,5 jednostek czasu, oraz $E[\xi_1] = 1,53$ jednostek czasu. Rysunek 6.1.3 przedstawia wpływ zmiany parametru intensywności dostaw β na funkcję prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu.

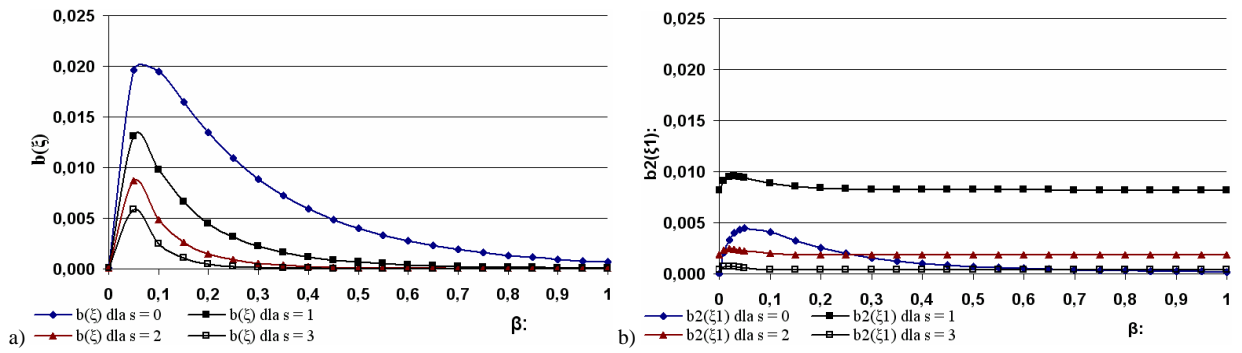
Przy przyjętych założeniach badania wrażliwości, analizując wpływ zmiany parametru intensywności dostaw β na poziom funkcji gęstości prawdopodobieństwa $b(\xi)$, można zaobserwować podobny charakter jej zmian w porównaniu do przebiegu funkcji gęstości $\psi(\tau)$ (rys. 6.1.1a). W długim okresie czasu brak dostaw ($\beta=0$) powoduje niezdatność systemu ($P_{NNIj}=1$) – nie ma możliwości, aby uszkodzenie systemu technicznego w wyniku braku elementów wymiennych trwało przez okres krótszy niż określona rezerwa czasowa. Skracając oczekiwany czas dostawy $E[L]$ części wymiennych do systemu logistycznego, prawdopodobieństwo że czas niezdatności nadsystemu, w wyniku przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej, będzie zgodny z wartością oczekiwaną $E[\xi]$ wzrasta, osiągając punkt maksymalny dla: $\beta \approx 0,05$ dla modelu nadsystemu z pomijalnym czasem wymiany T_r systemu technicznego.

Przedstawione wnioski potwierdzają uzyskane wyniki prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu P_{NNIj} w funkcji zmiany parametru β . Krótszy czas dostawy nowych elementów wymiennych bezpośrednio zmniejsza prawdopodobieństwo, że element pracujący systemu technicznego uszkodzi się przed zakończeniem realizacji dostawy, oczekiwany okres realizacji zadania logistycznego przekroczy dostępną rezerwę czasową, a niezdatność nadsystemu będzie zgodna z wartością oczekiwaną $E[\xi]$. Zwiększenie liczby utrzymywanych zapasów s zwiększa tolerancję nadsystemu na zakłócenia w realizacji procesu operacyjnego systemu technicznego oraz procesu wspierającego systemu logistycznego.

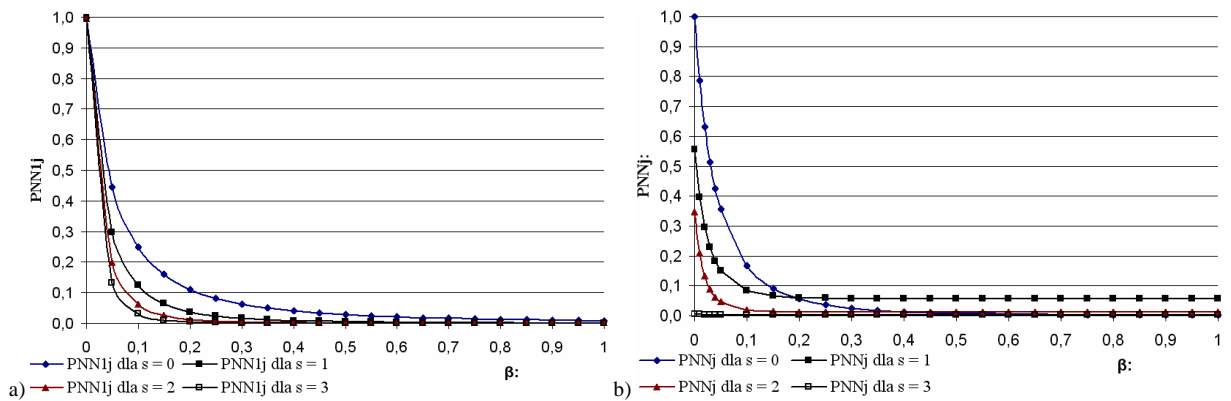
Na szczególną uwagę zasługuje analiza charakteru zmienności funkcji gęstości $b_2(\xi_1)$ w zależności od zmiany oczekiwanego czasu dostaw, charakteryzowanego przez parametr β .

Dla modelu, w którym nie są utrzymywane elementy wymienne ($s=0$) charakter przebiegu analizowanej zależności jest analogiczny do przedstawionego na wykresie 6.1.2a. W danym przypadku niezdatność nadsystemu zależy z jednej strony od czasu dostawy warunkującego dostępność elementów wymiennych w systemie logistycznym oraz od czasu odnowy systemu technicznego T_r .

Z kolei dla przypadków, w których są utrzymywane elementy wymienne w systemie wsparcia logistycznego ($s \neq 0$) niezdatność nadsystemu w cyklu zaopatrzenia zależy nie tylko od dostępności części wymiennych. Nadsystem może także przejść w stan niezdatności spowodowany przekroczeniem dostępnej rezerwy czasowej przez czas wymiany elementu pracującego, gdy w systemie wsparcia logistycznego znajdują się elementy zapasowe. Dlatego też, charakter zmienności funkcji $b_2(\xi_1)$ jest przesunięty o wielkość prawdopodobieństwa niezdatności opisanego funkcją gęstości $w(\xi_1)$ (formuła 5.2.9).



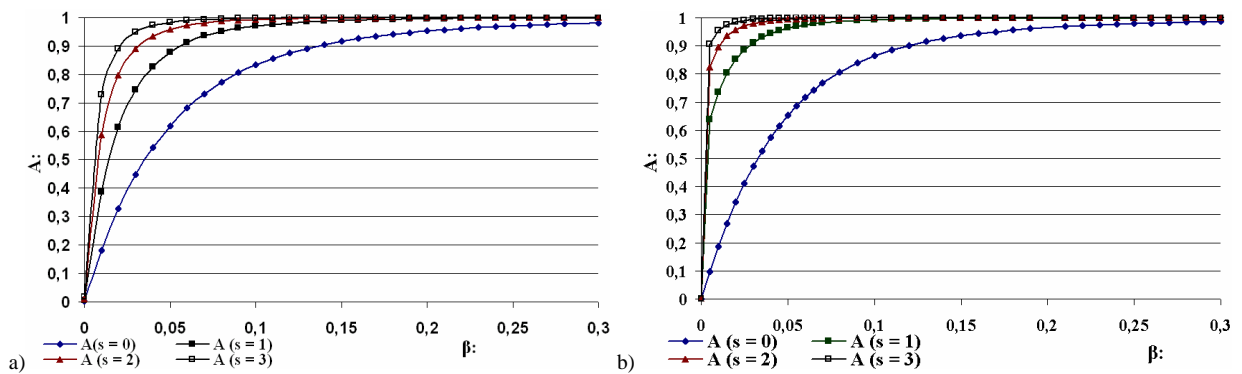
Rys. 6.1.2. Zmienność wartości funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru β a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomijalnym T_r



Rys. 6.1.3. Zmienność wartości funkcji prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru β a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomijalnym T_r

Kolejnym krokiem przedstawionej analizy porównawczej wyników uzyskanych dla modeli z pomijalnym oraz niepomijalnym czasem odnowy systemu technicznego, jest ocena poziomu gotowości nadsystemu.

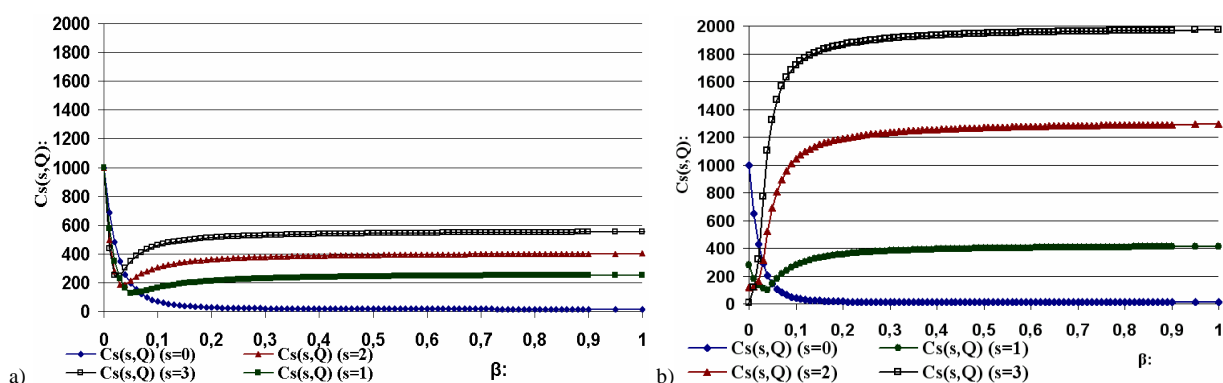
Wpływ oczekiwanego czasu dostaw, definiowanego zmiennością parametru β , na poziom wskaźnika gotowości A można zaobserwować na wykresie 6.1.4.



Rys. 6.1.4. Zmienność wartości funkcji wskaźnika gotowości nadsystemu w funkcji zmiany parametru β a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomijalnym T_r

Zgodnie z przewidywaniami, dla modelu z niepomiernym czasem odnowy systemu technicznego uzyskany poziom gotowości nadsystemu jest wyższy niż w przypadku modelu uproszczonego (dla przypadków $s \neq 0$). Uwzględnienie czasów wymiany systemu technicznego wydłużyło cykl zaopatrzenia nadsystemu, obniżając prawdopodobieństwo jego niezdatności z powodu braku elementów wymiennych.

Ponadto, analiza wrażliwości modelu nadsystemu z rezerwą czasową wymaga zbadania wpływu zmiany wielkości parametru intensywności dostaw na funkcję oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu (rys. 6.1.5).



Rys. 6.1.5. Zmienność wartości funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru β a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomiernym T_r .

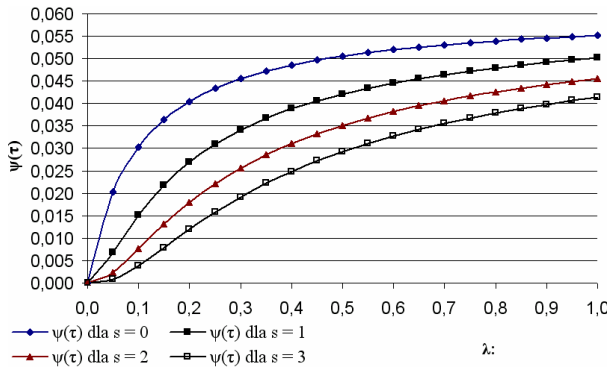
Charakter zależności funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru intensywności dostaw β dla obu badanych modeli można wytłumaczyć w sposób analogiczny. Ponownie różnica wyników dla obu rozpatrywanych modeli obejmuje zakres zmienności badanych kosztów – wyższy poziom kosztów w modelu z niepomiernym T_r przede wszystkim wiąże się z dłuższym okresem składowania elementów zapasowych oraz wyższymi kosztami niezdatności nadsystemu C_{dw} .

W przypadku, gdy w nadsystemie nie są utrzymywane zapasy ($s=0$), funkcja oczekiwanych kosztów $C_s(s, Q)$ maleje wraz ze skróceniem oczekiwanego czasu dostawy (β rosnące), co bezpośrednio związane jest z mniejszym prawdopodobieństwem niezdatności nadsystemu, oraz niższymi kosztami jego niezdatności. Zwiększenie poziomu alarmowego s wiąże się bezpośrednio ze wzrostem kosztów utrzymania zapasów (C_h), które w pewnym momencie przewyższają oszczędności ekonomiczne, które powstają w wyniku skrócenia okresu dostawy elementów wymiennych.

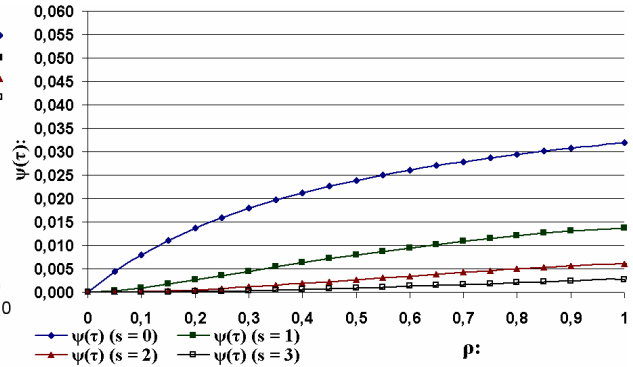
6.2. Intensywność uszkodzeń elementu pracującego systemu technicznego

Kolejnym parametrem, którego wpływ na uzyskiwane wyniki analityczne modelu nadsystemu z zależnością czasową przeanalizowano, jest oczekiwany czas poprawnej pracy

elementu pracującego systemu technicznego, definiowany w funkcji zmiany intensywności uszkodzeń λ . Na wykresach 6.2.1-6.2.2 przedstawiono interpretację formalną wpływu zmiany parametru intensywności uszkodzeń λ oraz parametru ρ na zachowanie się systemu wsparcia logistycznego, definiowane zmiennością funkcji gęstości $\psi(\tau)$.



Rys. 6.2.1. Zmienność wartości funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji zadania logistycznego w funkcji zmiany parametru λ (model z pomijalnym T_r)

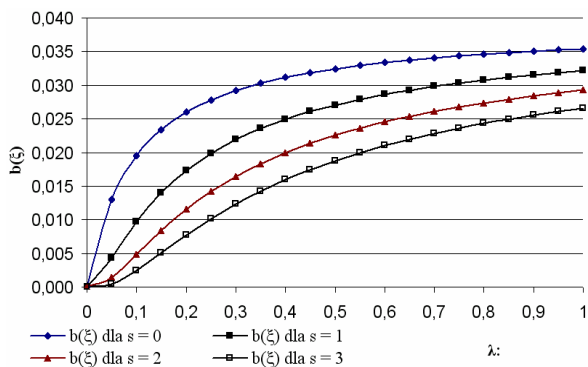


Rys. 6.2.2. Zmienność wartości funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji zadania logistycznego w funkcji zmiany parametru ρ (model z niepomijalnym T_r)

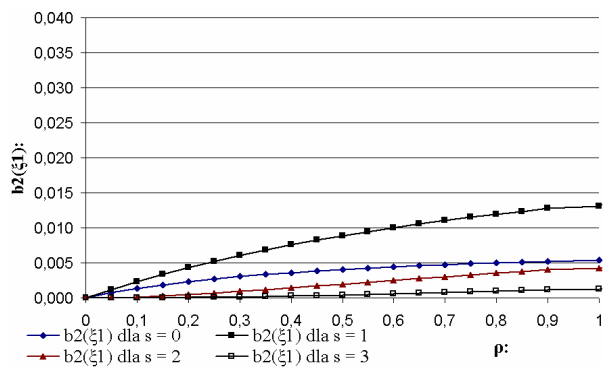
Zgodnie z przedstawionymi wykresami, skracając oczekiwany czas międzyoperacyjny systemu wspieranego, prawdopodobieństwo, że nowa dostawa elementów wymiennych do systemu logistycznego zostanie zrealizowana po $(s+1)$ -ym uszkodzeniu elementu systemu technicznego, jak również prawdopodobieństwo, że system wsparcia logistycznego zrealizuje swoje funkcje w oczekiwanym czasie $E[\tau]$ maleją.

Z kolei, wpływ zmiany parametru intensywności uszkodzeń λ oraz parametru ρ na funkcje gęstości prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu zostały przedstawione na rysunkach 6.2.3 – 6.2.4. Rysunki 6.2.5 – 6.2.6 przedstawiają wpływ zmiany parametru intensywności uszkodzeń λ oraz parametru ρ na funkcje prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu.

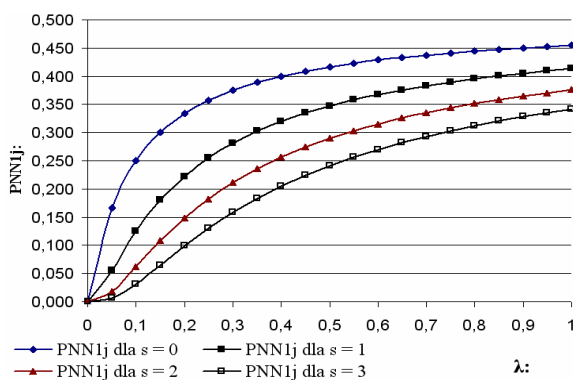
Krótszy oczekiwany czas poprawnej pracy systemu technicznego, charakteryzowany przez wzrost parametru intensywności uszkodzeń λ , bezpośrednio wpływa na zwiększenie wartości, jakie przyjmuje funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu $b(\xi)$. Większa intensywność uszkodzeń bezpośrednio przekłada się na mniejszą zdolność nadsystemu do tolerowania zakłóceń w obszarze realizacji dostawy części wymiennych, przez co prawdopodobieństwo, że nadsystem przejdzie w stan niezdatności P_{NNij} oraz prawdopodobieństwo, że okres niezdatności nadsystemu będzie zgodny z wartością oczekiwaną $E[\xi]$ wzrastają.



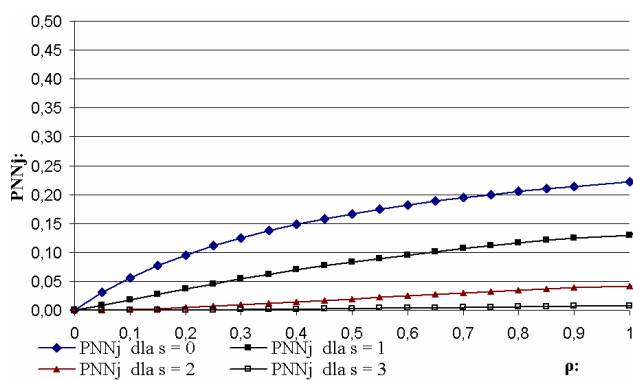
Rys. 6.2.3. Zmienność wartości funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru λ (model z pomijalnym T_r)



Rys. 6.2.4. Zmienność wartości funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru ρ (model z niepomijalnym T_r)



Rys. 6.2.5. Zmienność wartości funkcji prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru λ (model z pomijalnym T_r)



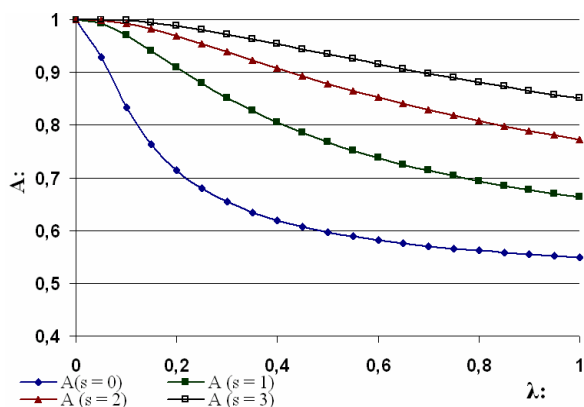
Rys. 6.2.6. Zmienność wartości funkcji prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru ρ (model z niepomijalnym T_r)

W przypadku analizy wpływu zmiany parametru ρ na poziom funkcji gęstości $b_2(\xi_1)$ warto zauważyć, przy przyjętych założeniach analizy wrażliwości, że uwzględnienie utrzymywania jednego elementu zapasowego w systemie wsparcia logistycznego zwiększa prawdopodobieństwo, że czas niezdatności nadsystemu będzie zgodny z wartością oczekiwaną $E[\xi_1]$ (w stosunku do modelu z liczbą zapasów $s=0$). Związane jest to z faktem, że uwzględnienie dodatkowego elementu zapasowego powoduje, że nadsystem może przejść w stan niezdatności spowodowany przekroczeniem dostępnej rezerwy czasowej zarówno przez zbyt długi czas realizacji zadania logistycznego, jak i okres odnowy systemu technicznego. Jednakże uwzględnienie kolejnych elementów zapasowych w nadsystemie obniża zakres zmienności funkcji $b_2(\xi_1)$, zwiększając czas tolerancji zakłóceń w procesie dostawy elementów wymiennych do systemu wsparcia logistycznego.

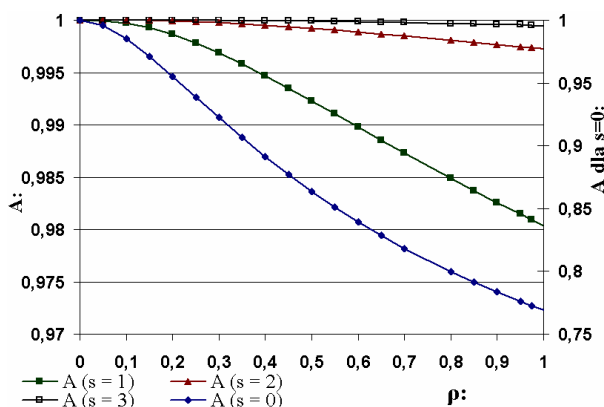
Jednocześnie wpływ zmiany parametru ρ na funkcję prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu P_{NNj} przedstawia się analogicznie do przedstawionego dla modelu z pomijalnym

czasem wymiany elementu pracującego. Zakres zmienności jest mniejszy, co tłumaczyć można wydłużeniem się cyklu zaopatrzenia, które bezpośrednio przekłada się na obniżenie prawdopodobieństwa pojawienia się niezdatności spowodowanej brakiem elementów wymiennych w nadsystemie.

Na rysunkach 6.2.7-6.2.8 przedstawiono wpływ oczekiwanego czasu poprawnej pracy systemu technicznego, definiowanego zmiennością parametru λ , oraz wpływ parametru ρ na poziom wskaźnika gotowości A .



Rys. 6.2.7. Zmienność wartości funkcji wskaźnika gotowości nadsystemu w funkcji zmiany parametru λ (model z pomijalnym Tr)



Rys. 6.2.8. Zmienność wartości funkcji wskaźnika gotowości nadsystemu w funkcji zmiany parametru ρ (model z niepomijalnym Tr)

Zgodnie z przedstawionymi wykresami, im krótsze czasy międzyoperacyjne, tym mniejsze prawdopodobieństwo, że nowa dostawa zostanie zrealizowana przed uszkodzeniem się ostatniego dostępnego elementu wymiennego. W rezultacie oczekiwany czas niezdatności nadsystemu wzrasta, wpływając negatywnie na poziom wskaźnika gotowości. Wzrost poziomu zapasów s zmniejsza omawiane ryzyko, w rezultacie poziom wskaźnika gotowości A wzrasta.

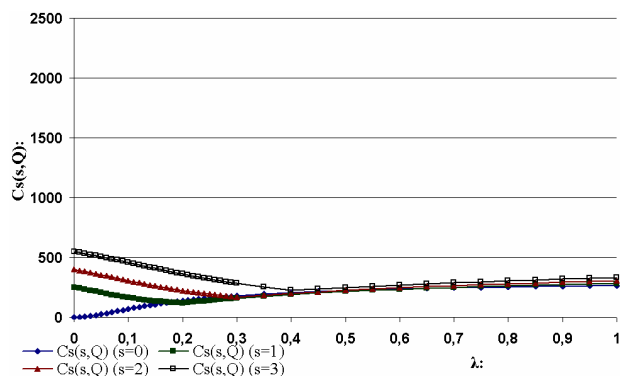
Jednocześnie, istotna jest ocena wpływu zmiany parametru intensywności uszkodzeń elementu pracującego (rys. 6.2.9) oraz parametru ρ (rys. 6.2.10) na wyniki ekonomiczne modelu.

W sytuacji, w której nie są utrzymywane elementy wymienne w magazynie systemu wsparcia logistycznego ($s=0, Q=1$), oczekiwane koszty funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$ wzrastają wraz ze skróceniem oczekiwanych czasów międzyoperacyjnych systemu technicznego (rys. 6.2.9). Prawdopodobieństwo uszkodzenia nadsystemu wzrasta, co ma bezpośredni wpływ na wyższe koszty jego niezdatności C_{dw} .

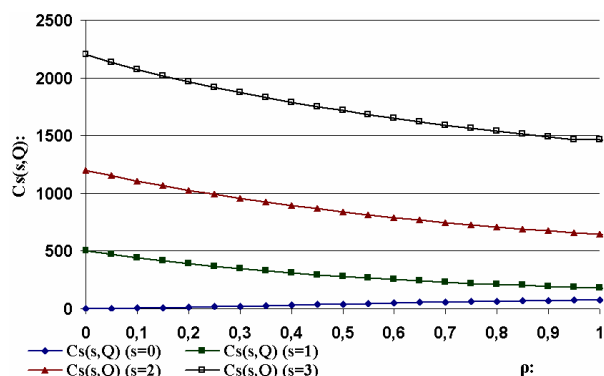
Dla przyjętych założeń modelu oraz zakresu zmienności parametrów wejściowych, w modelu nadsystemu z pomijalnym czasem wymiany uszkodzonego elementu, w którym są

utrzymywane zapasy w systemie wsparcia logistycznego ($s \neq 0, Q > 1$), przebieg analizowanej funkcji w pierwszej fazie maleje do osiągnięcia punktu przegięcia ($\lambda \approx 0,2$ ($s=1$), $\lambda \approx 0,3$ ($s=2$), $\lambda \approx 0,4$ ($s=3$)), po czym funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu rośnie wraz ze skróceniem oczekiwanego czasu międzyoperacyjnego systemu technicznego. Związane jest to z faktem, że skrócenie oczekiwanego czasu pracy systemu wspieranego, pomimo obniżenia oczekiwanych kosztów utrzymania zapasów, wpływa negatywnie na oczekiwane koszty niezdatności nadsystemu. Z chwilą osiągnięcia punktu przegięcia koszty niezdatności są na tyle wysokie, że przewyższają oszczędności uzyskane w wyniku krótszego składowania elementów wymiennych.

Analizując zmienność funkcji oczekiwanych kosztów $C_s(s, Q)$, w modelu nadsystemu z niepomiąlnym T_r systemu technicznego, w zależności od długości oczekiwanego czasu poprawnej pracy systemu technicznego (rys. 6.2.10), przede wszystkim należy zwrócić uwagę na znaczną różnicę zakresu zmienności badanych kosztów w porównaniu do wyników, uzyskanych dla modelu z pomijalnym czasem T_r . Uwzględnienie czasu wymian elementów uszkodzonych systemu technicznego w modelu powoduje ponad czterokrotny wzrost maksymalnych kosztów funkcjonowania nadsystemu (dla $s=3$) w badanym zakresie analizy. Tak duża zmienność kosztów wiąże się z dłuższym okresem utrzymywania zapasów w systemie wsparcia logistycznego, a w konsekwencji wysokimi oczekiwanymi kosztami składowania zapasów C_h w cyklu zaopatrzenia nadsystemu.



Rys. 6.2.9. Zmienność funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru λ (model z pomijalnym T_r)



Rys. 6.2.10. Zmienność funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru ρ (model z niepomiąlnym T_r)

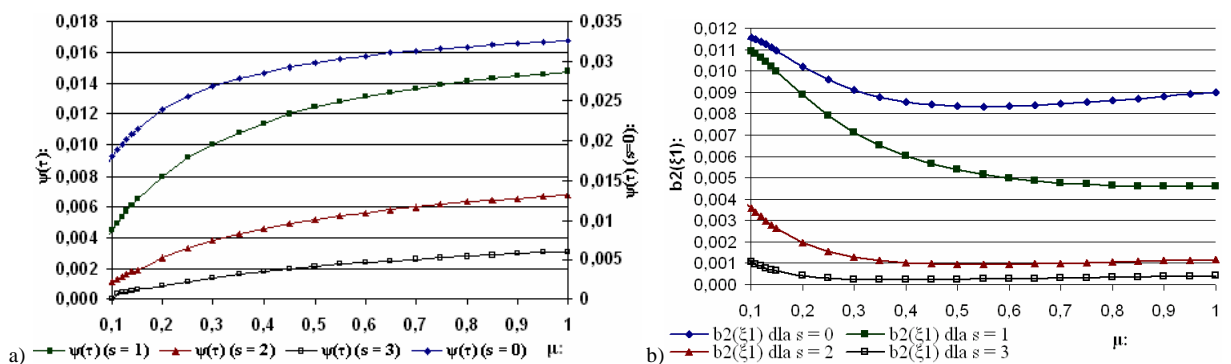
6.3. Intensywność wymian elementu pracującego

Na szczególną uwagę zasługuje analiza wpływu zmienności oczekiwanego czasu odnowy systemu technicznego, charakteryzowanego przez parametr μ , na zmianę parametrów wyjściowych modelowanego nadsystemu.

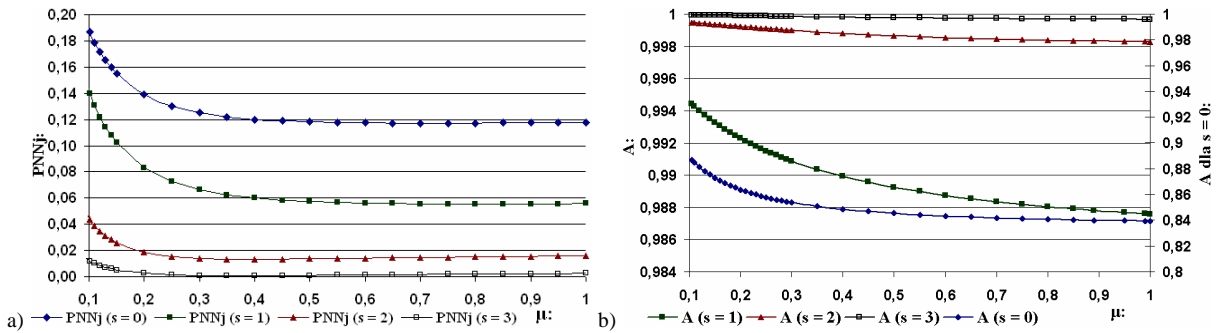
Na wykresie 6.3.1a przedstawiono interpretację formalną wpływu zmiany parametru intensywności wymian μ na zachowanie się systemu wsparcia logistycznego, definiowane zmiennością funkcji gęstości $\psi(\tau)$. Przy ustalonych założeniach badanego modelu, skrócenie oczekiwanego czasu wymiany elementu uszkodzonego systemu technicznego (wzrost μ) w rezultacie przekłada się na skrócenie cyklu operacyjnego analizowanego systemu. W konsekwencji prawdopodobieństwa, że dostawa nowych elementów wymiennych do systemu wspierającego nastąpi później niż uszkodzenie się $(s+1)$ -go elementu oraz oczekiwany czas realizacji zadania logistycznego będzie zgodny z wartością oczekiwaną $E[L]$ wzrastają.

Z kolei, zgodnie z wykresem (rys. 6.3.1b), skracając oczekiwany czas wymiany elementu uszkodzonego systemu wspieranego, prawdopodobieństwo, że czas niezdatności nadsystemu będzie zgodny z obliczoną wartością oczekiwaną $E[\xi_1]$ zmniejsza się. Ponadto, krótszy oczekiwany czas odnowy T_r obniża prawdopodobieństwo, że czas przywrócenia zdadności systemowi technicznemu przekroczy dostępną rezerwę czasową T_r , co w rezultacie przekłada się na niższe prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności nadsystemu (rys. 6.3.2a). Zwiększenie poziomu zamawiania s dodatkowo obniża poziom omawianego prawdopodobieństwa P_{NNj} .

Na szczególne zainteresowanie zasługuje ocena wpływu poziomu intensywności wymian systemu technicznego na poziom wskaźnika gotowości nadsystemu (rys. 6.3.2b). Zgodnie z przedstawionym wykresem, dla przyjętych założeń modelu oraz wielkości wyjściowych parametrów wejściowych, skrócenie oczekiwanego czasu wymiany elementu obniża poziom gotowości nadsystemu. Związane jest to z faktem, że skrócenie czasu wymian elementów wymiennych wpływa negatywnie na długość cyklu zaopatrzenia, oraz zwiększa prawdopodobieństwo, że dostawa elementów zapasowych nastąpi po $(s+1)$ -ym uszkodzeniu systemu technicznego. W rezultacie, wydłuży się okres niezdatności nadsystemu z powodu braku elementów wymiennych.



Rys. 6.3.1. Zmienność funkcji: a) gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji zapotrzebowania systemu technicznego, b) gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu, w funkcji zmiany parametru μ



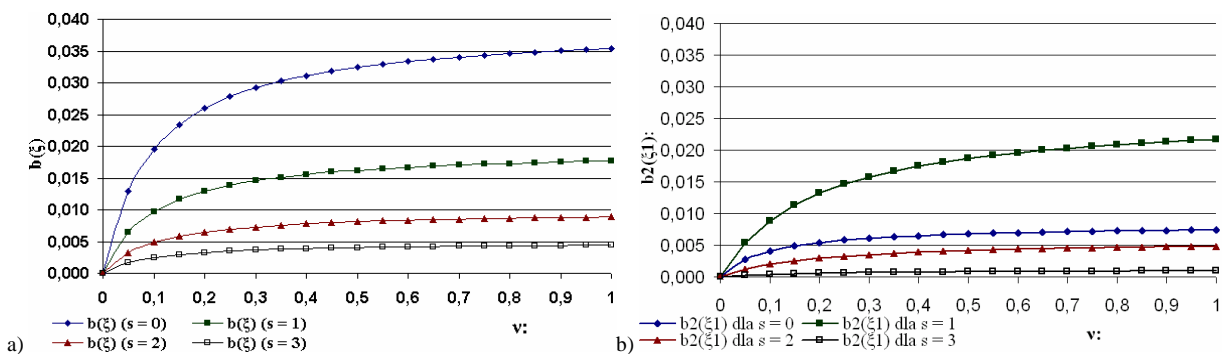
Rys. 6.3.2. Zmienność wartości: a) prawdopodobieństwa niezdatności P_{NNj} , b) wskaźnika gotowości nadsystemu, w funkcji zmiany parametru μ

Dodatkowo przeprowadzaną analizę należy uzupełnić o ocenę zależności pomiędzy wartością funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$ a zmianą parametru intensywności wymian μ . Dla przyjętych założeń modelu istnieje niewielka zależność pomiędzy oczekiwanym czasem naprawy $E[T_r]$ a poziomem oczekiwanych kosztów $C_s(s, Q)$. Jednocześnie zmiana parametrów modelu (np. intensywności dostaw β czy jednostkowych kosztów k_f oraz c_{dw}) również nie pozwala na uzyskanie wyraźnego charakteru zmienności badanych oczekiwanych kosztów $C_s(s, Q)$ w funkcji zmiany oczekiwanego czasu odnowy $E[T_r]$.

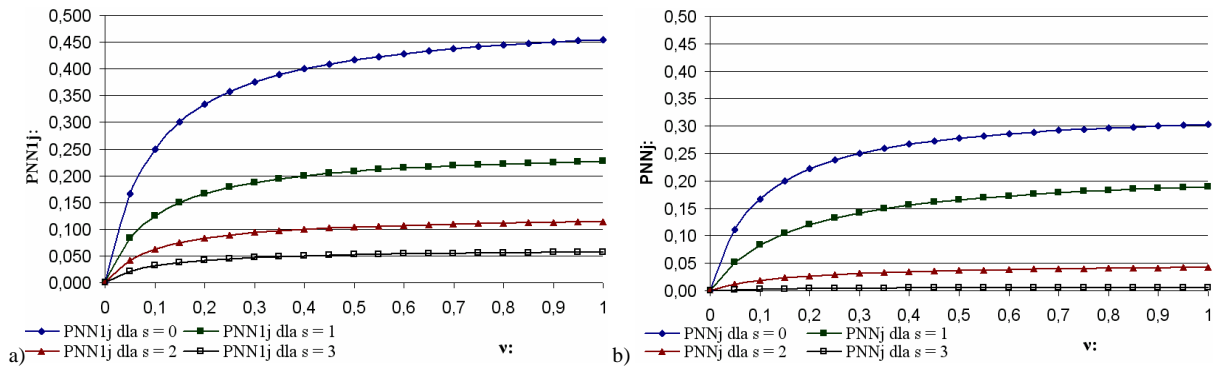
6.4. Intensywność długości rezerwy czasowej nadsystemu

Kolejnym parametrem nadsystemu, którego wpływ na uzyskane podstawowe charakterystyki niezawodnościowe i ekonomiczne należy ocenić, jest oczekiwana długość rezerwy czasowej $E[T_r]$, charakteryzowana zmianą parametru intensywności ν .

Wpływ zmiany poziomu intensywności rezerwy czasowej na podstawowe funkcje nadsystemu przedstawiono na rysunkach 6.4.1 – 6.4.3.



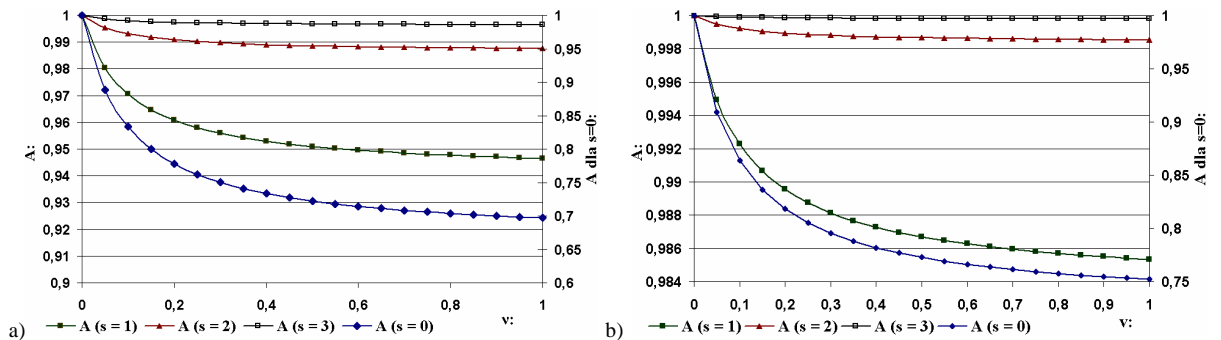
Rys. 6.4.1. Zmienność wartości funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru ν a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomijalnym T_r



Rys. 6.4.2. Zmienność wartości funkcji prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru ν a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomijalnym T_r

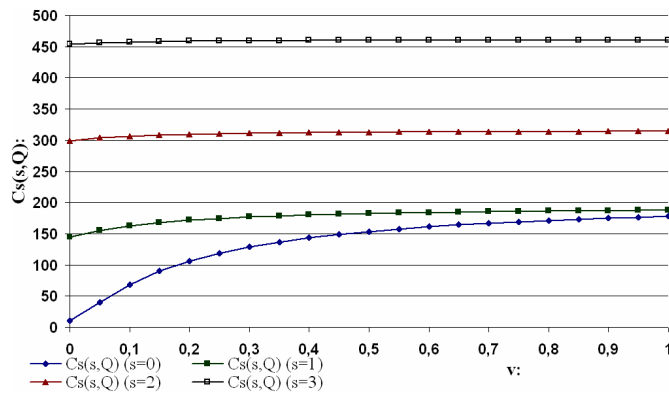
Dla obu analizowanych modeli nadsystemu, przy przyjętych założeniach modelu (rozdziały 4, 5), jeżeli okres dostępnej rezerwy czasowej zdąży do nieskończoności ($\nu=0$) nadsystem nie przejdzie w stan niezdatności ($b(\zeta)=b(\zeta_1)=0$, $P_{NNIj}=P_{NNj}=0$, $A=1$). Skracając oczekiwany czas rezerwy czasowej T_r , prawdopodobieństwo uszkodzenia się nadsystemu rośnie, wpływając na długość okresu niezdatności nadsystemu.

Skrócenie oczekiwanej długości rezerwy czasowej (wzrost parametru ν) bezpośrednio wpływa na obniżenie tolerancji nadsystemu na pojawiające się zakłócenia w obszarze realizacji dostaw części wymiennych, co z kolei przekłada się na wzrost prawdopodobieństwa uszkodzenia nadsystemu oraz zwiększenie ryzyka, że okres niezdatności nadsystemu będzie zgodny z ustaloną wartością oczekiwaną czasu niezdatności nadsystemu.



Rys. 6.4.3. Zmienność wartości funkcji wskaźnika gotowości nadsystemu w funkcji zmiany parametru ν a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomijalnym T_r

Ostatni przykład dotyczy wpływu poziomu oczekiwanego czasu dostępnej rezerwy czasowej na poziom oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$ (rys. 6.4.4).



Rys. 6.4.4. Zmienność funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru ν (model nadsystemu z pomijalnym T_r systemu technicznego)

Zgodnie z przedstawionym przebiegiem zmienności omawianej funkcji, w przypadku, gdy w nadsystemie są utrzymywane zapasy elementów wymiennych ($s \neq 0$) funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu jest wrażliwa w bardzo niewielkim stopniu na zmianę poziomu oczekiwanego okresu rezerwy czasowej, co jest bezpośrednio uzależnione od przyjętych założeń analizy wrażliwości modelu. Jedynie w przypadku, gdy elementy wymienne zamawiane są w chwili uszkodzenia się systemu technicznego ($s=0, Q=1$), można zaobserwować, iż skrócenie oczekiwanej rezerwy czasowej zwiększa w sposób zauważalny poziom oczekiwanych kosztów niezdatności nadsystemu C_{dw} , obniżając tolerancję na zakłócenia w realizacji procesów nadsystemu.

Ponadto, przykładowo, dla badanego zakresu analizy zmienności parametrów wejściowych, obniżenie kosztu jednorazowej kary finansowej k_f oraz jednostkowego kosztu niezdatności nadsystemu c_{dw} do poziomu 10 jednostek powoduje, że nie zostanie odnotowany jakikolwiek wpływ zmiany parametru intensywności ν na omawianą funkcję oczekiwanych kosztów $C_s(s,Q)$. Natomiast znaczne zwiększenie poziomu danych kosztów jednostkowych (np. do poziomu 10 000 jednostek) powoduje, że zwiększenie liczby utrzymywanych zapasów w systemie wsparcia logistycznego znacznie obniża wartości funkcji oczekiwanych kosztów niezdatności nadsystemu C_{dw} .

W przypadku modelu z niepomiernym czasem wymian T_r , przy przyjętych założeniach oraz poziomie parametrów wejściowych modelu, zmiana oczekiwanego okresu rezerwy czasowej praktycznie nie wpływa na kształt omawianej funkcji kosztów $C_s(s,Q)$. Dopiero zwiększenie poziomu jednostkowych kosztów k_f oraz c_{dw} do poziomu 150 000 jednostek pozwala na zaobserwowanie zależności pomiędzy skróceniem oczekiwanego okresu rezerwy czasowej a wysokim wzrostem oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s,Q)$ dla przypadków, gdy nie są utrzymywane elementy zapasowe w systemie ($s=0, Q=1$), oraz gdy poziom zamawiania s równy jest jednemu elementowi zapasowemu. Wiąże się to z

dużym prawdopodobieństwem pojawienia się niezdatności nadsystemu w analizowanych przypadkach, gdzie oczekiwany czas niezdatności systemu technicznego jest najdłuższy.

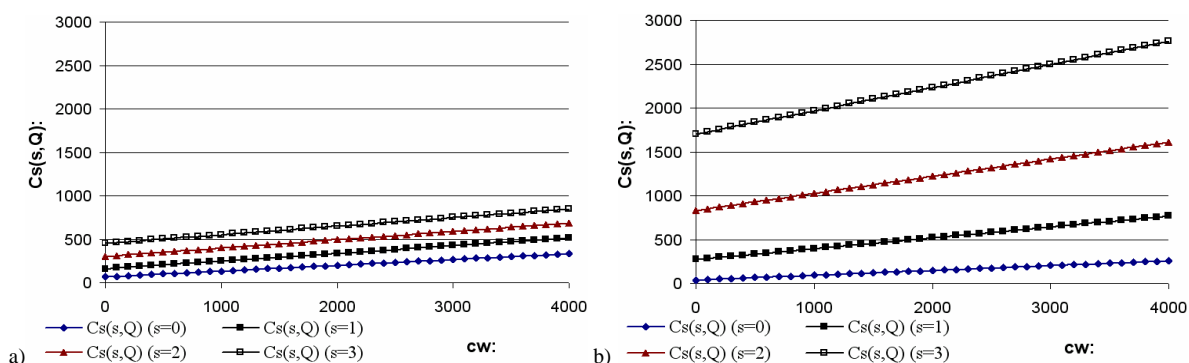
6.5. Koszty jednostkowe eksploatacji nadsystemu

Ostatnim czynnikiem, którego wpływ na uzyskane analityczne wyniki niezawodnościowe i ekonomiczne nadsystemu z rezerwą czasową poddano badaniu, są koszty jednostkowe, które nadsystem ponosi w procesie eksploatacji ($c_w, c_o, c_p, c_h, k_f, c_{dw}$). Zmiana któregośkolwiek z nich powoduje liniową zmianę funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$.

a) jednostkowy koszt wymiany elementu pracującego

Przy zdefiniowanych parametrach wejściowych modelu nadsystemu zmiana jednostkowego kosztu wymiany elementu pracującego ma niewielki wpływ na poziom oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$ (rys. 6.5.1).

Przy uwzględnieniu przyjętych założeń analizy wrażliwości modelu, przyrost kosztu c_w o jednostkę, powoduje niewielki liniowy przyrost oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$ (maksymalnie o około 0,25 jednostek dla przypadku: $s = 3$, model nadsystemu z niepomijalnym T_r).



Rys. 6.5.1. Zmienność wartości funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany jednostkowego kosztu wymiany c_w a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomijalnym T_r

b) jednostkowy koszt obsługi zamówienia

Podobny charakter zmian można zaobserwować w procesie analizy wpływu zmiany jednostkowego kosztu obsługi zamówienia na oczekiwane koszty funkcjonowania nadsystemu. Koszt ten nie odgrywa znaczącej roli w porównaniu z kosztami związanymi z utrzymaniem i niezdatnością nadsystemu.

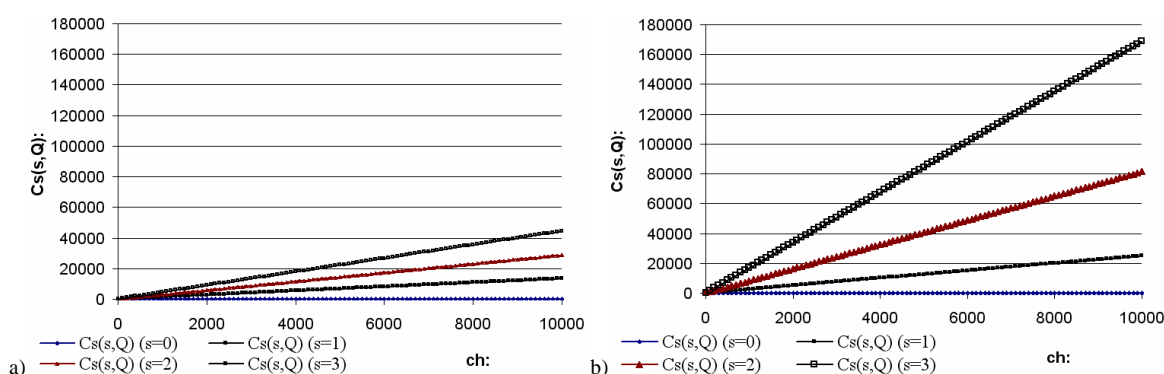
c) jednostkowy koszt zakupu

Wpływ zmiany jednostkowego kosztu zakupu c_p na funkcję oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$, przy przyjętych założeniach modelu, jest analogiczny do przedstawionego w punkcie 6.4a.

d) jednostkowy koszt utrzymania elementu wymiennego w jednostce czasu

Jednostkowy koszt utrzymania elementu wymiennego w jednostce czasu c_h ma bardzo duże znaczenie dla wyników ekonomicznych nadsystemu dla obu analizowanych przypadków (rys. 6.5.2). W badanym zakresie analizy zmienności parametrów wejściowych modelu, przyrost kosztu c_h o jednostkę, powoduje znaczny liniowy przyrost oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$ o około:

- od 1,4 jednostek ($s=1$), do 4,5 jednostek ($s=3$) dla modelu nadsystemu z pomijalnym czasem T_r systemu technicznego,
- od 2,5 jednostek ($s=1$), do 16,9 jednostek ($s=3$) dla modelu nadsystemu z niepomijalnym czasem T_r systemu technicznego.



Rys. 6.5.2. Zmienność wartości funkcji oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany jednostkowego kosztu utrzymania elementu wymiennego w jednostce czasu c_h a) model z pomijalnym T_r , b) model z niepomijalnym T_r

e) jednostkowy koszt kary w wyniku pojawienia się niezdatności nadsystemu

Zgodnie z założeniami modelu, nadsystem ponosi jednorazowy koszt kary k_f w wyniku pojawienia się każdorazowej jego niezdatności.

Koszt ponoszonych kar w nadsystemie, podobnie jak koszty niezdatności nadsystemu, przede wszystkim zależy od prawdopodobieństwa pojawienia się niezdatności nadsystemu (P_{NN1j} , P_{NNj}). Oczekiwane koszty funkcjonowania nadsystemu są stosunkowo mało wrażliwe na zmianę jednorazowego kosztu kary k_f . Przy przyjętych założeniach analizy wrażliwości modelu, przyrost kosztu k_f o jednostkę, powoduje nieznaczny liniowy przyrost oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$ (maksymalnie o około 0,16 jednostek dla przypadku: $s = 0$, model nadsystemu z pomijalnym T_r).

f) jednostkowy koszt niezdatności nadsystemu

Koszty niezdatności nadsystemu zależą m.in. od czasu trwania okresu niezdatności nadsystemu w pojedynczym cyklu zaopatrzenia.

Wpływ jednostkowego kosztu niezdatności nadsystemu c_{dw} na oczekiwane koszty funkcjonowania nadsystemu ma charakter liniowy. Jednakże, dla przyjętych założeń analizy wrażliwości modelu, obserwuje się znacznie mniejszy wpływ badanego kosztu na wyniki ekonomiczne nadsystemu niż w przypadku kosztu utrzymania zapasu, czy kosztu jednorazowej kary, ponoszonej w wyniku pojawienia się niezdatności nadsystemu. Zmiana kosztu niezdatności c_{dw} o jednostkę powoduje bardzo niewielki liniowy przyrost oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu $C_s(s, Q)$ (maksymalnie o około 0,04 jednostek dla przypadku: $s = 0$, model nadsystemu z pomijalnym T_r).

7. SYMULACYJNY MODEL SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ

Rozwiązanie analizowanego problemu zapewnienia dostępności części wymiennych przez system wsparcia logistycznego w procesie eksploatacji systemu technicznego metodą analityczną można uzyskać praktycznie tylko w przypadku, gdy charakterystyki systemów oraz ich elementów opisano rozkładami wykładniczymi, co znacznie obniża przydatność uzyskanych wyników. Związane jest to przede wszystkim z koniecznością wyznaczenia analitycznych postaci n -krotnych splotów funkcji matematycznych opracowanego modelu, przedstawionych w rozdziale 5.

W związku z tym, w celu przeprowadzenia analiz wpływu:

- zawodności procesu zaopatrzenia na wyniki eksploatacji systemu technicznego,
- poziomu rezerwy czasowej na niezawodność nadsystemu,
- struktury niezawodnościowej oraz charakterystyk niezawodnościowych systemu technicznego na poziom funkcjonowania nadsystemu,

wykorzystano narzędzie, jakim jest komputerowa symulacja *Monte Carlo*.

7.1. Zmienne modelu symulacyjnego

Proces funkcjonowania nadsystemu z rezerwą czasową zamodelowano przy wykorzystaniu oprogramowania *GNU Octave* (<http://www.octave.org>). Wybrany program służy m.in. do przeprowadzania eksperymentów numerycznych.

W modelu symulacyjnym badania przeprowadzono przy uwzględnieniu określonego zestawu parametrów wejściowych, opisujących podstawowe charakterystyki analizowanego nadsystemu, których zestawienie zostało przedstawione w tabeli 7.1.1. Zakres zmienności badanych parametrów wejściowych nadsystemu został zdefiniowany na podstawie uzyskanych wyników analizy wrażliwości modelu analitycznego (rozdział 6) oraz w oparciu o wstępną analizę zmienności poszczególnych parametrów wejściowych modelu na wyniki niezawodnościowe i ekonomiczne nadsystemu.

Jednocześnie przyjęto, że zmienne losowe, charakteryzujące czasy poprawnej pracy elementów systemu technicznego, czasy jego odnów, czasy realizacji dostaw oraz czasy rezerwy czasowej opisane zostały rozkładem Weibull'a [73]:

$$F(t) = 1 - \exp(-B_u t^{A_u}) \quad \text{dla } t > 0 \quad (7.1.1)$$

gdzie:

A_u – parametr kształtu rozkładu Weibull'a opisującego zmienną u

B_u – parametr skali rozkładu Weibull'a opisującego zmienną u

Tabela 7.1.1. Parametry wejściowe modelu symulacyjnego

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Wielkość wejściowa</i>	<i>Zakres zmienności (min:skok:max)</i>	<i>Objaśnienie</i>
1	A_o	1	0,5:1:19,5	parametr kształtu rozkładu opisującego czas pracy elementu systemu technicznego
2	$1/B_o$	100	50:50:1000	parametr skali rozkładu opisującego czas pracy elementu systemu technicznego
3	A_r	1	0,5:1:19,5	parametr kształtu rozkładu opisującego czas wymiany elementu systemu technicznego
4	$1/B_r$	10	5:5:100	parametr skali rozkładu opisującego czas wymiany elementu systemu technicznego
5	A_L	1	0,5:1:19,5	parametr kształtu rozkładu opisującego czas realizacji dostawy elementów wymiennych
6	$1/B_L$	1000	50:50:1000	parametr skali rozkładu opisującego czas realizacji dostawy elementów wymiennych
7	A_γ	1	0,5:1:19,5	parametr kształtu rozkładu opisującego czas rezerwy czasowej T_γ
8	$1/B_\gamma$	10	0:5:100	parametr skali rozkładu opisującego czas rezerwy czasowej T_γ
9	k	1	1:1: M	liczba zdalnych elementów, warunkująca stan zdadności systemu technicznego o niezawodnościowej strukturze progowej
10	M	5	1:1:30	liczba elementów pracujących w systemie technicznym
11	s	5	0:1: $Q-1$	poziom zamawiania
12	I_o	5	0:1: Q	wielkość zapasu początkowego w chwili rozpoczęcia symulacji
13	Q	30	1:1:30	wielkość partii zamówienia
14	c_w	50	0:50:1500	jednostkowy koszt wymiany uszkodzonego elementu technicznego
15	c_o	50	0:50:1500	jednostkowy koszt obsługi zamówienia
16	c_p	50	0:50:1500	jednostkowy koszt zakupu elementu wymiennego
17	c_h	100	0:50:2000	jednostkowy koszt utrzymania elementu wymiennego w jednostce czasu
18	c_{dw}	1000	0:200:10000	jednostkowy koszt niezdatności nadsystemu w jednostce czasu, zależny od czasu jego niezdatności
19	k_f	1000	0:1000:100000	stały koszt kary finansowej, związany z każdorazową niezdatnością nadsystemu

Realizacja eksperymentu symulacyjnego oparta została na założeniu, że czas eksploatacji systemu technicznego determinowany jest przez parametr wejściowy, określający liczbę pojedynczych uszkodzeń jego elementów (por. [118]). W celu uniezależnienia wyników od pojedynczej realizacji procesu eksploatacji systemu technicznego badania symulacyjne powtarzano 30-krotnie przy tych samych wartościach parametrów wejściowych. Wyniki z pojedynczych realizacji symulacji były gromadzone aż do chwili zakończenia wszystkich 30 eksperymentów, a następnie uśredniane.

Podstawowe parametry wyjściowe opracowanego modelu symulacyjnego przedstawiono w tabeli 7.1.2.

Tabela 7.1.2. Parametry wyjściowe modelu symulacyjnego gromadzone podczas badań

Lp.	Oznaczenie	Sposób wyznaczenia wyniku	Objaśnienie
Parametry wyjściowe niezawodnościowe			
1	TE	$\sum T_{cj}$	całkowity czas eksploatacji nadsystemu
2	A	$1 - \frac{\sum \xi}{TE}$	współczynnik gotowości (model nadsystemu z pomijalnym czasem T_r)
3		$1 - \frac{\sum \xi_1}{TE}$	współczynnik gotowości (model nadsystemu z niepomijalnym czasem odnowy T_r)
4	$\bar{\tau}$	$\frac{\sum \tau}{l_d}$	średni czas realizacji zadania logistycznego polegającego na dostarczeniu części wymiennych do systemu technicznego
5	P_{NNj}	$\frac{\sum (\tau \geq T_\gamma)}{l_d}$	prawdopodobieństwo przejścia nadsystemu w stan niezdatności w pojedynczym cyklu zaopatrzenia (model nadsystemu z pomijalnym czasem T_r)
6		$\frac{[\sum (\tau + T_r \geq T_\gamma) + \sum (T_r \geq T_\gamma)]}{(Ql_d)}$	prawdopodobieństwo przejścia nadsystemu w stan niezdatności w pojedynczym cyklu zaopatrzenia (model nadsystemu z niepomijalnym czasem T_r)
7	$\bar{\xi}$	$\frac{\sum \xi}{\sum (\tau \geq T_\gamma)}$	średni czas niezdatności nadsystemu (model nadsystemu z pomijalnym czasem T_r)
8	$\bar{\xi}_1$	$\frac{\sum \xi_1}{[\sum (\tau + T_r \geq T_\gamma) + \sum (T_r \geq T_\gamma)]}$	średni czas niezdatności nadsystemu (model nadsystemu z niepomijalnym czasem T_r)
Parametry wyjściowe ekonomiczne			
9	C_w	$c_w \cdot Q \cdot l_d$	łącznie koszty wymiany elementów systemu technicznego w okresie eksploatacji nadsystemu

Lp.	Oznaczenie	Sposób wyznaczenia wyniku	Objaśnienie
10	C_o	$c_o \cdot l_d$	koszty obsługi wszystkich zamówień w okresie eksploatacji nadsystemu
11	C_p	$c_p \cdot Q \cdot l_d$	łączny koszt zakupu elementów wymiennych w okresie eksploatacji nadsystemu
12	C_h	$c_h \cdot \sum_0^{TE} I(\Delta t) \cdot \Delta t$	łączny koszt utrzymania zapasowych elementów wymiennych w okresie eksploatacji nadsystemu
13	C_{dw}	$k_f \cdot \left(\sum (\tau \geq T_\gamma) \right) + c_{dw} \cdot \left[\sum (\xi_1 \cdot (\tau \geq T_\gamma)) \right]$	łączny koszt niezdatności nadsystemu w okresie jego eksploatacji (model nadsystemu z pomijalnym czasem T_r)
14		$k_f \cdot \left[\sum (\tau + T_r \geq T_\gamma) + \sum (T_r \geq T_\gamma) \right] + c_{dw} \cdot \left[\sum (\xi_1 \cdot ((\tau + T_r \geq T_\gamma) + (T_r \geq T_\gamma))) \right]$	łączny koszt niezdatności nadsystemu w okresie jego eksploatacji (model nadsystemu z niepomijalnym T_r)
15	C_s	$(C_w + C_{zam} + C_p + C_h + C_{dw}) / TE$	koszty ponoszone przez nadsystem w jednostce czasu eksploatacji

Objaśnienia:

l_d – liczba dostaw w okresie eksploatacji nadsystemu

$\sum (a \geq b)$ – oznacza sumę przypadków, gdy spełniony jest warunek ($a \geq b$)

7.2. Algorytm procesu symulacji

Techniczna realizacja badań symulacyjnych przeprowadzana jest zgodnie z przyjętą procedurą symulacji upływu czasu – metodą kolejnych zdarzeń, zgodnie z którą inauguracja cykli symulacyjnych następuje jedynie w chwilach czasu, w których występują zdarzenia zaplanowane. Jednocześnie dynamika funkcjonowania nadsystemu odzwierciedlona została krokowo, tj. realizacja kolejnego etapu procesu (np. możliwego zdarzenia uszkodzenia systemu technicznego, chwila pojawienia się braku zapasów) jest uzależniona od zdarzeń, jakie zaszły w kroku poprzednim (np. chwili realizacji dostawy). Wykorzystano metodę wyboru działania.

Zgodnie z powyższym, algorytm realizacji eksperymentu symulacji opracowano w dwóch etapach dla:

- modelu nadsystemu z pomijalnym czasem odnowy systemu technicznego (rys. 7.2.1),
- modelu nadsystemu z niepomijalnym czasem odnowy systemu technicznego (rys. 7.2.2).

Rodzaj struktury niezawodnościowej warunkuje sposób i czas uszkodzeń systemu technicznego oraz jego elementów pracujących. W związku z tym punkt 6 algorytmu

symulacji (rys. 7.2.2) realizowany jest inaczej dla przypadku każdej struktury niezawodnościowej systemu wspieranego.

W oparciu o przyjęte w pracy założenia oraz zbudowany model analityczny nadsystemu opracowane zostały modele symulacyjne dla trzech analizowanych struktur niezawodnościowych:

- a) w nadsystemie z systemem technicznym o strukturze szeregowej (por. rys. 5.3.1.a) system wspierany przechodzi w stan niezdatności z chwilą uszkodzenia się któregośkolwiek z jego elementów pracujących. Wymiana uszkodzonego elementu wymaga każdorazowego pobrania elementu zapasowego, obniżając poziom zapasów o jednostkę. W czasie realizacji odnowy systemu technicznego pozostałe zdadne elementy nie pracują (intensywność uszkodzeń $\lambda(t) = 0$). Kolejne zamówienie elementów wymiennych generowane jest z chwilą osiągnięcia poziomu zamawiania s .

Jeżeli w pojedynczym cyklu zaopatrzenia dostawa nie zostanie zrealizowana do chwili uszkodzenia $(s+1)$ -go elementu pracującego, może wystąpić niezdatność nadsystemu z powodu przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej przez czas niezbędny na przywrócenie zdadności systemu wspieranego. W pozostałych przypadkach uszkodzeń elementów systemu technicznego, nadsystem może przejść w stan niezdatności z powodu przekroczenia rezerwy czasowej przez okres niezbędny na wymianę niezdatnego elementu pracującego;

- b) w nadsystemie z systemem technicznym o strukturze równoległej (por. rys. 5.3.1.b) niezdatność systemu technicznego następuje w wyniku uszkodzenia się jego ostatniego elementu pracującego. W czasie odnowy wymieniane są wszystkie elementy uszkodzone (system techniczny nie pracuje). Jednocześnie przyjęto założenie upraszczające, że posiadane zasoby remontowe systemu są wystarczające do przeprowadzenia jednoczesnej wymiany niezdatnych elementów systemu wspieranego. W związku z tym, przedłużenie czasu odnowy systemu technicznego w cyklu jego zaopatrzenia może wystąpić jedynie w sytuacji, gdy nie ma elementów wymiennych w zapasie ($I(t) = 0$). Jeżeli w zapasie znajduje się przynajmniej jeden element wymienny, zostaje on włączony do pracy. Ponadto, jeżeli podczas operacji odnowy systemu technicznego nadejdzie nowa dostawa, elementy dostarczone mogą również być wykorzystane do bieżącej wymiany elementów uszkodzonych (dla $I(t) < M$). Chwilą wyznaczającą wygenerowanie nowego zamówienia jest chwila uszkodzenia się elementu pracującego który, przy natychmiastowej wymianie, obniżyłby poziom zapasów do wielkości „ $M + s$ ”.

Niezdatność nadsystemu w pojedynczym cyku zaopatrzenia może pojawić się w wyniku przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej przez:

- czas wymiany elementów niezdatnych, gdy $I(t) \geq M$;
- czasy realizacji zadania logistycznego oraz wymiany elementów niezdatnych, gdy $I(t) < M$;

c) w nadsystemie z systemem technicznym o strukturze progowej (rys. 5.3.1.c) system wspierany przechodzi w stan niezdatności z chwilą, gdy po uszkodzeniu kolejnego elementu pracującego w systemie tym funkcjonuje mniej niż k elementów. W czasie realizacji operacji odnowy systemu technicznego pozostałe elementy pracujące mogą ulegać uszkodzeniom ($\lambda(t) \neq 0$). Wymiany elementów niezdatnych są realizowane natychmiast po ich uszkodzeniu, jeżeli w systemie wsparcia logistycznego dostępne są elementy wymienne. W przeciwnym wypadku, wymiana elementu uszkodzonego wykonywana jest natychmiast po realizacji nowej dostawy. Jeżeli do chwili nadejścia nowej dostawy uszkodzi się więcej niż jeden element pracujący, a w systemie wsparcia logistycznego nie ma dostępnych elementów zapasowych przyjmuje się, że system logistyczny dysponuje potencjałem obsługowym zdolnym do realizacji odnowy równoległej (jednoczesnej). W związku z tym, kolejne zamówienie generowane jest z chwilą, gdy poziom zapasu osiąga wielkość zamawiania s .

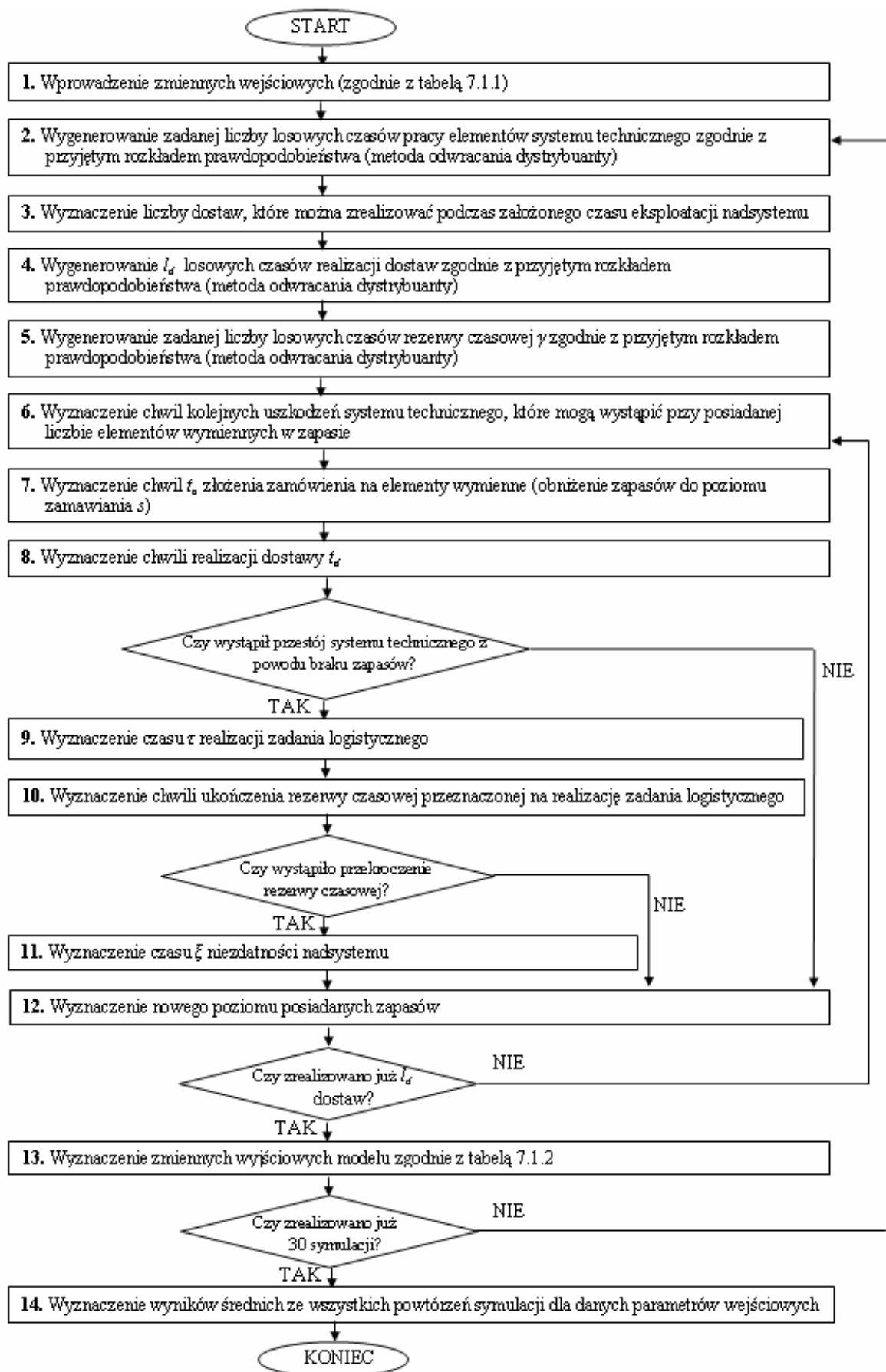
Jednocześnie nadsystem przejdzie w stan niezdatności, gdy:

- czas wymiany elementu niezdatnego przekroczy rezerwę czasową, oraz poziom zapasów $I(t) \geq 1$;
- czasy realizacji zadania logistycznego oraz wymiany elementu niezdatnego przekroczą rezerwę czasową, oraz poziom zapasów $I(t) = 0$.

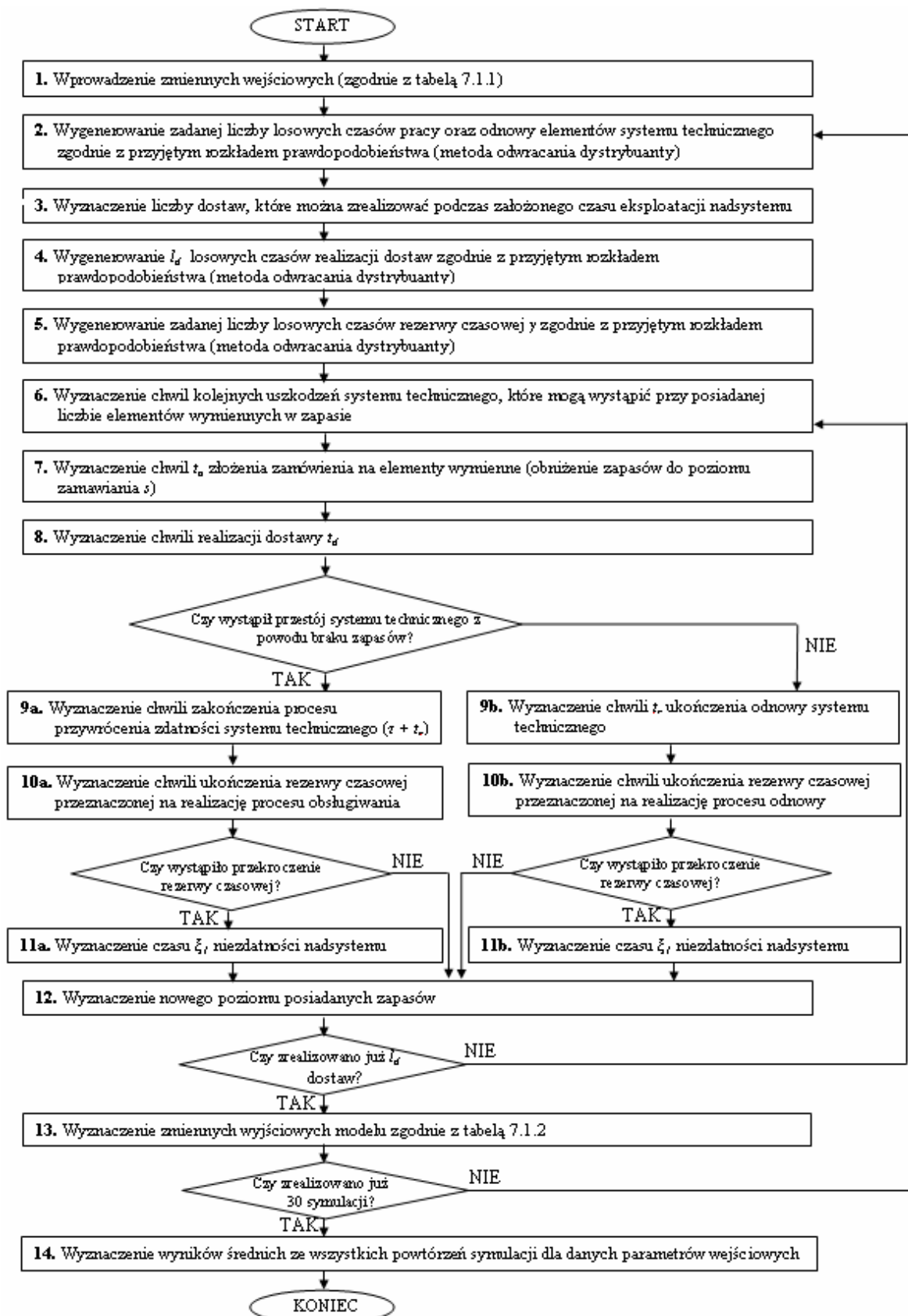
Graniczne przypadki struktury progowej tworzą (przy założeniu $\lambda(t) > 0$):

- struktura szeregową ($k = M$),
- struktura równoległą ($k = 1$).

Budowa modelu symulacyjnego systemu wsparcia logistycznego z zależnością czasową wymagała opracowania 15 podstawowych programów symulacji, które pozwoliły na przeprowadzenie niezbędnych eksperymentów numerycznych. Podstawowy program dla nadsystemu, w którym system techniczny jest wieloelementowy o strukturze niezawodnościowej progowej, został przedstawiony w Załączniku I.



Rys. 7.2.1. Algorytm realizacji komputerowej symulacji procesu funkcjonowania nadsystemu z rezerwą czasową oraz pomijalnym czasem odnowy systemu technicznego



Rys. 7.2.2. Algorytm realizacji komputerowej symulacji procesu funkcjonowania nadsystemu z rezerwą czasową oraz niepomiąlnym czasem odnowy systemu technicznego

8. ANALIZA ZGODNOŚCI MODELU SYMULACYJNEGO Z WYNIKAMI ANALITYCZNYMI

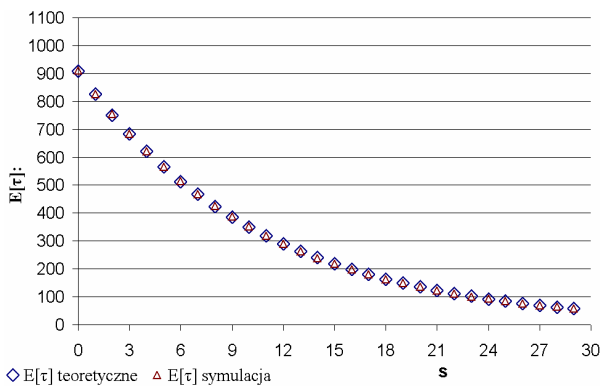
Zbudowany w sposób właściwy model symulacyjny powinien generować wyniki zgodne z wynikami, uzyskanymi w sposób analityczny. Jednocześnie weryfikacja zgodności formalnej badanych modeli może zostać przeprowadzona jedynie dla tych przypadków, dla których możliwe jest wyznaczenie modelu analitycznego oraz uzyskanie wyników teoretycznych.

8.1. Model nadsystemu z jednoelementowym systemem technicznym przy założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów

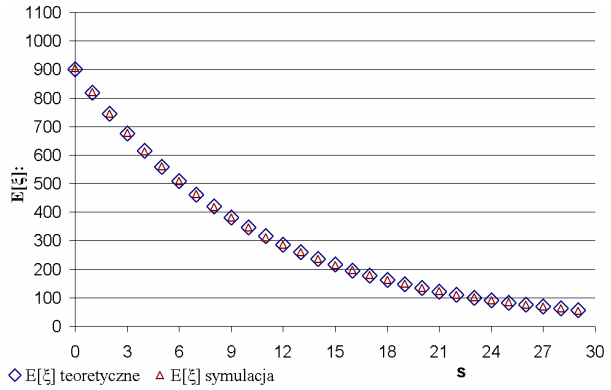
W pierwszym kroku przeprowadzono badanie zgodności wyników uzyskanych analitycznie oraz przy wykorzystaniu procesu symulacji dla prostego przypadku nadsystemu z rezerwą czasową, w którym system techniczny jest jednoelementowy, a czas jego odnowy T_r pomijalny. Model analityczny dla analizowanego przypadku został omówiony w rozdziale 5.1 natomiast analiza wrażliwości, przy założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów w nadsystemie, przedstawiona została w rozdziale 6.

Podstawowe wielkości zmiennych wejściowych oraz postacie formuł dla zmiennych wyjściowych modelu symulacyjnego przedstawione zostały w tabelach 7.1.1. oraz 7.1.2. Z kolei analityczne postacie formuł modelu analitycznego ujęto w tabeli 6.2. Na tej podstawie możliwe było porównanie wyników uzyskanych na drodze symulacji komputerowej oraz obliczonych w sposób analityczny.

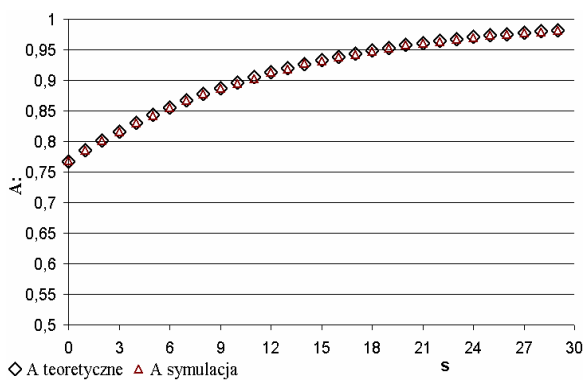
Podstawowe wyniki dla oczekiwanego czasu realizacji zadania logistycznego $E[\tau]$, oczekiwanego czasu niezdatności nadsystemu $E[\xi]$, wskaźnika gotowości A , prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu P_{NNIj} , oraz oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w jednostce czasu C_s zostały przedstawione na rysunkach 8.1.1. ÷ 8.1.5. Poszczególne wyniki badanych modeli porównano dla różnych wielkości poziomu zamawiania s .



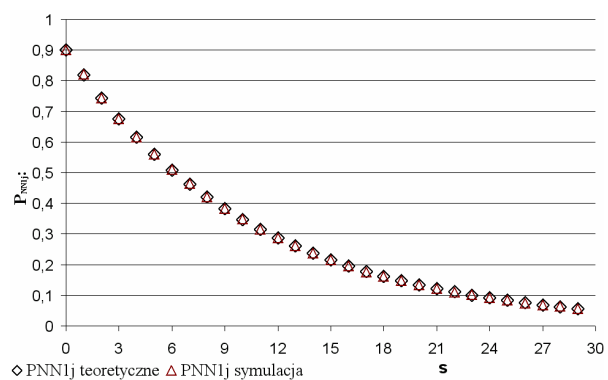
Rys. 8.1.1. Oczekiwany czas realizacji zadania logistycznego w funkcji wielkości zapasu s



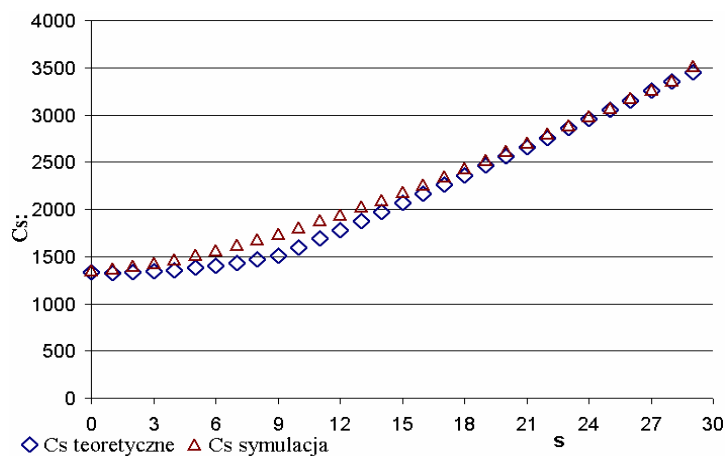
Rys. 8.1.2. Oczekiwany czas niezdatności nadsystemu w funkcji wielkości zapasu s



Rys. 8.1.3. Wskaźnik gotowości w funkcji wielkości zapasu s



Rys. 8.1.4. Prawdopodobieństwo niezdatności nadsystemu w wyniku przekroczenia rezerwy czasowej w funkcji wielkości zapasu s



Rys. 8.1.5. Oczekiwany koszt funkcjonowania nadsystemu w funkcji wielkości zapasu s

Przedstawione wykresy wskazują na dużą zbieżność uzyskiwanych wyników. W celu oceny poziomu zgodności porównywanych modeli wyznaczono wielkości błędów względnych dla poszczególnych wyników (tabela 8.1.1), zgodnie ze wzorem:

$$e_{twzg} = \frac{y_{teor} - y_{emp}}{y_{teor}} \quad (8.1.1)$$

gdzie:

y_{teor} – wielkość zmiennej uzyskana w sposób analityczny

y_{emp} – wielkość zmiennej uzyskana w badaniu symulacyjnym

Ponadto, dla poszczególnych 30 realizacji symulacji, wyznaczono wielkości odchylenia standardowego dla oczekiwanego czasu realizacji zadania logistycznego $E[\tau]$, oraz oczekiwanego czasu niezdatności nadsystemu $E[\zeta]$. Jednocześnie obliczono wielkość współczynnika zmienności V (tabela 8.1.2).

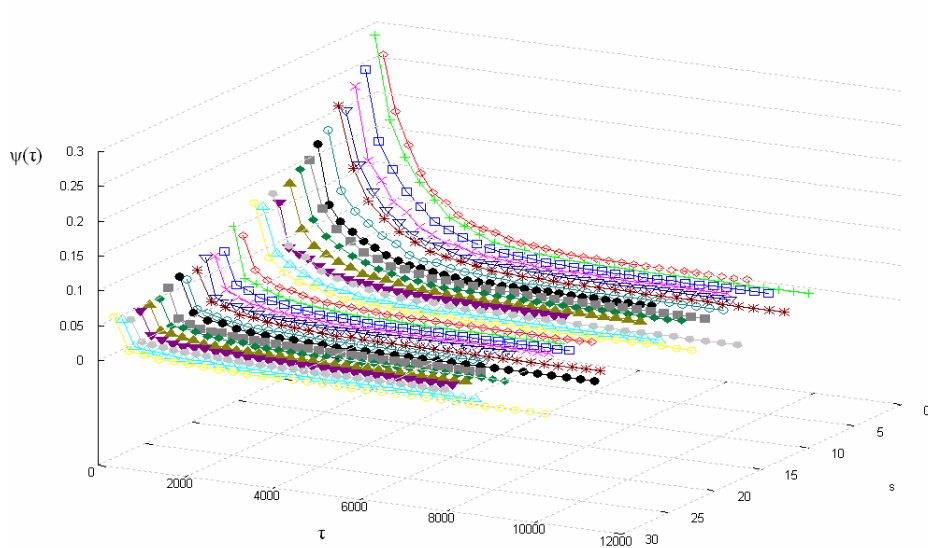
Tabela 8.1.1. Minimalne i maksymalne wartości błędów względnych e_{twzg} wyników uzyskanych w sposób analityczny i symulacyjny

Wynik	$E[\zeta]$	$E[\tau]$	A	P_{NN1j}	C_s
e_{twzg} max	0,0361	-0,0213	0,0024	0,0244	0,0928
e_{twzg} min	-0,0002	0,00002	0,00000005	-0,0001	0,0023

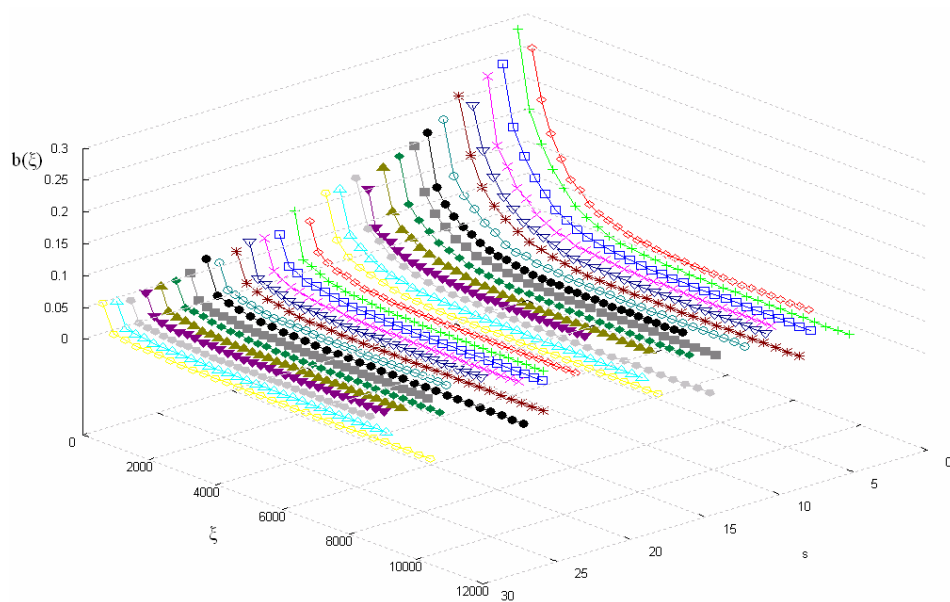
Tabela 8.1.2. Minimalne i maksymalne wartości odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności funkcji $E[\tau]$ oraz $E[\zeta]$

Wynik	$E[\zeta]$	$E[\tau]$
$\sigma (s = 29)$	1,12	1,09
Wsp. zmienności V max	0,0205	0,01908
$\sigma (s = 0)$	5,52	5,56
Wsp. zmienności V min	0,006156	0,006136

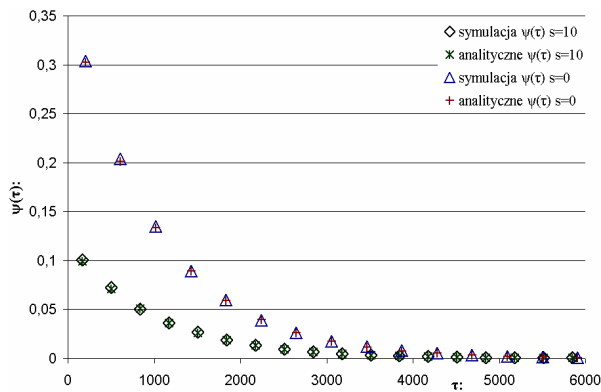
Na kolejnych wykresach 8.1.6 ÷ 8.1.9 przedstawione zostały teoretyczne i symulacyjne (empiryczne) gęstości czasu realizacji zadania logistycznego $\psi(\tau)$ oraz empiryczne i teoretyczne gęstości czasu niezdatności nadsystemu z rezerwą czasową $b(\zeta)$ dla różnych poziomów zamawiania s , które również potwierdzają bardzo znaczną zbieżność wyników generowanych przez oba modele.



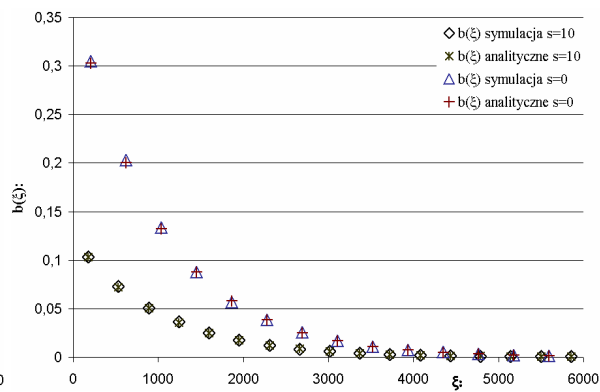
Rys. 8.1.6. Empiryczna funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji zadania logistycznego



Rys. 8.1.7. Empiryczna funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas niezdatności nadsystemu

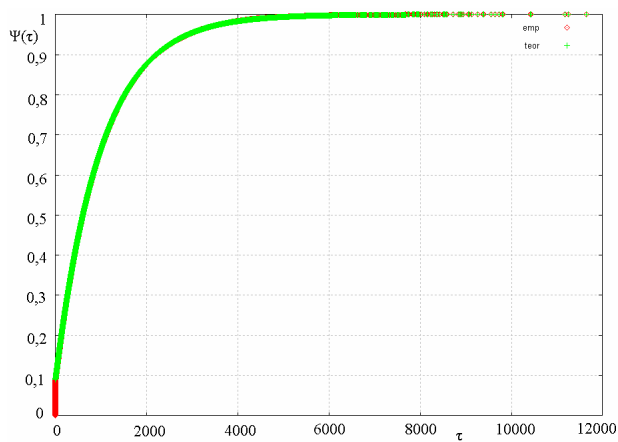


Rys. 8.1.8. Empiryczna i teoretyczna funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji zadania logistycznego

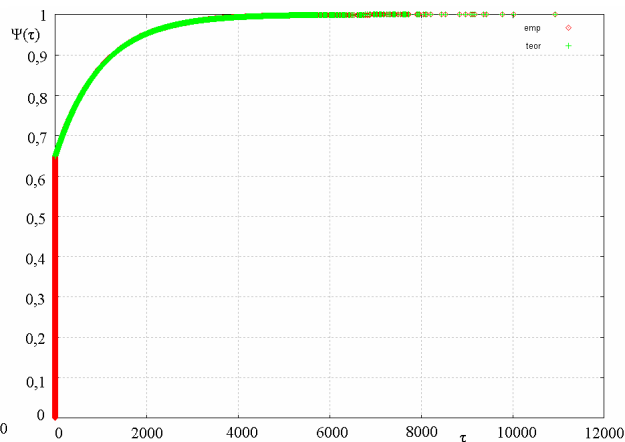


Rys. 8.1.9. Empiryczna i teoretyczna funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas niezdatności nadsystemu

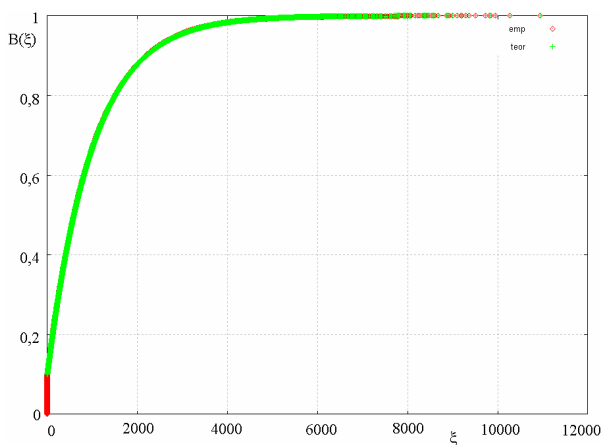
Jednocześnie wykresy 8.1.10 oraz 8.1.11 przedstawiają teoretyczną oraz symulacyjną funkcję dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji zadania logistycznego dla wybranych wielkości poziomu zamawiania s . Z kolei rysunki 8.1.12 oraz 8.1.13 ilustrują teoretyczną i symulacyjną funkcję dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu z rezerwą czasową dla wybranych wielkości poziomu s .



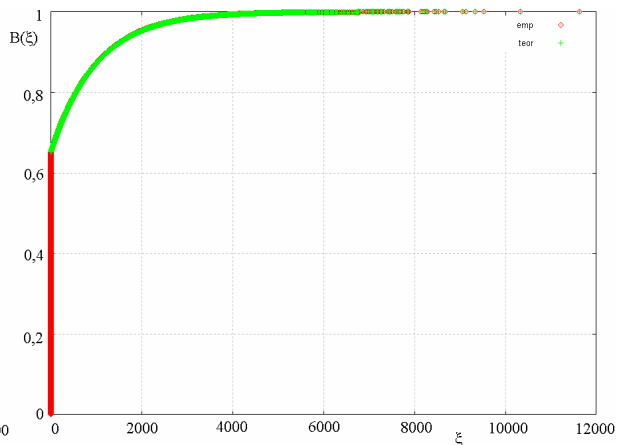
Rys. 8.1.10. Empiryczna i teoretyczna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji zadania logistycznego dla $s = 0$



Rys. 8.1.11. Empiryczna i teoretyczna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji zadania logistycznego dla $s = 10$



Rys. 8.1.12. Empiryczna i teoretyczna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas niezdatności nadsystemu dla $s = 0$



Rys. 8.1.13. Empiryczna i teoretyczna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas niezdatności nadsystemu dla $s = 10$

Hipoteza o zgodności rozkładów prawdopodobieństwa zmiennej losowej czasu realizacji zadania logistycznego w nadsystemie $\Psi(\tau)$ została sprawdzona testem λ -Kolmogorowa. Otrzymane wartości statystyki λ przyjmują wartości w granicach $0,2 \div 0,88$ dla badanych wielkości poziomów zamawiania s , przy trzydziestu klasach grupowania danych. W związku z tym nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładu teoretycznego i empirycznego na poziomie istotności $\alpha = 0,01$ ($\lambda_o = 1,63$).

W kolejnym kroku zbadano zgodność uzyskiwanych wyników analitycznych oraz symulacyjnych dla rozkładów prawdopodobieństwa zmiennej losowej czasu niezdatności nadsystemu z rezerwą czasową $B(\xi)$, przy wykorzystaniu testu zgodności λ -Kolmogorowa. Otrzymane wartości statystyki λ przyjmują wartości w granicach $0,21 \div 1,12$ dla badanych wielkości poziomów zamawiania s , przy trzydziestu klasach grupowania danych. W związku z tym, również nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładu teoretycznego i empirycznego na poziomie istotności $\alpha = 0,01$.

Jednocześnie, przed przystąpieniem do analizy zgodności nadsystemu z wieloelementowym systemem technicznym, należy sprawdzić zgodność wyników uzyskiwanych w procesie symulacji z analitycznymi rezultatami modelu teoretycznego nadsystemu, w którym czas odnowy jednoelementowego systemu technicznego jest niepomiąalny. W analizowanym przypadku, porównanie wyników może być wykonane tylko dla wybranych prostych przypadków teoretycznych, które zostały przeanalizowane w rozdziale 6. Poniżej przedstawione zostało porównanie wyników generowanych przez oba modele dla najprostszej sytuacji, w której nie przewiduje się utrzymywania elementów zapasowych w systemie wsparcia logistycznego ($s = 0, Q = 1$).

Podstawowe wyniki dla oczekiwanego czasu realizacji zadania logistycznego $E[\tau]$, oczekiwanego czasu niezdatności nadsystemu $E[\zeta_1]$, wskaźnika gotowości A , oraz prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu P_{nmj} , wraz z wyznaczonymi wartościami błędów względnego, zostały przedstawione w tabeli 8.1.3. W obliczeniach przyjęto założenia przedstawione w rozdziale 6. Wartości parametrów wejściowych przyjęto zgodnie z tabelą 7.1.1.

Tabela 8.1.3. Wyniki uzyskane w sposób analityczny i symulacyjny oraz wartości błędów względnych

Wyniki	W_{anal}	W_{sym}	e_{twzg}
$E[\zeta_1]$	900,09	900,006	0,0001
$E[\tau]$	900,09	900,81	-0,0008
A	0,1089	0,1084	0,0043
P_{NMlj}	0,891	0,8945	-0,0038

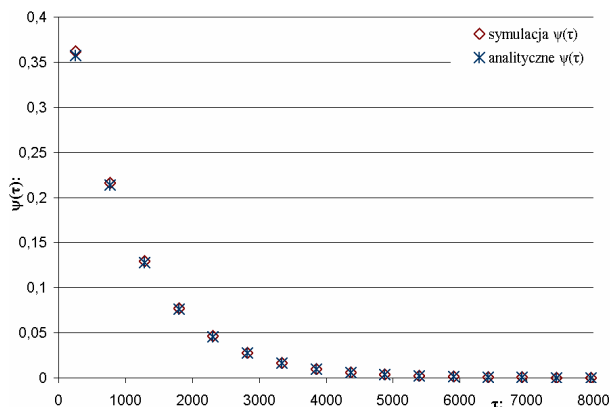
Na wykresach 8.1.14 oraz 8.1.15 przedstawiono teoretyczne oraz empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa czasu realizacji zadania logistycznego $\psi(\tau)$ oraz empiryczne i teoretyczne gęstości czasu niezdatności nadsystemu z rezerwą czasową $b_2(\zeta_1)$ dla wybranego poziomu zamawiania s , które również potwierdzają bardzo znaczną zbieżność wyników generowanych przez oba modele.

Z kolei, wykresy 8.1.16 oraz 8.1.17 przedstawiają teoretyczną oraz symulacyjną funkcję dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji zadania logistycznego $\Psi(\tau)$ oraz teoretyczną i symulacyjną funkcję dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu z rezerwą czasową $B_2(\zeta_1)$.

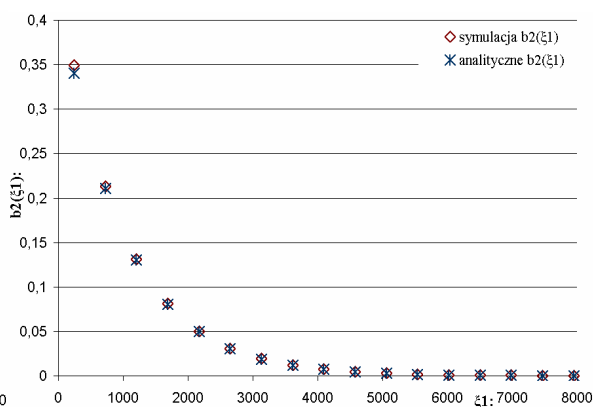
Przy wykorzystaniu testu zgodności λ -Kołmogorowa sprawdzono hipotezy o zgodności:

- a) teoretycznego i empirycznego rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji zadania logistycznego $\Psi(\tau)$,
- b) teoretycznego i empirycznego rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu z rezerwą czasową $B_2(\zeta_1)$.

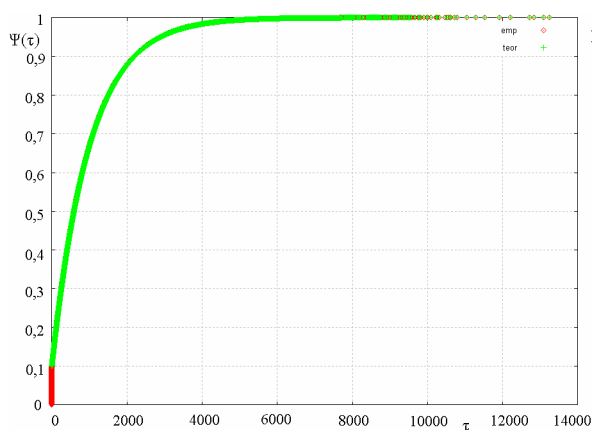
Otrzymane wartości statystyki λ przyjmują wartości 0,68 (przypadek a)) oraz 1,49 (przypadek b)) dla badanego poziomu zamawiania s , przy trzydziestu klasach grupowania danych. W związku z tym, również nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności badanych rozkładów prawdopodobieństwa uzyskanych z modelu teoretycznego i empirycznego na poziomie istotności $\alpha = 0,01$.



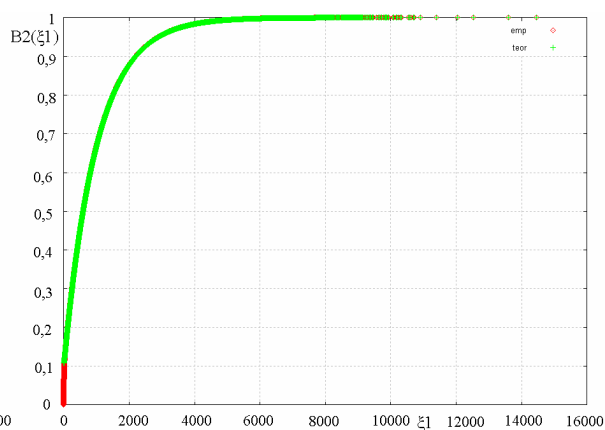
Rys. 8.1.14. Empiryczna i teoretyczna funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji zadania logistycznego dla $s = 0, Q = 1$



Rys. 8.1.15. Empiryczna i teoretyczna funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas niezdatności nadsystemu dla $s = 0, Q = 1$



Rys. 8.1.16. Empiryczna i teoretyczna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas realizacji zadania logistycznego dla $s = 0, Q = 1$



Rys. 8.1.17. Empiryczna i teoretyczna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas niezdatności nadsystemu dla $s = 0, Q = 1$

8.2. Model nadsystemu z wieloelementowym systemem technicznym przy założeniu wykładniczego charakteru realizowanych procesów

W celu uzyskania modelu analitycznego, uwzględniającego zarówno czasy wymian elementów pracujących, jak i wieloelementowość systemu technicznego, wykorzystano *procesy Markowa*.

Pierwsze opracowania modeli analitycznych funkcjonowania systemu wsparcia logistycznego oraz nadsystemu z wykorzystaniem *procesów Markowa* zostały przedstawione w [264] oraz [269]. Jednakże modele te nie uwzględniały wieloelementowości systemu wspieranego. Dlatego też, dla poszczególnych struktur niezawodnościowych systemu

technicznego zbudowane zostały modele nadsystemu, przy uwzględnieniu następujących założeń upraszczających:

- nadsystem funkcjonuje bez rezerwy czasowej ($T_r = 0$);
- przyjęto warunki stacjonarne realizowanych procesów;
- system techniczny jest trzelementowy;
- w systemie wsparcia logistycznego nie są utrzymywane elementy zapasowe (wielkość partii zamówienia $Q = 1$ (dla struktury równoległej $Q = 3$), oraz poziom zamówienia $s = 0$);
- liczba ekip remontowych jest wystarczająca do realizacji równoczesnej wymiany kilku elementów;
- czasy poprawnej pracy i odnowy systemu technicznego, oraz czasy dostawy części wymiennych do systemu wsparcia logistycznego zostały opisane rozkładem wykładniczym z następującymi parametrami: λ, μ, β ;
- wielkości parametrów wejściowych modelu symulacyjnego przyjęto zgodnie z tabelą 7.1.1.

Modele analityczne nadsystemu dla poszczególnych struktur niezawodnościowych systemu technicznego przedstawiono w Załączniku II. W procesie weryfikacji zgodności obu modeli porównane zostały wskaźniki gotowości, uzyskane w badaniu symulacyjnym i w sposób analityczny (tabela 8.2.1).

Tabela 8.2.1. Wskaźnik gotowości nadsystemu wyznaczony w sposób analityczny i symulacyjny oraz wartości błędów względnych e_{twzg}

<i>Rodzaj struktury systemu technicznego</i>	A_{anal}	A_{sym}	e_{twzg}
<i>Szeregowa</i>	0,0319	0,0332	-0,03916
<i>Równoległa</i>	0,1519	0,16102	-0,0598
<i>Progowa ($k = 1$)</i>	0,09109	0,089415	0,0184
<i>Progowa ($k = M$)</i>	0,00015	0,0001478	0,0146

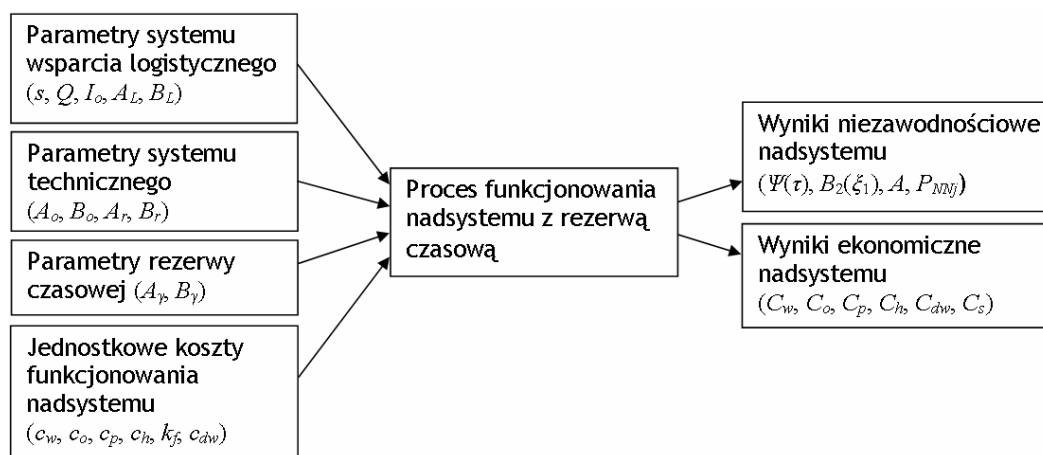
Wielkości błędu względnego e_{twzg} potwierdzają dużą zbieżność uzyskanych wyników.

9. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI MODELU SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ

Po opracowaniu modelu symulacyjnego nad systemu z rezerwą czasową, w którym system techniczny posiada różną strukturę niezawodnościową, należy przeanalizować wpływ podstawowych parametrów wejściowych na uzyskane wyniki niezawodnościowe i ekonomiczne modelu. Rodzaj i zakres zmienności parametrów wejściowych został przedstawiony w tabeli 7.1.1.

Parametry te można podzielić na (rys. 9.1):

- parametry charakteryzujące proces funkcjonowania systemu wsparcia logistycznego (parametry polityki zaopatrzenia, procesu dostaw elementów wymiennych)
- parametry charakteryzujące proces funkcjonowania systemu technicznego,
- parametry charakteryzujące nad system.



Rys. 9.1. Parametry wejściowe symulacyjnego modelu nad systemu z rezerwą czasową mające wpływ na proces funkcjonowania nad systemu

Każdy z badanych parametrów wpływa w odmienny sposób na podstawowe charakterystyki nad systemu. Jednocześnie wyniki są uzależnione do struktury niezawodnościowej systemu wspieranego.

Na rysunku 9.2 przedstawiono podstawowe warianty oceny wpływu zmienności poszczególnych parametrów wejściowych modelu na wyniki eksploatacji nad systemu. Poniżej omówione zostały tylko wybrane wyniki, uzyskane w procesie analizy wrażliwości. Wyniki wybrano przede wszystkim na podstawie wartości współczynników korelacji liniowej oraz równań regresji, oceniających siłę zależności pomiędzy zmienną wejściową a wynikiem. Równania regresji dla wszystkich analizowanych wyników przedstawione zostały w Załączniku III.

PARAMETRY WYJŚCIOWE MODELU	PARAMETRY WEJŚCIOWE MODELU																		
	A_0	I/B_0	A_r	I/B_r	A_L	I/B_L	A_γ	I/B_γ	k	M	s	Q	I_0	c_w	c_o	c_p	c_h	k_f	c_{dw}
TE	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
A	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
P_{Nij}	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
$\bar{\tau}$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
$\bar{\xi}$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
$\bar{\xi}_{s1}$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
C_w	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
C_o	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x				
C_p	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x			
C_h	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x		
C_{dw}	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					x	x
C_s	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x – oznaczenie badanych zależności pomiędzy parametrem wejściowym a charakterystyką nadsystemu

Rys. 9.2. Zestaw wariantów przeprowadzonego eksperymentu dotyczącego analizy wpływu zmienności parametrów wejściowych modelu na wyniki eksploatacji nadsystemu

9.1. Parametry charakteryzujące funkcjonowanie systemu wsparcia logistycznego

W obszarze podstawowych parametrów charakteryzujących funkcjonowanie systemu logistycznego można wyróżnić dwie podstawowe grupy: parametry polityki zaopatrzenia, które charakteryzują się dużą łatwością ich kształtowania, przez co nazwiemy je zmiennymi decyzyjnymi, oraz parametry charakteryzujące proces dostaw elementów wymiennych, które można kształtować jedynie w ograniczonym zakresie.

9.1.1. Parametry polityki zaopatrzenia

Zgodnie z przyjętymi założeniami modelu, analizowany nadsystem funkcjonuje według polityki Stałego Punktu Zamawiania (s, Q). W związku z tym, podstawowe zmienne decyzyjne w analizowanym obszarze obejmują definicję wielkości partii zamówienia Q oraz poziomu zapasu alarmowego s , w którym następuje złożenie kolejnego zamówienia na elementy wymienne.

Dodatkowo, przeanalizowany został wpływ na wyniki nadsystemu poziomu zapasu początkowego I_0 , który znajduje się w systemie w chwili rozpoczęcia procesu eksploatacji.

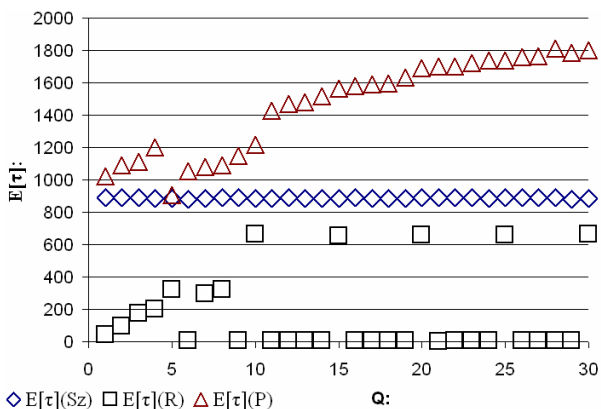
9.1.1.1. Wielkość partii zamówienia

Wielkość jednorazowej partii zamówienia bezpośrednio wpływa na wszystkie wyniki nadsystemu. Wielkość partii determinuje długość cyklu zaopatrzenia, jednocześnie wpływając na poziom kosztów funkcjonowania nadsystemu. Przykładowo, zwiększenie wielkości partii Q oznacza wyższy średni poziom zapasów w systemie wsparcia logistycznego, co z jednej strony wpływa pozytywnie na wyniki niezawodnościowe nadsystemu (większa tolerancja

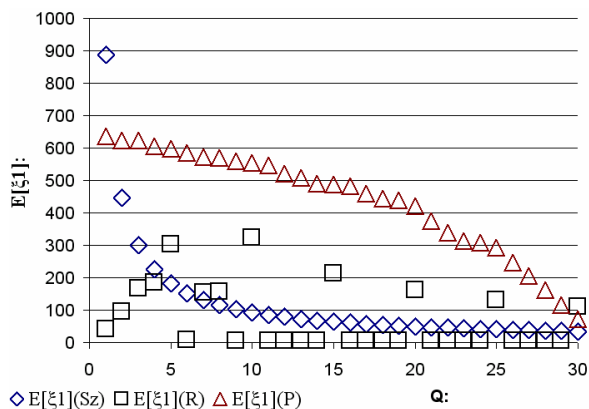
zakłóceń występujących w procesie dostaw, rzadsze dostawy), z drugiej strony może negatywnie wpłynąć na poziom oczekiwanych kosztów funkcjonowania nad systemu. Wiąże się to z faktem, że wyższy poziom zapasów oznacza przede wszystkim wyższe koszty utrzymania C_h w badanym okresie.

W procesie analizy wrażliwości modelu nad systemu z rezerwą czasową zaobserwowano różny wpływ badanego czynnika na podstawowe wyniki niezawodnościowe i ekonomiczne. Otrzymane wyniki znacznie różnią się w zależności od struktury niezawodnościowej systemu technicznego, pracującego w nad systemie. Podstawowe zależności wyników niezawodnościowych w funkcji wielkości partii dostawy dla badanego nad systemu można opisać w postaci równań potęgowych oraz wielomianowych (Załącznik III).

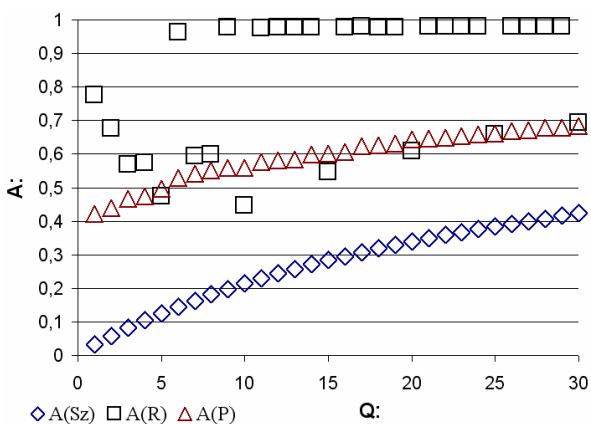
Wpływ badanego parametru na wyniki eksploatacyjne nad systemu został przedstawiony na rysunkach 9.1.1.1-9.1.1.5.



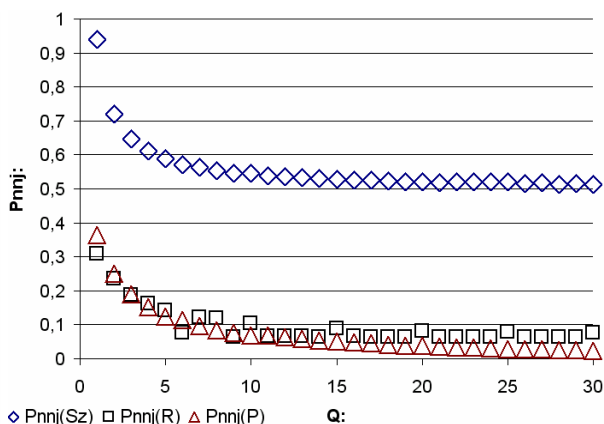
Rys. 9.1.1.1. Zmienność wartości oczekiwanej czasu realizacji zadania logistycznego w funkcji zmiany parametru Q



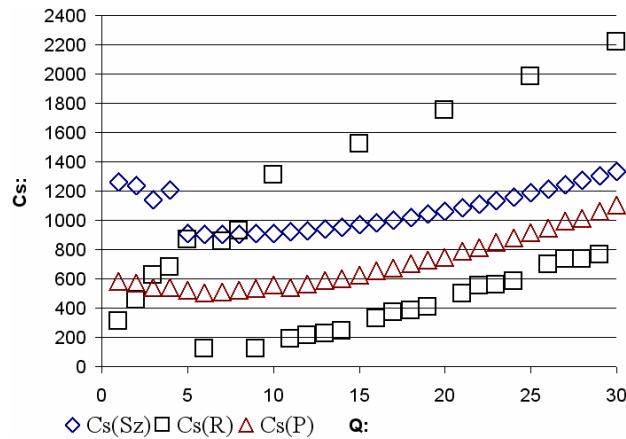
Rys. 9.1.1.2. Zmienność wartości oczekiwanej czasu niezdatności nad systemu w funkcji zmiany parametru Q



Rys. 9.1.1.3. Zmienność poziomu wskaźnika gotowości w funkcji zmiany parametru Q



Rys. 9.1.1.4. Zmienność poziomu prawdopodobieństwa niezdatności nad systemu w funkcji zmiany parametru Q



Rys. 9.1.1.5. Zmienność oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru

Q

W systemie o strukturze szeregowej każdorazowe uszkodzenie się elementu pracującego systemu technicznego powoduje jego niezdatność. Analizując przedstawione wyniki, zmiana poziomu wielkości partii zamówienia Q bezpośrednio wpływa na poziom oczekiwanego czasu niezdatności nadsystemu $E[\xi_1]$. Zwiększenie wielkości partii dostawy oznacza zmniejszenie częstotliwości dostaw, co obniża prawdopodobieństwo, że zabraknie elementów zapasowych w nadsystemie w pojedynczym cyklu zaopatrzenia (mniejsza wrażliwość na występowanie zjawisk niepożądanych w procesie realizacji dostaw). W związku z tym, prawdopodobieństwo niezdatności nadsystemu w wyniku braku elementów rezerwowych maleje, a poziom wskaźnika gotowości rośnie.

Natomiast zależność pomiędzy wielkością partii zamówienia Q a uzyskanymi wynikami nadsystemu, w którym system techniczny posiada równoległą strukturę niezawodnościową ma charakter skokowy. Zgodnie z przedstawionymi wynikami, gdy wielkość partii zamówienia nie przekracza liczby pracujących elementów systemu technicznego ($Q \leq M = 5$) zwiększenie liczby jednorazowo dostarczanej partii elementów wymiennych wydłuża oczekiwany okres realizacji zadania logistycznego $E[\tau]$. Jednocześnie przekłada się to na wydłużenie oczekiwanego okresu niezdatności nadsystemu $E[\xi_1]$ oraz obniżenie poziomu wskaźnika gotowości A . Związane jest to z faktem, że prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności nadsystemu z powodu braku elementów zapasowych rośnie. Jednocześnie, prawdopodobieństwo pojawienia się każdorazowej niezdatności nadsystemu maleje, gdyż częste dostawy niewielkiej nawet ilości elementów wymiennych powodują, że system wsparcia logistycznego dysponuje pewną ilością elementów zapasowych, przez co może on funkcjonować do kolejnej dostawy przy niepełnej liczbie zdalnych elementów (prawdopodobieństwo niezdatności zależy w tym przypadku tylko od czasu odnowy systemu technicznego).

Po przekroczeniu granicznej wielkości partii zamówienia Q ($Q > M$) można zauważyć następującą zależność: zwiększenie wielkości partii zamówienia i zmniejszenie częstotliwości dostaw powoduje, że uzyskane wyniki nadsystemu osiągają dwie wielkości: $E[\tau]$, $E[\xi_1]$, P_{NNj} osiągają wielkość maksymalną, gdy Q jest wielokrotnością M oraz minimalną w pozostałych przypadkach. Wskaźnik gotowości A osiąga wielkość minimalną, gdy Q jest wielokrotnością M oraz maksymalną w pozostałych przypadkach. Taki charakter zmienności bezpośrednio uzależniony jest od poziomu prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu, pojawiającej się w wyniku braku elementów wymiennych w systemie wsparcia logistycznego. Dla przypadków, w których wielkość partii Q nie jest wielokrotnością M , wielkość partii dostarczonej do systemu logistycznego pozwala na przywrócenie systemu wspieranego do stanu zdatności, jednocześnie w systemie logistycznym pozostają elementy rezerwowe, które będą mogły być wykorzystane do ponownego uruchomienia systemu przy kolejnym uszkodzeniu (tzw. „niepełna” zdatność). Dzięki temu, zgodnie z założeniami modelu, w badanych przypadkach niezdatność nadsystemu zależy od czasu odnowy systemu technicznego ($\tau = 0$).

Z kolei w nadsystemie, w którym system techniczny posiada progową strukturę niezawodnościową, największą wrażliwość na zmianę parametru wielkości partii zamówienia Q obserwujemy dla oczekiwanego czasu realizacji zadania logistycznego $E[\tau]$. Charakter badanej zależności jest również skokowy. Mniejsza wielkość partii Q wiąże się z koniecznością dokonywania częstszych zamówień, których czas dostawy jest krótszy. Zwiększając Q , również $E[\tau]$ rośnie, co wiąże się z przyjętymi założeniami modelu. Każdorazowe uszkodzenie się elementu pracującego powoduje podjęcie operacji jego wymiany, przez co poziom zapasów w systemie wsparcia logistycznego zmniejsza się. Ponadto elementy systemu technicznego mają funkcję intensywności uszkodzeń $\lambda(t) \neq 0$ nawet w czasie realizacji operacji jego odnowy. W związku z tym, brak elementów wymiennych w systemie logistycznym zostanie odnotowany znacznie wcześniej niż w przypadku nadsystemu, w którym system techniczny posiada inną strukturę niezawodnościową.

Jednocześnie wartość oczekiwana $E[\xi_1]$ oraz P_{NNj} maleją, a poziom wskaźnika gotowości A rośnie wraz ze wzrostem wielkości partii Q , co wiąże się z większą tolerancją zakłóceń występujących w procesie dostawy.

Istotnym elementem zagadnienia jest wpływ wielkości partii zamówienia na poziom całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu (rys. 9.1.1.5). Analiza kosztów C_s pozwoliła na ustalenie podstawowych zależności (Załącznik III): zwiększenie poziomu partii dostawy Q powoduje spadek kosztów obsługi zamówień (C_o), oraz wzrost kosztów zakupu

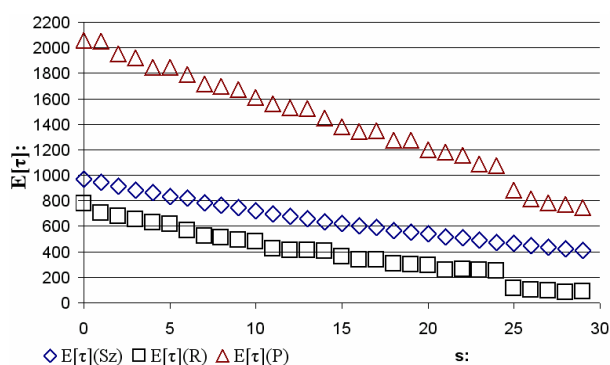
(C_p) i kosztów utrzymania zapasów (C_h) dla wszystkich analizowanych przypadków. Zależność kosztów niezdatności nadsystemu (C_{dw}) od poziomu partii dostawy Q nie jest już oczywista. W przypadku nadsystemu, w którym system techniczny posiada strukturę szeregową, koszty niezdatności nadsystemu maleją wraz ze wzrostem poziomu partii zamówienia. Dla pozostałych struktur niezawodnościowych relacja jest odwrotna. Warto także wspomnieć, iż w przypadku nadsystemu o strukturze równoległej systemu wspieranego mniej kosztowne są warianty dla wielkości partii dostawy Q niebędących wielokrotnością M .

Ogólnie można przyjąć, iż opierając się na założeniach przyjętych w procesie modelowania, oraz przy ustalonych wartościach parametrów wejściowych w badanym modelu, łączne koszty funkcjonowania nadsystemu są przede wszystkim uzależnione od poziomu kosztów utrzymania zapasów oraz kosztów niezdatności nadsystemu. Zależności pomiędzy poziomem kosztów funkcjonowania nadsystemu C_s a wielkością partii zamówienia Q można opisać równaniem wielomianowym, bez względu na typ analizowanej struktury niezawodnościowej systemu technicznego (Zał. III).

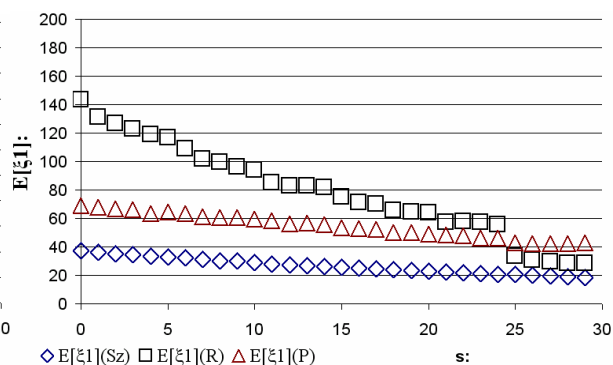
9.1.1.2. Poziom zapasu alarmowego

Kolejnym parametrem systemu wsparcia logistycznego jest wielkość poziomu zamawiania. Poziom zapasu alarmowego determinuje występowanie chwil złożenia kolejnych zamówień na elementy wymienne, wyznaczających początek nowego cyklu zaopatrzenia. Podstawowe zależności pomiędzy zmianą poziomu zamawiania s a podstawowymi wynikami eksploatacyjnymi nadsystemu zostały przedstawione na rysunkach 9.1.1.6 – 9.1.1.9.

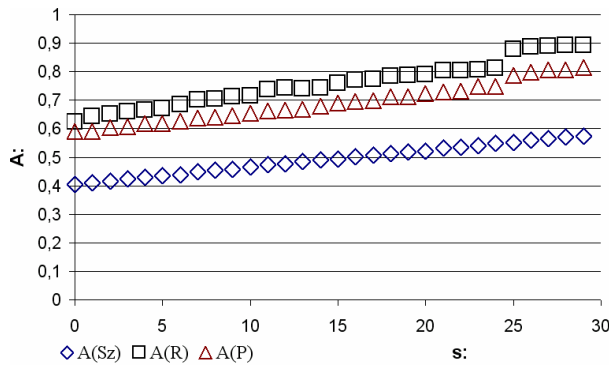
Prawie wszystkie charakterystyki niezawodnościowe nadsystemu wykazują wrażliwość na zmianę poziomu zamawiania s . Zależność ta ma najczęściej charakter wykładniczy lub wielomianowy (Zał. III).



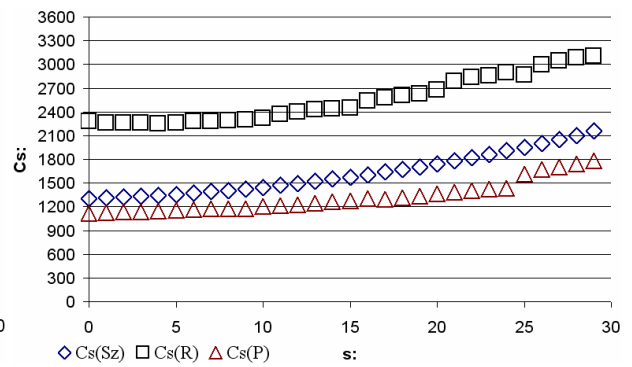
Rys. 9.1.1.6. Zmienność wartości oczekiwanej czasu realizacji zadania logistycznego w funkcji zmiany parametru s



Rys. 9.1.1.7. Zmienność wartości oczekiwanej czasu niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru s



Rys. 9.1.1.8. Zmienność poziomu wskaźnika gotowości w funkcji zmiany parametru s



Rys. 9.1.1.9. Zmienność oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru s

Na szczególną uwagę zasługują uzyskane wyniki dla nadsystemu, w którym system techniczny posiada strukturę progową lub równoległą. W analizowanym przypadku, gdy poziom zapasu alarmowego s przekroczy wartość graniczną ($s \geq Q - M = 25$) można zaobserwować skokowy spadek wartości oczekiwanego czasu realizacji zadania logistycznego $E[\tau]$ oraz czasu niezdatności nadsystemu $E[\xi_1]$, oraz skokowy wzrost poziomu wskaźnika gotowości nadsystemu A . Takie zachowanie się modelu wynika z przyjętych założeń w procesie modelowania. W modelu symulacyjnym przyjęto założenie, że nowe zamówienie jest generowane w chwili, gdy uszkodzeniu ulegnie element pracujący, który potencjalnie obniży poziom zapasu do wielkości alarmowej (patrz punkt 7.2). W związku z tym, kolejne oczekiwane czasy $E[\tau]$ i $E[\xi_1]$ skracane są o okresy poprzedzających je przestojów systemu technicznego, wynikających z braku elementów zapasowych.

Obserwowana zależność prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany poziomu zamawiania s jest stosunkowo niewielka. Dla wszystkich przypadków struktur niezawodnościowych ma ona charakter wielomianowy, przy czym największą wrażliwość wykazuje nadsystem, w którym system techniczny posiada progową strukturę niezawodnościową (Zał. III). W badanym zakresie analizy numerycznej, poziom funkcji prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu P_{NNj} obniża się z wartości 3% do poziomu 1,5% wraz ze wzrostem poziomu alarmowego s .

Jednocześnie obserwacja funkcji kosztów funkcjonowania nadsystemu wykazała, że wraz ze wzrostem poziomu alarmowego s rosną koszty utrzymania zapasów (C_h) oraz kosztów niezdatności nadsystemu (C_{dw}), bez względu na typ analizowanej struktury niezawodnościowej systemu wspieranego. Zależności te mają charakter wielomianowy (struktura progowa i równoległa) oraz wykładniczy (struktura szeregową) (Zał. III).

9.1.1.3. Wielkość zapasu początkowego

Ostatnim parametrem polityki zaopatrzenia, którego wpływ przeanalizowano jest poziom liczby elementów wymiennych, znajdujących się w systemie wsparcia logistycznego w chwili rozpoczęcia symulacji.

Zgodnie z uzyskanymi wynikami wykazano, że poziom zapasu początkowego nie wpływa na uzyskane rezultaty procesu eksploatacji w długim okresie funkcjonowania nadsystemu. Charakter zależności pomiędzy poziomem zapasu początkowego I_0 a podstawowymi charakterystykami nadsystemu można opisać równaniem liniowym (struktura szeregową) lub wielomianowym (struktura równoległa i progowa) (Zał. III).

9.1.2. Parametry charakteryzujące proces dostaw

Niezawodne funkcjonowanie systemu technicznego może być zapewnione jedynie w przypadku efektywnej realizacji funkcji wspierających przez system wsparcia logistycznego. Możliwość zapewnienia potrzeb eksploatacyjnych systemu technicznego zapewniona jest dzięki realizacji procesu dostaw elementów wymiennych do systemu logistycznego.

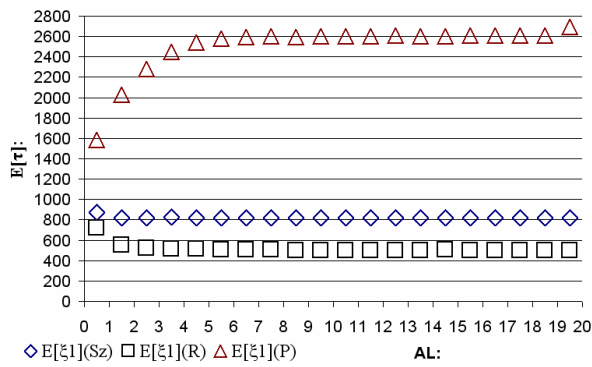
W analizowanym modelu funkcjonowania nadsystemu, najważniejszą cechą procesu dostawy elementów jest rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej czasu realizacji dostaw. W procesie modelowania przyjęto, że czas realizacji dostaw jest opisany rozkładem Weibull'a (punkt 7.1). W związku z tym, w procesie analizy wrażliwości modelu nadsystemu z rezerwą czasową przeanalizowano zmienność intensywności czasu realizacji dostaw A_L oraz wartości oczekiwanej czasu realizacji dostaw $1/B_L$.

Badania wrażliwości modelu symulacyjnego przeprowadzono dla różnych poziomów wartości współczynnika kształtu oraz parametru skali rozkładu (tabela 7.1.1). W przypadku analizy zmienności wartości parametru współczynnika kształtu, parametry skali dobrano tak, aby zachować stałą wartość średnią czasu dostawy.

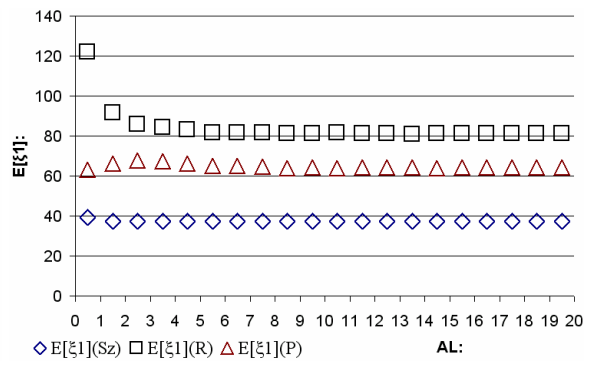
9.1.2.1. Intensywność rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji dostaw

Wpływ poziomu intensywności czasu realizacji dostawy elementów wymiennych do systemu wsparcia logistycznego A_L przedstawiono na rysunkach 9.1.2.1 – 9.1.2.5.

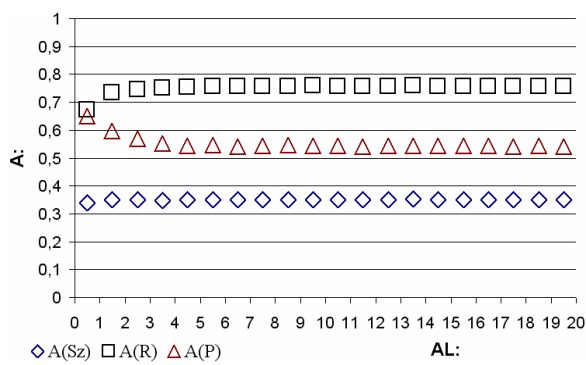
Zmiana poziomu parametru A_L ma wpływ na badane charakterystyki nadsystemu jedynie w części analizowanego zakresu jego wartości.



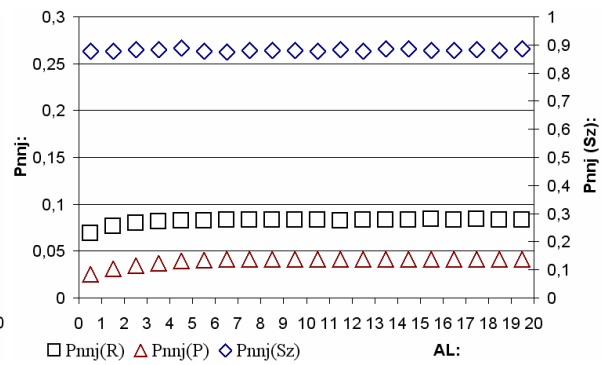
Rys. 9.1.2.1. Zmienność wartości oczekiwanej czasu realizacji zadania logistycznego w funkcji zmiany parametru A_L



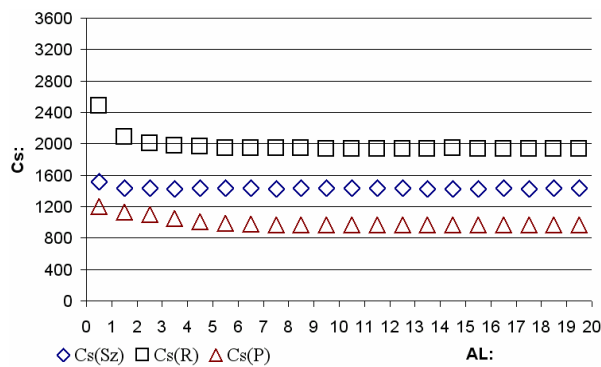
Rys. 9.1.2.2. Zmienność wartości oczekiwanej czasu niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru A_L



Rys. 9.1.2.3. Zmienność poziomu wskaźnika gotowości w funkcji zmiany parametru A_L



Rys. 9.1.2.4. Zmienność poziomu prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru A_L



Rys. 9.1.2.5. Zmienność oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru A_L

W badanym zakresie analizy numerycznej, w nadsystemach, w których system techniczny posiada szeregową lub równoległą strukturę niezawodnościową oczekiwane czasy niezdatności nadsystemu $E[\xi_1]$ maleją wraz ze wzrostem intensywności A_L . Wynika to ze spadku średniego czasu braku elementów wymiennych $E[\tau]$. Natomiast w przypadku nadsystemu, w którym system techniczny ma strukturę progową, wzrost poziomu parametru intensywności A_L ma negatywny wpływ na wyniki niezawodnościowe. Omawiane zależności

mają charakter potęgowy i wykładniczy (struktura szeregową), oraz logarytmiczny i wykładniczy (struktura równoległa i progowa) (Zał. III).

Analizując wpływ parametru A_L na wyniki ekonomiczne, malejąca intensywność dostaw wpływa na wzrost całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu C_s dla wszystkich analizowanych przypadków. Rzadsze i większe dostawy elementów wymiennych do nadsystemu wpływają na zwiększenie średniego poziomu zapasów w systemie logistycznym, co przede wszystkim wpływa na wzrost kosztów utrzymania zapasów (C_h). Zależności pomiędzy analizowanym parametrem a wynikami ekonomicznymi są opisane równaniem wielomianowym (struktura szeregową i progową) oraz potęgowym (struktura równoległa).

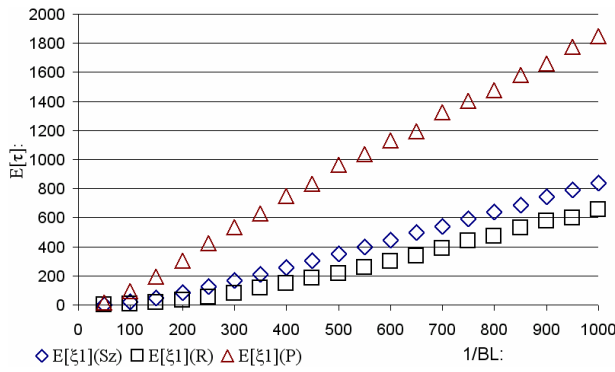
Badając strukturę kosztów funkcjonowania nadsystemu można stwierdzić, że największy wpływ na poziom kosztów C_s mają koszty utrzymania zapasów (C_h) oraz, w przypadku struktury równoległej i progowej, koszty niezdatności nadsystemu (C_{dw}) (Zał. III).

9.1.2.2. Wartość oczekiwana czasu realizacji dostaw

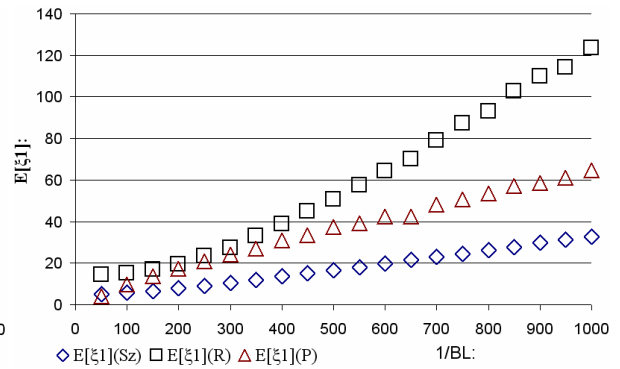
Podstawowe wyniki, uzyskane w procesie oceny wrażliwości modelu nadsystemu z zależnością czasową na zmianę długości oczekiwanego czasu dostaw zostały przedstawione na rysunkach 9.1.2.6 – 9.1.2.9.

Wydłużenie oczekiwanego czasu dostaw elementów wymiennych do systemu wsparcia logistycznego zwiększa prawdopodobieństwo pojawienia się braku elementu wymiennego w chwili $(s+1)$ -go uszkodzenia się systemu wspieranego, oraz zwiększa prawdopodobieństwo pojawienia się niepożądanych skutków w nadsystemie z powodu np. opóźnienia dostawy. W rezultacie wydłużenie oczekiwanego czasu $1/B_L$ powoduje wzrost oczekiwanego czasu realizacji zadania logistycznego $E[\tau]$, a w konsekwencji oczekiwanego czasu niezdatności nadsystemu $E[\xi_1]$. Zależność ta jest obserwowana dla wszystkich analizowanych typów struktury niezawodnościowej systemu wspieranego i może być opisana równaniem liniowym (struktura szeregową) lub wielomianowym stopnia drugiego (struktura progowa i równoległa) (Zał. III).

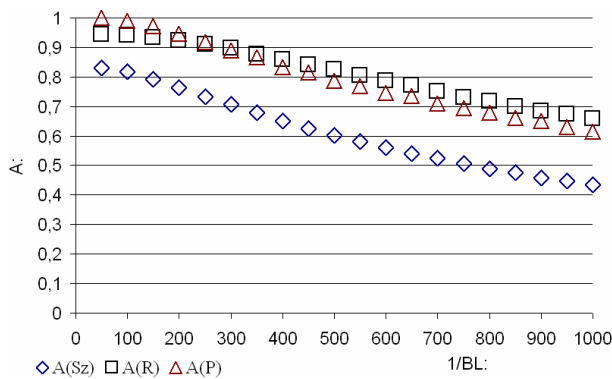
Wpływ zmienności parametru $1/B_L$ na poziom prawdopodobieństwa niezdatności P_{NNj} jest niezauważalny w badanym zakresie analizy numerycznej. W badanym zakresie analizy numerycznej, jedynie w przypadku modelu nadsystemu, w którym system techniczny posiada strukturę progową, można odnotować maksymalny zakres zmienności badanej charakterystyki niezawodnościowej wahający się w granicach od 0,04% do 3%. Niewielka wrażliwość funkcji prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu na zmianę parametru długości oczekiwanego czasu dostaw związana jest z faktem, że funkcja P_{NNj} zależy zarówno od czasu realizacji zadania logistycznego, jak i czasu odnowy systemu wspieranego.



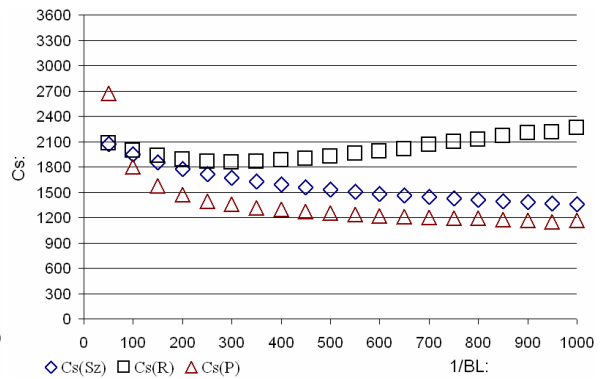
Rys. 9.1.2.6. Zmienność wartości oczekiwanej czasu realizacji zadania logistycznego w funkcji zmiany parametru $1/B_L$



Rys. 9.1.2.7. Zmienność wartości oczekiwanej czasu niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru $1/B_L$



Rys. 9.1.2.8. Zmienność poziomu wskaźnika gotowości w funkcji zmiany parametru $1/B_L$



Rys. 9.1.2.9. Zmienność oczekiwanych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru $1/B_L$

Kolejnym krokiem jest analiza wpływu zmienności oczekiwanego czasu realizacji dostawy na poziom wyników ekonomicznych modelu. Zgodnie z przedstawionym wykresem (rys. 9.1.2.9), w przypadku nadsystemu o strukturze szeregowej oraz progowej systemu wspieranego całkowite koszty funkcjonowania C_s maleją wraz ze wzrostem wartości parametru $1/B_L$. Analizując strukturę kosztów funkcjonowania nadsystemu C_s , podstawowym czynnikiem wpływającym na poziom kosztów dla badanych przypadków są koszty utrzymania zapasów (C_h). Z kolei, w przypadku nadsystemu o strukturze równoległej systemu wspieranego, w procesie analizy wpływu zmienności parametru $1/B_L$ na zmianę całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu C_s zaobserwowano lokalne minimum, którego występowanie również może być tłumaczone silną zależnością kosztów C_s od poziomu kosztów utrzymania zapasów (C_h).

9.2. Parametry charakteryzujące funkcjonowanie systemu technicznego

Analizowana grupa parametrów obejmuje podstawowe charakterystyki funkcjonowania systemu technicznego. Można tu wyróżnić zarówno parametry dotyczące procesu operacyjnego systemu wspieranego (parametry rozkładu prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy elementów wymiennych), parametry procesu odnowy (parametry rozkładu prawdopodobieństwa czasu wymiany elementów), jak również liczbę elementów tworzących system wspierany.

Badania wrażliwości modelu symulacyjnego przeprowadzono dla różnych poziomów wartości współczynnika kształtu oraz parametru skali rozkładów (tabela 7.1.1). W przypadku analizy zmienności wartości parametru współczynnika kształtu, parametry skali dobrano tak, aby zachować stałą wartość średnią czasu poprawnej pracy/wymiany elementów wymiennych.

9.2.1. Intensywność uszkodzeń elementów systemu technicznego

Zmiana intensywności uszkodzeń A_o elementów tworzących system techniczny ma wpływ na badane charakterystyki eksploatacyjne nadsystemu jedynie dla tych przypadków, w których system wspierany posiada równoległą lub progową strukturę niezawodnościową. W danym przypadku obniżenie poziomu intensywności uszkodzeń A_o powoduje obniżenie oczekiwanych czasów realizacji zadania logistycznego $E[\tau]$, co wpływa na obniżenie oczekiwanego czasu niezdatności nadsystemu $E[\xi_1]$. W rezultacie, wzrasta poziom wskaźnika gotowości A (Zał. III). Taka zależność wynika z przyjętych założeń, że wystarczy jeden element zdalny, by system znajdował się w stanie zdatności funkcjonalnej i zadaniowej. W związku z tym, nawet rzadko pojawiające się elementy charakteryzujące się długim okresem poprawnej pracy, znacznie podnoszą poziom zdatności całego systemu technicznego, a w rezultacie i nadsystemu.

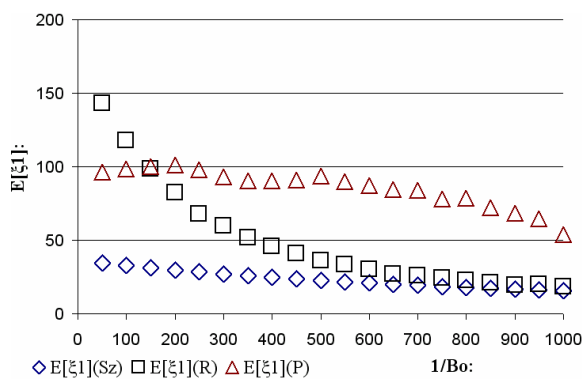
Omawiane podstawowe zależności pomiędzy charakterystykami niezawodnościowymi a zmianą poziomu parametru intensywności uszkodzeń A_o można opisać w postaci równań wielomianowych (struktura szeregową) lub potęgowych i logarytmicznych (struktura równoległa i progowa) (Zał. III). Jednocześnie obserwowany jest niewielki wpływ zmiany poziomu intensywności uszkodzeń A_o na wyniki ekonomiczne nadsystemu, które mogą być opisane zależnością logarytmiczną (struktura równoległa i progowa) oraz wielomianową (struktura szeregową) (Zał. III).

9.2.2. Oczekiwany czas pracy elementów systemu technicznego

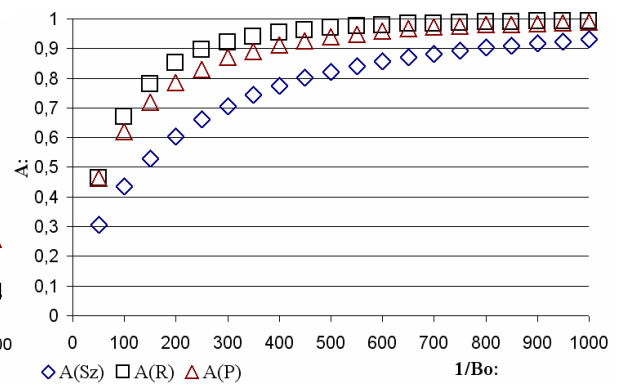
Zmiana długości oczekiwanego czasu poprawnej pracy elementów systemu technicznego $1/B_o$ ma znaczny wpływ na wszystkie wyniki eksploatacyjne nadsystemu (rys. 9.2.1 – 9.2.3).

Wzrost oczekiwanego czasu poprawnej pracy elementów systemu technicznego bezpośrednio przekłada się na wzrost poziomu wskaźnika gotowości nadsystemu A , skrócenie oczekiwanego czasu niezdatności nadsystemu $E[\xi_1]$, czy wzrost kosztów funkcjonowania nadsystemu C_s . Wiąże się to z faktem, że wydłużenie oczekiwanego czasu poprawnej pracy elementów systemu wspieranego praktycznie eliminuje przypadki pojawiania się niezdatności nadsystemu z powodu braku elementów wymiennych w systemie wsparcia logistycznego.

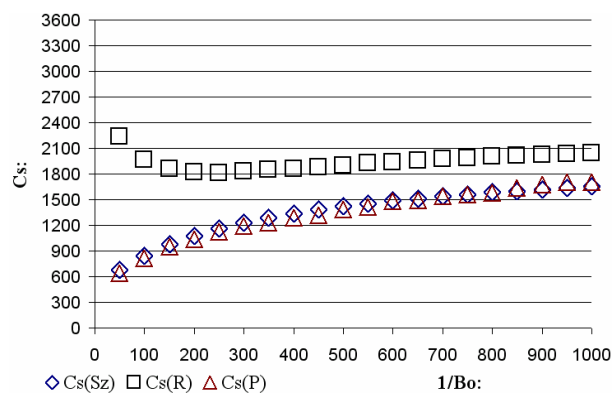
Z drugiej strony, wraz ze wzrostem oczekiwanego czasu pracy elementów wymiennych, mogą pojawić się także skutki negatywne. Wydłużenie oczekiwanego czasu poprawnej pracy elementów wymiennych przekłada się na wzrost kosztów utrzymania zapasów (C_h), które determinują poziom całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu C_s .



Rys. 9.2.1. Zmienność wartości oczekiwanej czasu niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru $1/B_o$



Rys. 9.2.2. Zmienność poziomu wskaźnika gotowości w funkcji zmiany parametru $1/B_o$



Rys. 9.2.3. Zmienność całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru $1/B_o$

Omawiane zależności pomiędzy zmianą poziomu parametru $1/B_o$ a wynikami niezawodnościowymi nadsystemu można opisać przede wszystkim równaniem wykładniczym (struktura szeregową) lub wielomianowym (struktura progowa) (Załącznik III). Z kolei zależności pomiędzy wynikami ekonomicznymi nadsystemu a zmianą poziomu oczekiwanego czasu poprawnej pracy elementów systemu technicznego mają charakter przede wszystkim wielomianowy (struktura równoległa i progowa) oraz logarytmiczny (struktura szeregową i równoległą) (Załącznik III).

9.2.3. Intensywność odnowy elementów systemu technicznego

W procesie analizy wrażliwości modelu nadsystemu można zaobserwować, że zmiana poziomu intensywności wymian A_r w niewielkim stopniu wpływa na uzyskane wyniki eksploatacyjne nadsystemu (Załącznik III). Jedynie w przypadku, w którym system techniczny, funkcjonujący w nadsystemie, posiada równoległą strukturę niezawodnościową można zauważyć niewielki spadek poziomu wskaźnika gotowości A , oraz wzrost oczekiwanego czasu niezdatności $E[\xi_1]$, oraz prawdopodobieństwa niezdatności P_{NNj} dla malejącej intensywności wymian elementów A_r . Sporadycznie występujące operacje wymiany o długim czasie trwania przesuwają w czasie chwile pojawienia się zapotrzebowania na nowe elementy wymienne, z drugiej strony wydłużają ogólny czas niezdatności systemu technicznego, a w konsekwencji i nadsystemu.

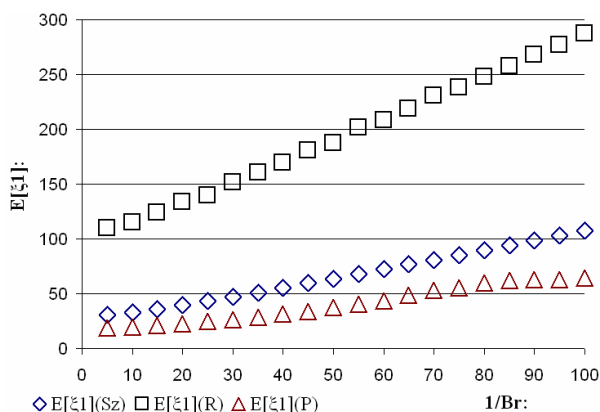
Charakter badanych zależności można opisać przede wszystkim równaniem wielomianowym (struktura szeregową czy progowa) oraz potęgowym lub logarytmicznym (struktura równoległą) (Załącznik III).

9.2.4. Oczekiwany czas odnowy elementów systemu technicznego

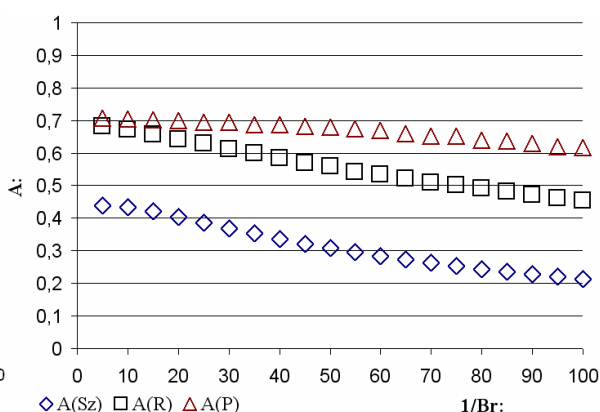
Bardziej widoczny wpływ na uzyskane wyniki eksploatacyjne nadsystemu ma zmiana długości oczekiwanego czasu odnowy elementów wymiennych systemu technicznego $1/B_r$ (rys. 9.2.5 – 9.2.8).

W procesie analizy wrażliwości zaobserwowano, że wydłużenie oczekiwanego czasu wymiany elementów uszkodzonych systemu technicznego negatywnie wpływa na podstawowe charakterystyki eksploatacyjne nadsystemu. Wydłużenie oczekiwanego czasu wymiany $1/B_r$ zwiększa prawdopodobieństwo, że nadsystem przejdzie w stan niezdatności spowodowany przekroczeniem dostępnej rezerwy czasowej przez czas odnowy systemu technicznego, jak również wydłuża ogólny czas niezdatności nadsystemu. Pomimo tego, że prawdopodobieństwo niezdatności nadsystemu z powodu braku elementów wymiennych

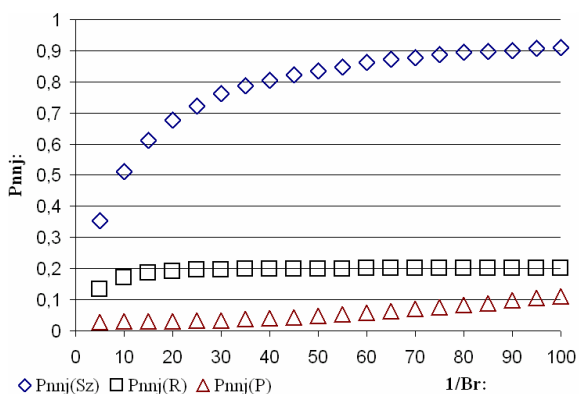
maleje, to w konsekwencji prawdopodobieństwo każdorazowej niezdatności nadsystemu rośnie.



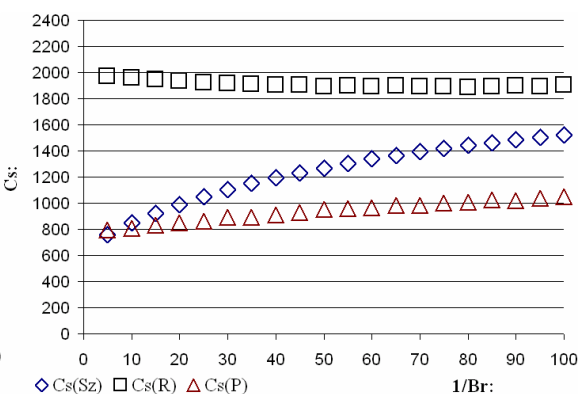
Rys. 9.2.5. Zmienność wartości oczekiwanej czasu niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru $1/B_r$



Rys. 9.2.6. Zmienność poziomu wskaźnika gotowości w funkcji zmiany parametru $1/B_r$



Rys. 9.2.7. Zmienność funkcji prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru $1/B_r$

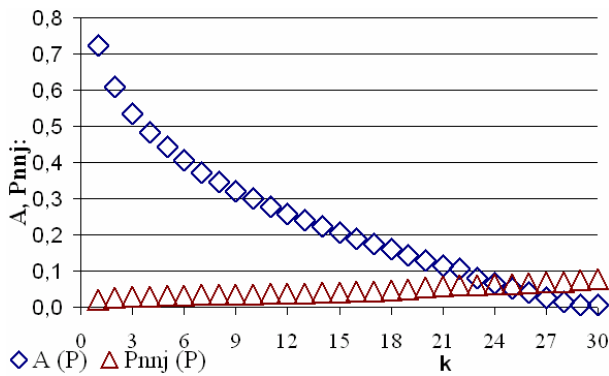


Rys. 9.2.8. Zmienność całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru $1/B_r$

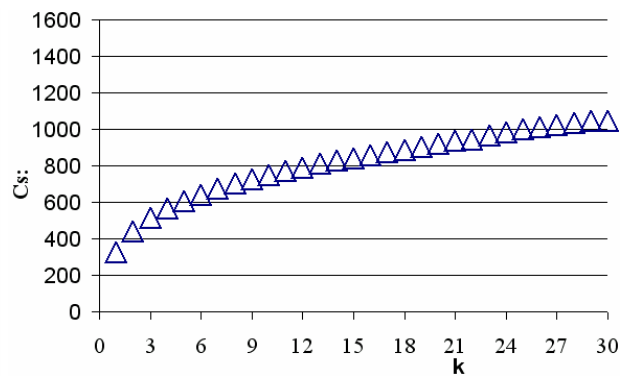
Ponadto, wydłużenie oczekiwanego czasu wymian elementów uszkodzonych nie pozostaje bez wpływu na poziom wyników ekonomicznych nadsystemu (rys. 9.2.2.8). Dłuższy czas wymian elementów wymiennych powoduje wzrost kosztów utrzymania zapasów (C_h) oraz kosztów niezdatności nadsystemu (C_{dw}) (Zał. III).

9.2.5. Liczba pracujących elementów w systemie technicznym o strukturze progowej warunkująca zdatność systemu

W przypadku modelu nadsystemu, w którym system techniczny posiada progową strukturę niezawodnościową, przeanalizowano wpływ parametru k na podstawowe wyniki eksploatacyjne nadsystemu (rys. 9.2.9 – 9.2.10).



Rys. 9.2.9. Zmienność poziomu wskaźnika gotowości nadsystemu oraz prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru k



Rys. 9.2.10. Zmienność całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu w funkcji zmiany parametru k

W miarę zwiększania wartości parametru k system techniczny przechodzi ze struktury równoległej do szeregowej. W rezultacie przekłada się to na uzyskane wyniki funkcjonowania nadsystemu. Większa liczba elementów k , przy niezmiennych pozostałych parametrach nadsystemu, niezbędnych do tego, aby system pozostawał w stanie zdadności przekłada się na wzrost prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu P_{Nj} , oczekiwanego czasu niezdatności nadsystemu $E[\zeta_1]$, oraz obniżenie poziomu gotowości nadsystemu A (Zał. III).

9.3. Parametry charakteryzujące funkcjonowanie nadsystemu

W kolejnym etapie badań wrażliwości modelu nadsystemu przeanalizowano wpływ parametrów rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej okres rezerwy czasowej na podstawowe wyniki eksploatacyjne nadsystemu.

Badania wrażliwości modelu symulacyjnego przeprowadzono dla różnych poziomów wartości współczynnika kształtu oraz parametru skali rozkładu (tabela 7.1.1). W przypadku analizy zmienności wartości parametru współczynnika kształtu, parametry skali dobrano tak, aby zachować stałą wartość średnią długości rezerwy czasowej.

9.3.1. Intensywność rozkładu prawdopodobieństwa okresu rezerwy czasowej nadsystemu

Podczas badania przeanalizowano wpływ intensywności rozkładu prawdopodobieństwa okresu rezerwy czasowej nadsystemu na wyniki eksploatacyjne nadsystemu.

Dla wszystkich analizowanych przypadków, przy przyjętych założeniach modelowania, zaobserwowano bardzo niewielki wpływ zmiany wartości parametru intensywności okresu rezerwy czasowej A_γ na podstawowe charakterystyki niezawodnościowe i ekonomiczne

nadsystemu. Charakter badanych zależności można opisać przede wszystkim równaniem wielomianowym (Zał. III).

9.3.2. Oczekiwana długość rezerwy czasowej nadsystemu

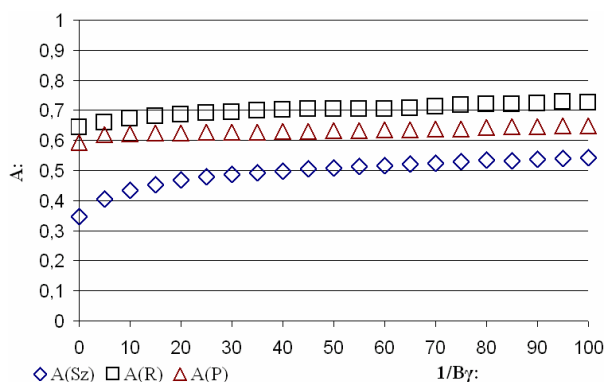
Zmiana oczekiwanej długości okresu rezerwy czasowej nadsystemu $1/B_\gamma$ bezpośrednio wpływa na podstawowe wyniki jego funkcjonowania (rys. 9.3.1-9.3.2).

W badanym zakresie zmienności parametru $1/B_\gamma$ można zauważyć, że wydłużenie oczekiwanego okresu rezerwy czasowej pozytywnie wpływa na uzyskane wyniki eksploatacyjne nadsystemu dla wszystkich analizowanych przypadków. Im dłuższy jest okres rezerwy czasowej, tym większa jest tolerancja nadsystemu na zakłócenia powstałe w procesie eksploatacji systemu technicznego oraz realizacji zadań wspierających.

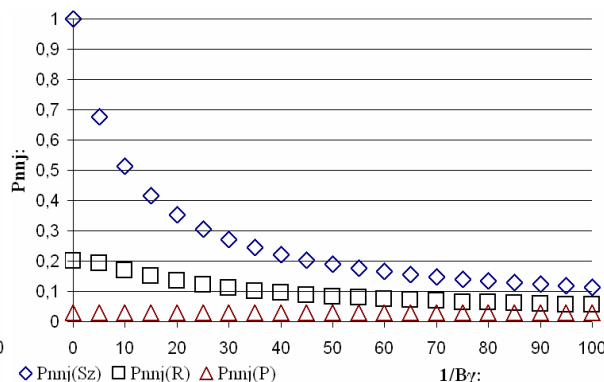
Jednocześnie zauważono, że nadsystem, w badanym zakresie analizy numerycznej, w pełni uzyskuje tolerancję na wszelkie zakłócenia procesu eksploatacji ($P_{NNj} \approx 0$, $A \approx 1$) dla parametru $1/B_\gamma \approx 100\ 000$ jednostek czasu dla wszystkich analizowanych przypadków nadsystemu z rezerwą czasową.

W przypadku oceny kosztów funkcjonowania nadsystemu wydłużenie okresu rezerwy czasowej bezpośrednio wpływa na obniżenie kosztów niezdatności nadsystemu (C_{dw}).

Charakter badanych zależności można opisać przede wszystkim równaniem wielomianowym (Zał. III).



Rys. 9.3.1. Zmienność poziomu wskaźnika gotowości nadsystemu w funkcji zmiany parametru $1/B_\gamma$



Rys. 9.3.2. Zmienność funkcji prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w funkcji zmiany parametru $1/B_\gamma$

9.3.3. Koszty jednostkowe eksploatacji nadsystemu

Pełna analiza wrażliwości modelu nie może być przeprowadzona bez uwzględnienia wpływu na poziom funkcjonowania nadsystemu kosztów jednostkowych, jakie są ponoszone w procesie eksploatacji (c_w , c_o , c_p , c_h , k_f , c_{dw}). Podobnie, jak w przypadku badania wpływu analizowanego czynnika na wyniki analityczne modelu nadsystemu, zmiana któregośkolwiek z

kosztów jednostkowych eksploatacji nadsystemu powoduje liniową zmianę funkcji całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu C_s (Zał. III).

W badanym zakresie analizy numerycznej zaobserwowano, iż poziom całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu C_s przede wszystkim uzależniony jest od poziomu jednostkowego kosztu utrzymania elementu wymiennego w jednostce czasu c_h dla wszystkich analizowanych przypadków. Przy przyjętych założeniach w procesie modelowania, liniowy przyrost kosztu c_h o jednostkę, powoduje liniowy przyrost całkowitych kosztów funkcjonowania nadsystemu C_s aż o około od 7,5 jednostek (struktura szeregową i progową), do około 20 jednostek (struktura równoległą),.

Jednocześnie, obserwuje się znacznie mniejszy wpływ jednorazowego kosztu niezdatności nadsystemu na jego wyniki ekonomiczne niż w przypadku kosztu utrzymania zapasu (C_h). Przyrost kosztów całkowitych nadsystemu C_s rośnie znacznie wolniej (dla przyjętych założeń: maksymalnie o około 0,57 jednostki dla przypadku nadsystemu z systemem technicznym o szeregową strukturze niezawodnościowej) niż przyrost jednorazowego kosztu c_{dw} .

Zgodnie z wynikami badań, opisanymi w rozdziale 6, także w przypadku modelu nadsystemu z wieloelementowym systemem technicznym, w badanym zakresie analizy numerycznej okazuje się, że zmiany:

- jednostkowego kosztu wymiany elementu pracującego c_w ,
- jednostkowego kosztu obsługi zamówienia c_o ,
- jednostkowego kosztu zakupu c_p ,
- jednorazowego kosztu kary k_f w wyniku pojawienia się każdorazowej niezdatności nadsystemu,

nie mają większego wpływu na całkowite koszty funkcjonowania nadsystemu w porównaniu do wpływu kosztów utrzymania zapasów (C_h) lub całkowitych kosztów niezdatności nadsystemu (C_{dw}) (Zał. III).

10. WERYFIKACJA MODELU SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO Z ZALEŻNOŚCIĄ CZASOWĄ

Opracowanie modelu nadsystemu z rezerwą czasową wymaga weryfikacji formalnej na podstawie danych rzeczywistych, uzyskanych z procesu funkcjonowania wybranego rzeczywistego systemu technicznego.

W procesie oceny zgodności modelowych i rzeczywistych wyników eksploatacyjnych wykorzystano dane uzyskane od Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego we Wrocławiu, obejmujące zapis realizowanych zadań eksploatacji taboru kolejowego sieci tramwajowej z okresu: od 21. września 2001r. do 28. lutego 2002r. (z wyłączeniem dnia 01. listopada 2001r.). Uzyskane dane obejmują zapis wszelkich zdarzeń, związanych z procesem uszkodzania się pojazdów szynowych oraz ich odnowami, które zostały zapisane w książce dyspozytorskiej. Pozwala to na uzyskanie wszelkich niezbędnych charakterystyk niezawodnościowych, opisujących realizowany proces eksploatacji systemu.

10.1. Opis systemu rzeczywistego

Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne we Wrocławiu jest strategicznym wrocławskim przewoźnikiem, świadczącym usługi przewozu ludności na terenie miasta Wrocławia. Przewoźnik ten odpowiada za eksploatację zarówno sieci tramwajowej jak i autobusowej.

W analizowanym okresie czasu (przełom 2001/2002) system komunikacji tramwajowej we Wrocławiu obsługiwany był przez 22 linie dzienne (0-12, 14-17, 20-24), które rocznie pokonują 21 mln km. Jednocześnie eksploatowane były liniowo trzy typy tramwajów: Konstal 102Na, Konstal 105N, Konstal 105Na (wraz z ich modernizacjami). W godzinach szczytu ruch prowadzony był co 12 minut, co wymagało ekspediowania na trasy 205 pociągów [270].

Na początku lat 90. XX w. zaprzestano we Wrocławiu zakupu nowych wagonów. Aż do 2004 roku wykonywane były jedynie remonty i modernizacje.

Podczas eksploatacji systemu komunikacji miejskiej pojazdy uszkodzają się w losowych chwilach czasu. W efekcie wystąpienia uszkodzenia możliwe jest pojawienie się jednej z następujących konsekwencji:

- całkowite wyłączenie pojazdu z ruchu,
- opóźnienie,
- skierowanie objazdem,

co bezpośrednio przekłada się na wystąpienie negatywnych skutków dla pasażera [117].

W celu minimalizacji wspomnianych skutków zawodności wrocławskich tramwajów w systemie komunikacji miejskiej utrzymywane są dodatkowe tramwaje pełniące funkcję rezerwy: biernej (pojazdy gotowe do uruchomienia, pozostające bez obsługi) lub czynnej (pojazdy z obsługą, gotowe do włączenia do ruchu bez zbędnej zwłoki) [117].

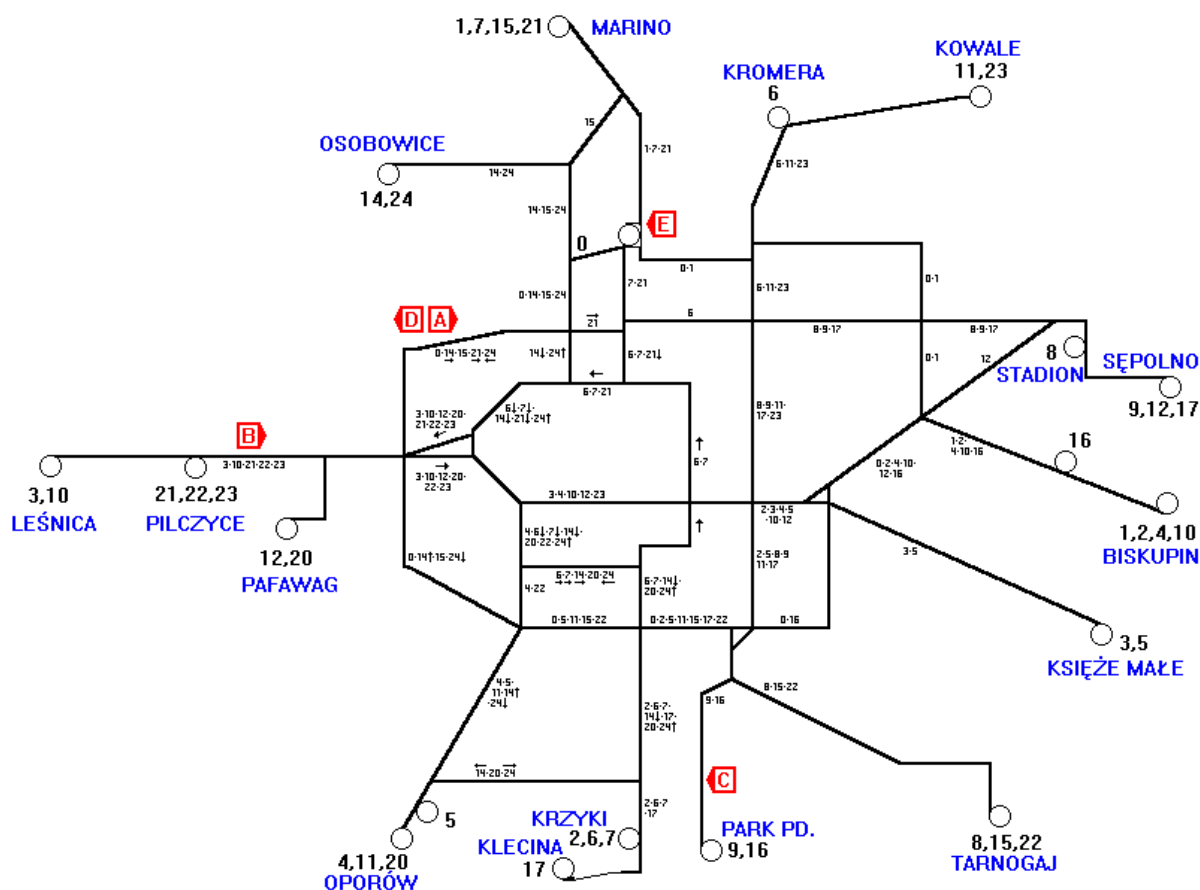
Przy wyłączeniu pojazdu z ruchu w zamian na trasę zostaje wysłany tramwaj rezerwowy, o czym decyduje dyspozytor ruchu (każde takie zdarzenie jest odnotowane w książce dyspozytorskiej). Podstawowym kryterium wyboru pojazdu rezerwowego, który ma być uruchomiony jest czas zastąpienia pociągu wycofywanego. Ponadto, brane są pod uwagę [117]:

- obowiązujący czas dyżuru pojazdów rezerwowych,
- zabezpieczenie systemu przed dalszymi zdarzeniami (np. decyzja o przegrupowaniu pozostających wolnych rezerw w celu minimalizacji czasu dojazdu do zastępowanych linii).

Po usunięciu uszkodzenia, tramwaj powraca na linię trasy, zwalniając rezerwę. Czasy dojazdu pojazdu rezerwowego z miejsca postoju na trasę oraz czasy naprawy uszkodzonego tramwaju są zmiennymi losowymi. W związku z tym może wystąpić sytuacja, w której liczba tramwajów rezerwowych nie wystarcza na pokrycie wszystkich kursów.

Funkcjonowanie rezerw czynnych na terenie miasta Wrocławia zostało uruchomione w latach 90. XX w. W dniu roboczym ich liczba powinna wynosić: 5 pojazdów, natomiast w dni wolne – pracują 3 pojazdy rezerwowe. Typowe rozmieszczenie pojazdów rezerwowych na sieci transportowej przedstawiono na rysunku 10.1.1. Rezerwy zostały oznaczone literami A, B, C, D, E [117].

Jednocześnie przyjęto, że długość rezerwy czasowej systemu komunikacji przeznaczonej na przywrócenie uszkodzonego pojazdu do stanu zdatności i powrót na trasę obejmuje minimalny czas trwania jednego kursu linii dziennej. Przekroczenie danego czasu niezdatności pojedynczej linii, równoznaczne jest z koniecznością poniesienia przez MPK Wrocław kary finansowej, wynikającej z umowy z Zarządem Dróg i Komunikacji we Wrocławiu. Dodatkowe informacje dotyczące procesu eksploatacji systemu komunikacji zamieszczone zostały w tabeli 10.1.1.



Rys. 10.1.1. Rozmieszczenie rezerw w dniu roboczym w roku 2002 [117]

Tabela 10.1.1. Charakterystyki systemu eksploatacji pojazdów tramwajowych MPK Wrocław

Okres:	21.09.2001r. ÷ 28.02.2002r.	
	Dni robocze	Dni wolne
Liczba pojazdów rezerwowych	5	3
Okres rezerwy czasowej: minimalny	41 [min]	
maksymalny	101 [min]	
Czas pracy pojazdów rezerwowych	4.30 – 20.00	
	5.00 – 20.30	5.00 – 22.30
	5.30 – 22.30	6.00 – 23.00
	6.00 – 23.00	6.30 – 0.00
	6.30 – 0.00	
Strefy czasowe	przed 6.00	
	6.00 – 8.00	przed 6.00
	8.00 – 13.00	6.00 – 9.00
	13.00 – 17.00	9.00 – 20.00
	17.00 – 20.00	20.00 – 22.30
	20.00 – 22.30	po 22.30
po 22.30		

Podstawowym zagadnieniem, z punktu widzenia gotowości systemu, jest ustalenie liczebności pojazdów rezerwowych. Zbyt mała ich liczba skutkuje m.in. dużą liczbą niewykonanych kursów. Z kolei zbyt duża liczba pojazdów rezerwowych niesie za sobą negatywne konsekwencje ekonomiczne.

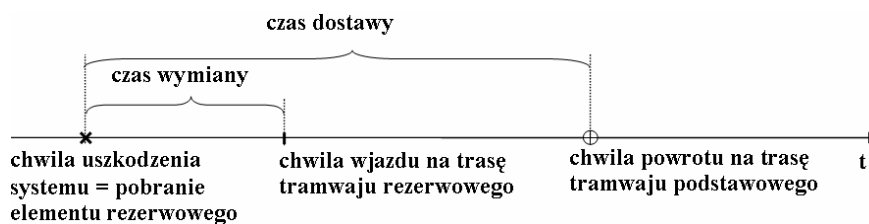
Z drugiej strony, istotnym zagadnieniem jest oszacowanie czasu tolerancji zakłóceń w systemie, mierzonego parametrem rezerwy czasowej. Zbyt długi czas rezerwy czasowej będzie bezpośrednio przekładał się na większą liczbę zakłóceń w systemie, co odczują przede wszystkim pasażerowie. Zbyt krótki, związany będzie bezpośrednio z wyższymi kosztami funkcjonowania systemu.

10.2. Analiza zgodności danych symulacyjnych i rzeczywistych

Obserwacja systemu komunikacji tramwajowej we Wrocławiu pozwoliła na zdefiniowanie czasu realizacji zadania logistycznego, który zależy od:

- czasu niezbędnego na podstawienie pojazdu zastępczego w wymagane miejsce,
- czasu ewentualnego braku wolnego pojazdu rezerwowego w systemie.

Czas niezbędny na podstawienie pojazdu rezerwowego w wymagane miejsce jest bezpośrednio uzależniony od miejsca jego postoju (rys. 10.1.1). Z kolei czas braku wolnego pojazdu rezerwowego w systemie bezpośrednio zależy od procesu uszkodzeń i odnow tramwajów pracujących w danym okresie na trasie. Opis zasad działania systemu komunikacji można zatem przedstawić odpowiednim modelem (rys. 10.2.1). W tym celu można wykorzystać opracowany model nadsystemu z rezerwą czasową, w którym system techniczny posiada strukturę progową ($k = M$).



Rys. 10.2.1. Proces eksploatacji taboru kolejowego systemu komunikacji miejskiej

W modelu wykorzystano strategię sterowania zapasami według stałego poziomu zamawiania (s, Q). W systemie rzeczywistym rolę zapasu stanowią pojazdy rezerwowe. W przypadku uszkodzenia się pojazdu zapas pomniejszany jest tak, aby pokryć zapotrzebowanie na trasie. W tej samej chwili rozpoczyna się oczekiwanie systemu na „nową dostawę tramwaju”, którą jest powrót pojazdu podstawowego na trasę po przywróceniu do stanu zdatności. W związku z tym, wielkość partii zamówienia $Q = 1$. Jednocześnie, każdorazowe

pobranie tramwaju rezerwowego uruchamia nowe „zamówienie”. Oznacza to, że czas oczekiwania na ponowne uzupełnienie tramwajów rezerwowych („dostawę”) trwa od chwili, gdy ich liczba zostaje zmniejszona o jeden pojazd. Zatem poziom zapasu alarmowego:

$$s = l_r - 1 \quad (10.1.1)$$

gdzie:

l_r – liczba pojazdów rezerwowych, utrzymywanych w systemie

Jednocześnie, dla celów modelowania procesu funkcjonowania rzeczywistego systemu należy zdefiniować jego podstawowe zmienne losowe: czasy między uszkodzeniami, czasy wymiany (czas od chwili uszkodzenia do chwili podstawienia tramwaju rezerwowego we właściwe miejsce), czasy dostawy (czas od chwili uszkodzenia do chwili powrotu tramwaju podstawowego na trasę) oraz czasy rezerwy czasowej (minimalny okres trwania jednego kursu linii dziennej).

Na podstawie uzyskanych ksiąg dyspozytorskich przeprowadzono badania systemu komunikacji tramwajowej w celu uzyskania niezbędnych danych, wymaganych w modelu. Jednocześnie, mając na względzie wysoką zmienność tras linii tramwajowych, związaną z realizacją licznych remontów w mieście, zdefiniowano okres badań.

Ponadto przyjęto założenie, że odnowa pojazdów w systemie jest perfekcyjna. Przyjęcie takiego założenia jest możliwe ze względu na fakt, że okres eksploatacji pojedynczego tramwaju jest długi (około 30 lat), oraz liczba pojazdów w sieci jest duża. W związku z tym, pojedyncza operacja odnowy nie wpływa znacząco na intensywność uszkodzeń w całym systemie.

Dla przedstawionych danych możliwa jest weryfikacja modelu symulacyjnego, która została przeprowadzona dla ośmiu przypadków, scharakteryzowanych w tabeli 10.2.1.

Tabela 10.2.1. Zestawienie przypadków analizowanych w procesie weryfikacji modelu symulacyjnego

Nr przypadku	Liczba rezerw	Chwila uszkodzenia systemu technicznego	Długość rezerwy czasowej
1	5	$t_{zgłoszenia}$	$\max(T_{kursu})$
2			$\min(T_{kursu})$
3		$\max(t_{zgłoszenia}, t_{zjazdu})$	$\max(T_{kursu})$
4			$\min(T_{kursu})$
5	3	$t_{zgłoszenia}$	$\max(T_{kursu})$
6			$\min(T_{kursu})$
7		$\max(t_{zgłoszenia}, t_{zjazdu})$	$\max(T_{kursu})$
8			$\min(T_{kursu})$

W procesie weryfikacji osobno przeanalizowano dni wolne (3 pojazdy rezerwowe) oraz dni robocze (5 pojazdów rezerwowych), co pozwoliło na wyróżnienie dwóch podstawowych przypadków. Jednocześnie, jako dodatkowe kryterium w procesie doboru wariantów rozwiązań, przyjęto chwilę traktowaną jako uszkodzenie elementu – równoznaczną z chwilą pojawienia się zapotrzebowania na pojazd rezerwowy. „Każde zgłaszane przez służbę ruchu zakłócenie charakteryzują dwa czasy: moment zgłoszenia oraz moment zaistnienia. Co ważne często te dwa czasy nie pokrywają się.” [117] Dlatego też, o zapotrzebowaniu na pojazd rezerwowy można mówić najwcześniej w chwili zgłoszenia uszkodzenia do dyspozytora ruchu ($t_{zgłoszenia}$), a najpóźniej w chwili zjazdu tramwaju z trasy (t_{zjazdu}), gdy uszkodzenie pozwoliło na kontynuację jazdy do chwili wymiany na tramwaj rezerwowy. Na tej podstawie dodatkowo wyróżniono dwa przypadki, w których chwilę uszkodzenia traktuje się jako:

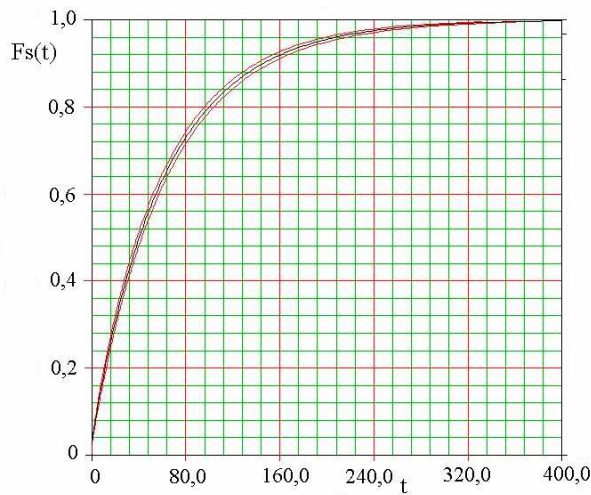
- chwilę zgłoszenia uszkodzenia do dyspozytora ruchu ($t_{zgłoszenia}$),
- chwilę późniejszą z dwóch: zgłoszenia uszkodzenia i rzeczywistego zjazdu pojazdu z trasy ($\max(t_{zgłoszenia}, t_{zjazdu})$).

Ostatnim kryterium, przyjętym w procesie definicji rozpatrywanych przypadków, jest długość rezerwy czasowej warunkująca chwilę pojawienia się uszkodzenia nadsystemu (chwilę, w której uznajemy że system komunikacji jest niezdatny), co wiąże się z koniecznością ponoszenia określonych konsekwencji ekonomicznych. Wyróżniono dwa graniczne przypadki, w których długość okresu dostępnej rezerwy czasowej jest tożsama z najkrótszym okresem czasu, niezbędnym na realizację kursu ($\min(T_{kursu})$) oraz najdłuższym okresem czasu, jaki zajmuje pokonanie kursu ($\max(T_{kursu})$) linii dziennej, funkcjonującej w analizowanym okresie czasu.

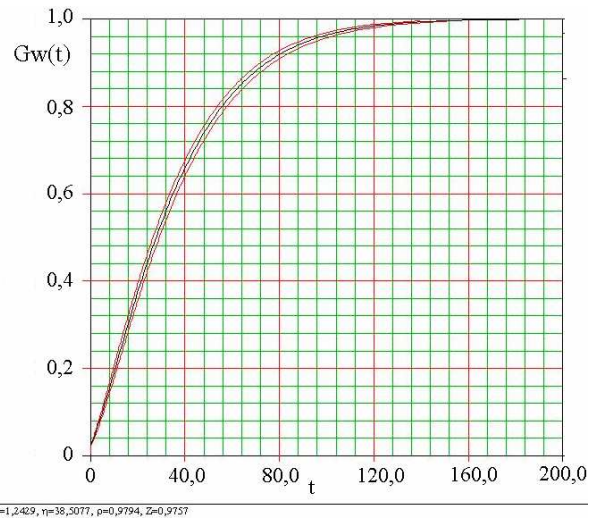
Na tej podstawie możliwe było oszacowanie parametrów rozkładów prawdopodobieństwa podstawowych zmiennych losowych, opisujących funkcjonowanie systemu komunikacji (tabela 10.2.2). W tym celu wykorzystano oprogramowanie *Weibull ++6*. Jednocześnie podstawowe funkcje rozkładów prawdopodobieństwa opisujących wybrane parametry wejściowe do modelu przedstawiono na rysunkach 10.2.2 – 10.2.5.

Tabela 10.2.2. Parametry rozkładów prawdopodobieństwa opisujących funkcjonowanie systemu MPK

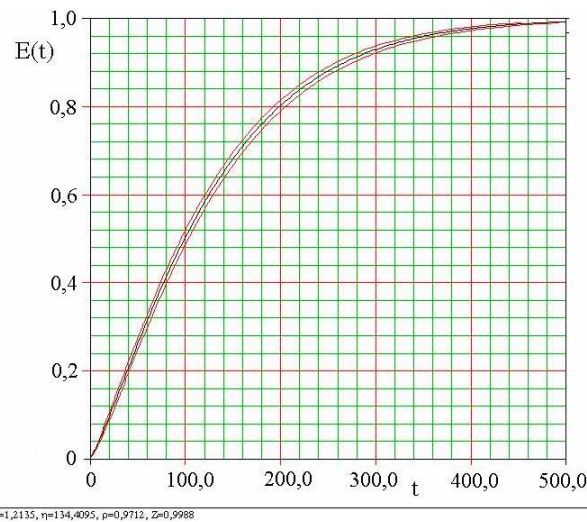
Nr przypadku	Parametry rozkładu					
	A_o	B_o	A_r	B_r	A_L	B_L
1 = 2	0,957	0,016195	1,2429	0,025969	1,2135	0,00744
3 = 4	0,9283	0,016409	1,2194	0,032321	1,2348	0,007792
5 = 6	0,9871	0,009589	1,3453	0,024141	1,232	0,008265
7 = 8	0,9394	0,010322	1,2139	0,028818	1,2546	0,008723



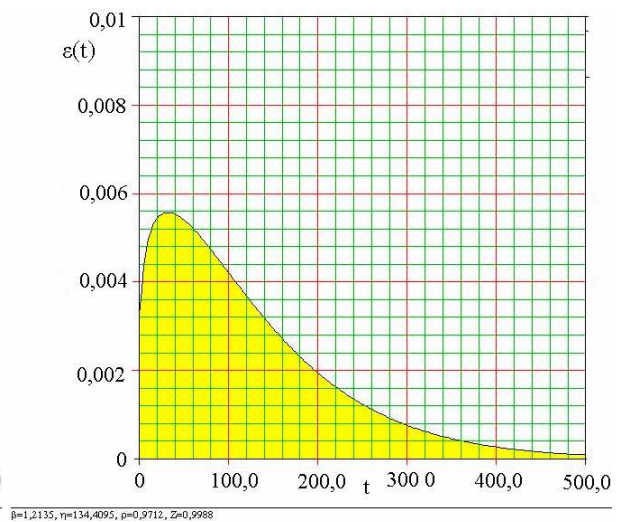
Rys. 10.2.2. Empiryczna funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu pomiędzy uszkodzeniami systemu technicznego (przypadek 1)



Rys. 10.2.3. Empiryczna funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu wymiany elementów systemu technicznego (przypadek 1)

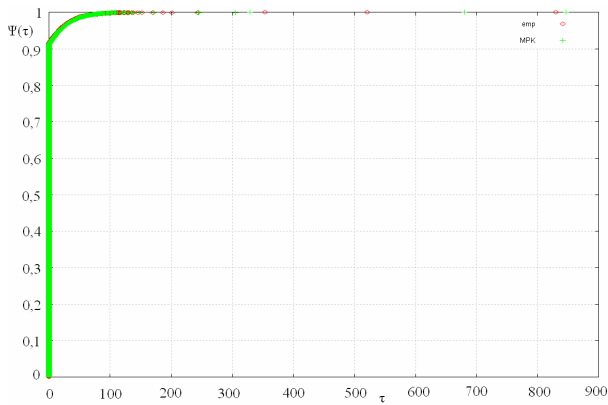


Rys. 10.2.4. Empiryczna funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji dostaw (przypadek 1)

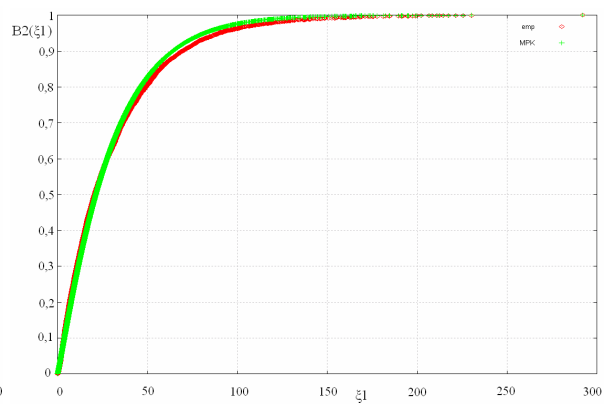


Rys. 10.2.5. Empiryczna funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu realizacji dostaw (przypadek 1)

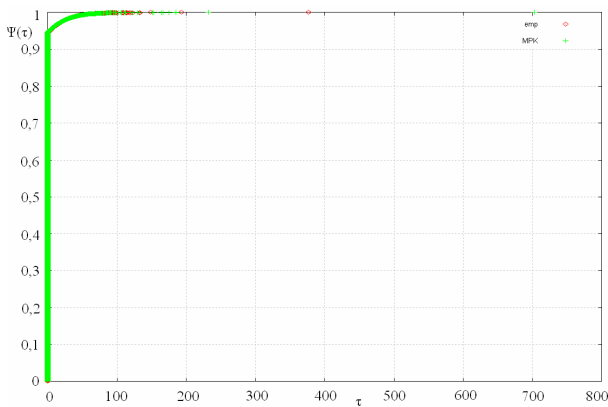
Na wykresach 10.2.6 – 10.2.13 dla wybranych przypadków przedstawione zostały symulacyjne oraz empiryczne dystrybuanty rozkładów prawdopodobieństwa czasu niezdatności systemu logistycznego $\Psi(\tau)$ oraz czasu niezdatności nadsystemu $B_2(\xi_1)$.



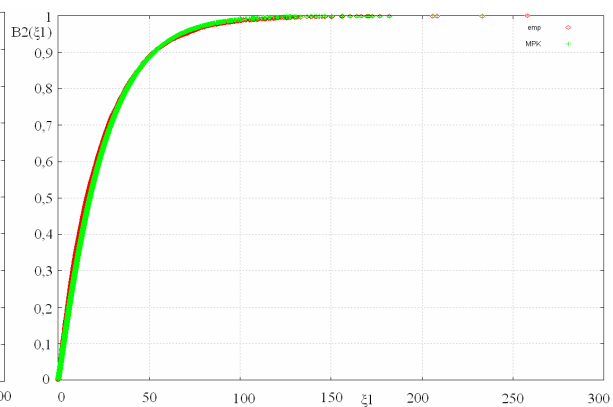
Rys. 10.2.6. Empiryczna i symulacyjna funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu braku elementów wymiennych (przypadek 1)



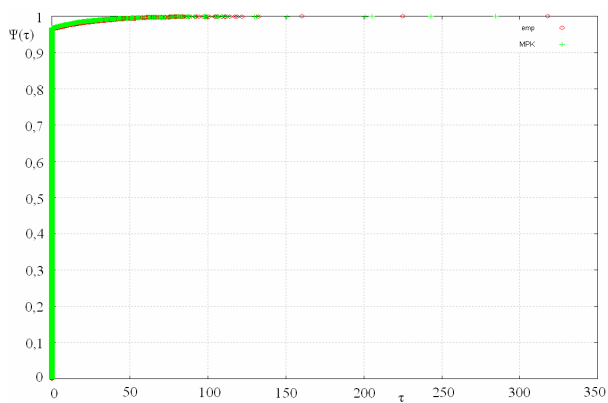
Rys. 10.2.7. Empiryczna i symulacyjna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu (przypadek 1)



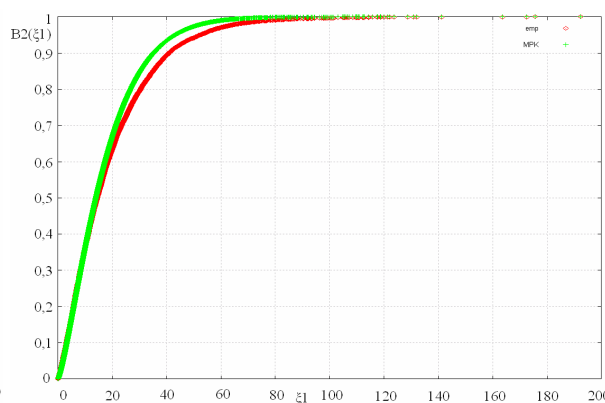
Rys. 10.2.8. Empiryczna i symulacyjna funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu braku elementów wymiennych (przypadek 3)



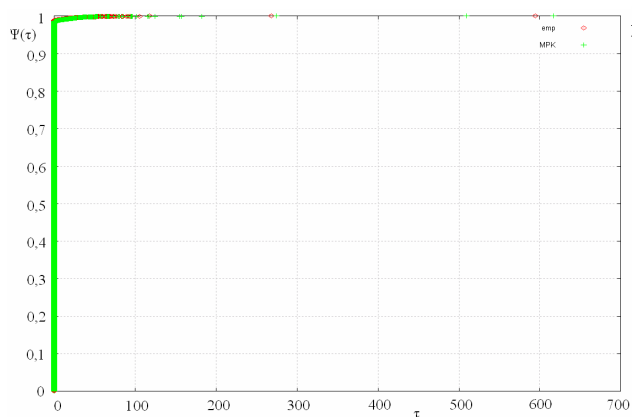
Rys. 10.2.9. Empiryczna i symulacyjna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu (przypadek 3)



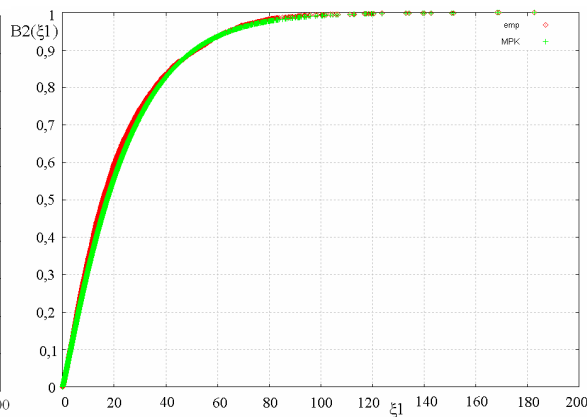
Rys. 10.2.10. Empiryczna i symulacyjna funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu braku elementów wymiennych (przypadek 5)



Rys. 10.2.11. Empiryczna i symulacyjna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu (przypadek 5)



Rys. 10.2.12. Empiryczna i symulacyjna funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu braku elementów wymiennych (przypadek 7)



Rys. 10.2.13. Empiryczna i symulacyjna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu (przypadek 7)

Analizując przedstawione wyniki należy pamiętać o szeregu przyjętych uproszczeń w procesie modelowania. Po pierwsze, model symulacyjny nie uwzględnia czynnika ludzkiego w procesie decyzyjnym dotyczącym funkcjonowania nadsystemu. Sieć tramwajowa jest układem przestrzennym, w którym tramwaje rezerwowe oczekują na włączenie się do ruchu w różnych punktach miasta (patrz rys. 10.1.2). Z chwilą pojawienia się uszkodzenia w systemie, dyspozytor podejmuje decyzję z którego punktu pobrać rezerwę, aby czas wymiany (czas wjazdu tramwaju rezerwowego na trasę, mierzony od chwili pojawienia się uszkodzenia) był jak najkrótszy. Dopiero wraz z upływem elementów rezerwowych z zapasu można zauważyć, że system zaczyna zachowywać się zgodnie z kolejką FIFO, spełniając założenia przyjęte w modelu symulacyjnym.

Ponadto, analiza danych rzeczywistych wykazała, że tramwaj rezerwowy nie zawsze jest wysyłany na trasę w chwili pojawienia się uszkodzenia w systemie. Dyspozytor, znając przewidywany czas dostawy (czas powrotu tramwaju na trasę od chwili jego uszkodzenia) często podejmuje decyzję o nie wysyłaniu tramwaju rezerwowego. W takiej sytuacji pojawia się niezdatność systemu wynikająca z pozornego braku elementów wymiennych.

Tego rodzaju decyzje podejmowane są najczęściej dla przypadków krótkich opóźnień, kiedy uszkodzenie tramwaju może być szybko usunięte z systemu. Wraz ze wzrostem przewidywanego czasu dostawy system zaczyna zachowywać się zgodnie z przyjętym modelem.

Kolejny problem w gestii decyzji dyspozytora to kierowanie do wymiany pojazdów rezerwowych, które nadal pozostają w ruchu. W takim przypadku pojawia się opóźnienie chwili wymiany elementu uszkodzonego, również nie wynikające z braku elementów wymiennych w systemie.

Na potwierdzenie powyższych faktów warto przedstawić analizę rzeczywistych danych, uzyskanych z MPK. Fragment danych, obejmujący jeden dzień funkcjonowania nadsystemu, został przedstawiony w tabeli 10.2.3.

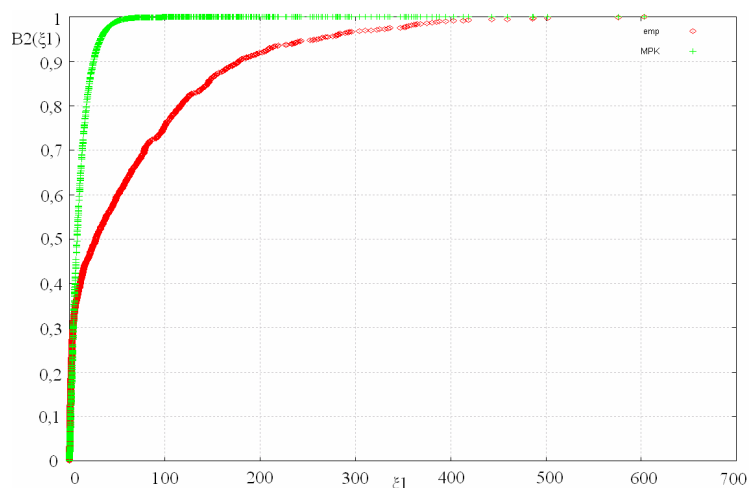
Tabela 10.2.3. Przykładowe dane rzeczywiste procesu eksploatacji systemu MPK (przypadek 1)

Data	<i>t</i> uszkodzenia	<i>t</i> wymiany	<i>t</i> dostawy	<i>t</i> zjazdu rezerwy	Nr rezerwy	<i>t</i> rezerwy	Liczba rezerw w chwili uszkodzenia	Czas braku elementu rezerwowego [min]	Czas niezdatności systemu technicznego [min]	Czas niezdatności nadsystemu [min]
2001-11-09	6,11	6,34	7,10	7,10	409	07,52	5			
2001-11-09	6,13	6,40	7,36	7,36	476	07,54	4			
2001-11-09	7,07		7,15			08,48	3			
2001-11-09	7,19		7,30			09,00	4			
2001-11-09	8,41	9,59	10,11		422	10,22	5			
2001-11-09	8,56		9,10			10,37	4			
2001-11-09	9,14		9,25			10,55	4			
2001-11-09	9,19		9,30			11,00	4			
2001-11-09	9,39		10,00	10,11	423	11,20	4			
2001-11-09	10,37	10,37	11,47	11,47	423	12,18	5			
2001-11-09	11,08		11,50			12,49	4			
2001-11-09	12,50	13,12	14,15	14,15	476	14,31	5			
2001-11-09	12,59	13,06	13,19	13,19	409	14,40	4			
2001-11-09	13,32	13,45	16,14	16,14	423	15,13	4			61
2001-11-09	13,48		14,05			15,29	3			
2001-11-09	13,49	13,50	14,44	14,44	472	15,30	3			
2001-11-09	14,02	15,09		19,00	422	15,43	2			
2001-11-09	14,09		14,20			15,50	1			
2001-11-09	14,18	14,57	17,58	15,35	409	15,59	2			119
2001-11-09	14,20	14,38	15,35	16,14	472	16,01	1			
2001-11-09	14,40	15,04	16,44	17,58	476	16,21	0	4		23
2001-11-09	15,30	16,02	18,36	18,47	409	17,11	0	5		85
2001-11-09	15,38		15,49			17,19	0			
2001-11-09	15,48		16,00			17,29	0			
2001-11-09	16,10		16,35			17,51	0			
2001-11-09	16,29		16,34			18,10	2			
2001-11-09	16,37	17,14		20,58	423	18,18	2			
2001-11-09	17,23	17,39	18,55	18,55	472	19,04	1			
2001-11-09	17,29		18,15			19,10	0			
2001-11-09	17,30	18,08	19,51	19,31	476	19,11	0	28		40
2001-11-09	17,55	19,39	19,50	19,50	472	19,36	-1	60	3	14
2001-11-09	18,12	18,39		20,31	409	19,53	-1			
2001-11-09	18,54	19,20		20,07	422	20,35	-1	6		
2001-11-09	19,12		19,30			20,53	0			
2001-11-09	21,30	22,14	23,04	23,04	472	23,11	5			

Kolorem niebieskim zaznaczono pojawienie się uszkodzenia systemu, dla którego dyspozytor podjął decyzję o wysłaniu tramwaju rezerwowego, który nadal był w ruchu. Jednocześnie istnieje rozbieżność zapisanych danych, w których chwila wymiany pojazdu uszkodzonego następuje przed zanotowaną chwilą wyłączenia z ruchu elementu rezerwowego poprzedzającego dane zgłoszenie uszkodzenia. Również zaprezentowane dane potwierdzają

częste nie podejmowanie decyzji przez dyspozytora o wymianie uszkodzonych elementów pomimo, że w systemie znajdują się elementy rezerwowe (kolor pomarańczowy).

Przedstawione fakty bezpośrednio wpływają na poziom zgodności przedstawionych dystrybuant rozkładów prawdopodobieństw czasów niezdatności. Przykładowo, przy uwzględnieniu czynnika ludzkiego w procesie decyzyjnym funkcjonowania systemu komunikacji miejskiej, na rysunku 10.2.14 przedstawiono symulacyjne oraz empiryczne dystrybuanty rozkładów prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu $B_2(\xi_1)$, dla przypadku 1.



Rys. 10.2.14. Empiryczna i symulacyjna dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu (przypadek 1)

Dla sprawdzenia podstawowych wyników modelowych i rzeczywistych, przedstawionych na rysunkach 10.2.6 – 10.2.13, zastosowano test zgodności λ -Kołmogorowa. Obliczone wartości statystyki λ przedstawiono w tabeli 10.2.4.

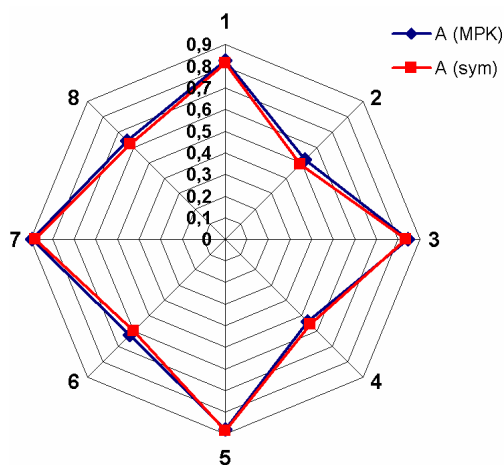
Tabela 10.2.4. Wyniki testu zgodności λ -Kołmogorowa

Hipoteza	λ_{obl}								λ ($\alpha_o = 0,01$)
	Przypadek								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
$\Psi(\tau)_{sym} = \Psi(\tau)_{MPK}$	0,93	1,01	0,98	1,13	1,21	1,12	0,95	0,95	1,63
$B_2(\xi_1)_{sym} = B_2(\xi_1)_{MPK}$	1,48	1,38	1,35	1,57	1,61	1,09	1,46	1,12	

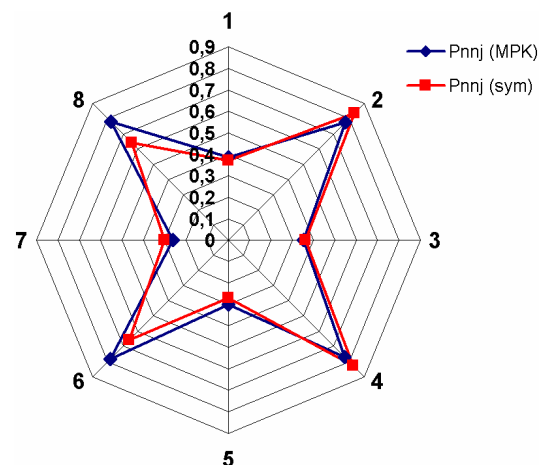
Na podstawie uzyskanych wyników nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładów prawdopodobieństw czasów niezdatności systemu wsparcia logistycznego i nadsystemu, uzyskanych z danych rzeczywistych oraz z symulacji, na poziomie istotności $\alpha_o = 0,01$.

Jednocześnie istotne jest porównanie podstawowych charakterystyk niezawodnościowych uzyskanych w procesie symulacji, jak również w procesie analizy funkcjonowania systemu rzeczywistego. Na rysunku 10.2.15 przedstawiono poziom współczynnika gotowości dla wszystkich analizowanych przypadków. Z kolei rysunek 10.2.16 ilustruje poziom prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w wyniku przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej.

Analizując poziom współczynnika gotowości nie zaobserwowano większych odchyleń pomiędzy wynikami rzeczywistymi, a wynikami uzyskanymi w procesie symulacji. Potwierdza to poziom obliczonego błędu względnego, który nie przekracza 6,5% dla wszystkich analizowanych przypadków. Z kolei wpływ czynnika ludzkiego w procesie funkcjonowania systemu komunikacji miejskiej przekłada się na uzyskane wyniki prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu.



Rys. 10.2.15. Empiryczny i symulacyjny współczynnik gotowości nadsystemu dla analizowanych przypadków

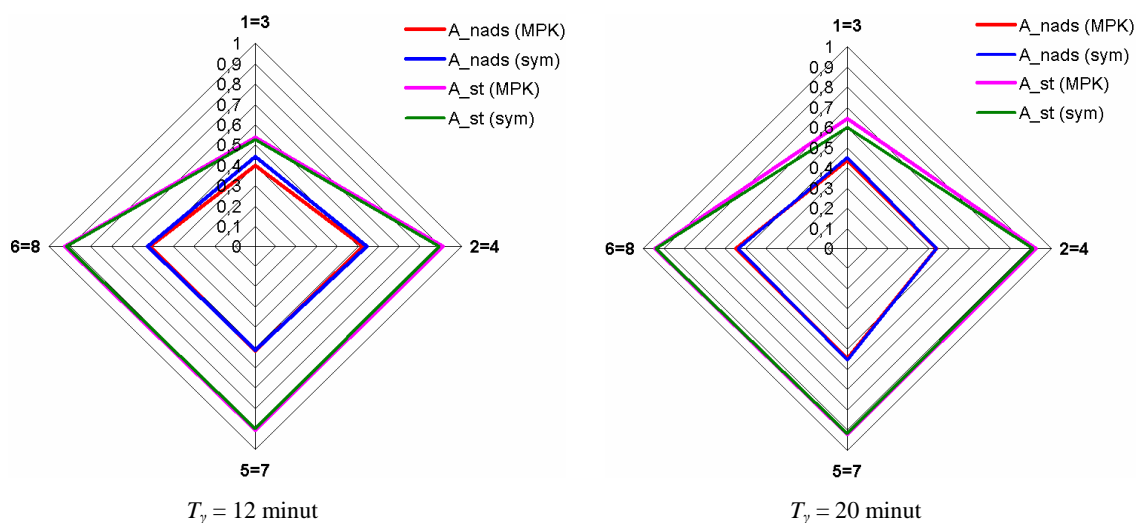


Rys. 10.2.16. Empiryczne i symulacyjne prawdopodobieństwo niezdatności nadsystemu dla analizowanych przypadków

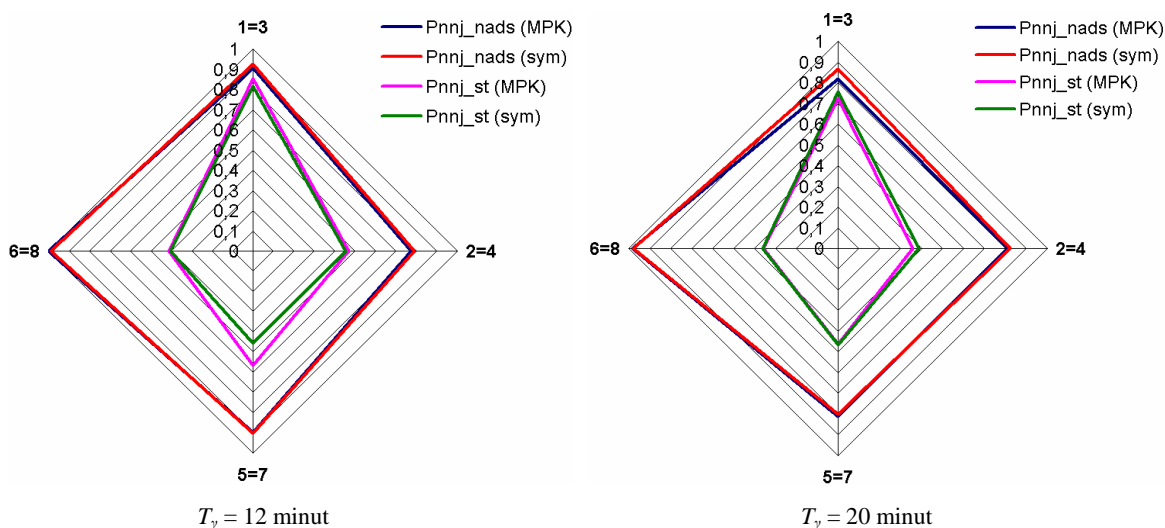
Jednocześnie, przyjęty w procesie modelowania okres rezerwy czasowej jest niezmienny bez względu na typ linii, na której pojawiło się uszkodzenie. Z jednej strony jest to przyjęte uproszczenie modelu. Z drugiej, pojawia się pytanie o poziom negatywnych konsekwencji dla pasażera, pojawiających się w wyniku uszkodzenia się systemu.

Z punktu widzenia pasażera istotne jest kiedy przyjedzie tramwaj, jednocześnie nie ma znaczenia czy będzie to tramwaj rezerwowy czy też regularnie kursujący na danej linii. W praktyce, zgodnie z przyjętymi założeniami, tramwaj uważa się za opóźniony jeżeli przyjedzie przed następnym pociągiem tej samej linii bez względu na wielkość opóźnienia. Biorąc pod uwagę strefy czasowe kursowania pociągów, w godzinach szczytu ruch prowadzony jest co 12 minut, z kolei w strefie „W0” (przed 6.00) ruch prowadzi się co 20

min. Dlatego też istotne jest zbadanie poziomu charakterystyk niezawodnościowych dla danych dwóch skrajnych przypadków długości rezerwy czasowej (rys. 10.2.17 – 10.2.18).



Rys. 10.2.17. Empiryczny i symulacyjny wskaźnik gotowości nadsystemu oraz gotowości systemu technicznego (czas wymiany krótszy od rezerwy) dla wybranych długości rezerwy czasowej



Rys. 10.2.18. Empiryczne i symulacyjne prawdopodobieństwo przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej przez: czas przywrócenia zdadności nadsystemu (Pnnj_nads) oraz czas wymiany systemu technicznego (Pnnj_st) dla wybranych długości rezerwy czasowej

W pierwszym kroku zbadano poziom prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w wyniku przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej. Zgodnie z przedstawionymi wynikami można zaobserwować, że skrócenie długości rezerwy czasowej do nakrótszego okresu znacznie obniża wyniki niezawodnościowe nadsystemu. Przykładowo dla przypadków 6 i 8 istnieje prawie 100% prawdopodobieństwo pojawienia się niezdatności nadsystemu w wyniku pojawienia się uszkodzenia tramwaju.

Z drugiej strony, należy zbadać poziom prawdopodobieństwa przekroczenia przez czas wymiany systemu dostępnej rezerwy czasowej, który ma bezpośrednie przełożenie na poziom

prawdopodobieństwa, że pasażer będzie oczekiwał na tramwaj dłużej, niż wynika to z rozkładu jazdy (A_{st} , $P_{nnj_{st}}$).

Poziom obliczonych błędów względnych dla badanych wyników nie przekracza 8%.

Z punktu widzenia analizowanego w pracy zagadnienia, istotna jest możliwość wyznaczenia prawdopodobieństw niezdatności nadsystemu i systemu technicznego, wynikających z przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej. Wykazano, że taka zależność istnieje. Jednocześnie zaobserwowano, że słabą stroną procesu modelowania jest brak właściwego dopasowania rozkładów prawdopodobieństw dla parametrów wejściowych modelu, co wiąże się z m.in. z poziomem wiarygodności i kompletności danych rzeczywistych (patrz tabela 10.2.3). Z drugiej strony uproszczenie modelu, nie uwzględniające czynnika ludzkiego i jego wpływu na podejmowane decyzje w procesie eksploatacji systemu komunikacji miejskiej, również przyczynia się do powstania rozbieżności uzyskanych wyników.

Podsumowując, opracowany model nadsystemu z zależnością czasową dobrze odwzorowuje funkcjonowanie rzeczywistego systemu eksploatacji, przy uwzględnieniu wcześniej omówionych zastrzeżeń.

11. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W każdym systemie wsparcia logistycznego, funkcjonującym w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, należy uwzględnić zawodność jego elementów wykonawczych, która może doprowadzić do braku możliwości realizacji zdania logistycznego i w efekcie może przełożyć się na obniżenie gotowości systemu wspieranego. Złożoność i istotność analizowanego zagadnienia potwierdza analiza ponad czterdziestoletniego dorobku literaturowego z badanego obszaru wiedzy.

W dostępnej literaturze obszaru teorii niezawodności można znaleźć prace, dotyczące zagadnienia modelowania i oceny niezawodności systemów logistycznych projektowanych dla wsparcia obiektów/systemów technicznych. Opracowane modele są przede wszystkim ograniczone do analizy procesu zaopatrzenia systemu technicznego w niezbędne części wymienne (np. [33, 34]), przy uwzględnieniu problemu zapewnienia niezbędnej liczby stanowisk obsługi/ekip remontowych (np. [92, 207, 257, 260]).

Podsumowanie dostępnej literatury obszarów: modelowania optymalnych parametrów strategii obsługi, modelowania logistycznego wsparcia funkcjonowania systemów technicznych, oraz modelowania niezawodności systemów z rezerwą czasową pozwoliło na zdefiniowanie celu pracy.

Podstawowym celem pracy było opracowanie modelu wsparcia logistycznego systemu eksploatacji w aspekcie niezawodności obu systemów oraz nadsystemu. Cel ten został zrealizowany poprzez realizację następujących zadań cząstkowych:

- określenie podstawowych definicji związanych z modelem wsparcia logistycznego systemu eksploatacji (niezawodność systemów, system z rezerwą czasową);
- przyjęcie założeń teoretycznych opisujących modelowany nadsystem z rezerwą czasową;
- opracowanie analitycznego oraz symulacyjnego modelu nadsystemu z rezerwą czasową;
- przeprowadzenie analizy wrażliwości modelu na zmienne parametry procesu zaopatrzenia i procesu eksploatacji systemu technicznego oraz na zmianę długości okresu rezerwy czasowej;
- proces weryfikacji modelu symulacyjnego w oparciu o badania rzeczywistego systemu eksploatacji.

Przedstawiony w pracy model może być wykorzystany w procesie analizy różnego rodzaju zagadnień obejmujących problem modelowania wsparcia logistycznego procesów eksploatacji systemów technicznych. Opracowany model pozwala m.in. na:

- dobór najlepszych parametrów systemu wsparcia logistycznego (parametry procesu zaopatrzenia systemu technicznego w części wymienne), przy znanych wymaganiach

niezawodnościowych i ograniczeniach ekonomicznych realizowanego procesu podstawowego (np. dobór dostawcy ze względu na spełniane kryteria niezawodnościowe procesu dostaw, dobór poziomu zapasu alarmowego oraz wielkości partii zamówienia pozwalających na zapewnienie gotowości systemu wsparcia logistycznego);

- ocenę czy funkcjonujący system wsparcia logistycznego pozwala na zapewnienie wymagań eksploatacyjnych systemu podstawowego;
- dobór najlepszych parametrów rezerwy czasowej, gdy znane są parametry procesów funkcjonowania nadsystemu;
- ocenę wyników eksploatacji systemu rzeczywistego, gdy parametry realizowanych procesów są znane.

Podsumowując, opracowanie modelu systemu wsparcia logistycznego z zależnością czasową pozwala na zdefiniowanie następujących wniosków:

- badanie wpływu parametrów rezerwy czasowej na wyniki eksploatacyjne nadsystemu pozwala zauważyć dużą ich zależność od długości oczekiwanego okresu rezerwy czasowej, bez względu na rozpatrywany typ struktury niezawodnościowej systemu technicznego, funkcjonującego w nadsystemie. W zależności od poziomu wymagań niezawodnościowych i ekonomicznych można sterować długością czasu rezerwy czasowej dla założonych charakterystyk funkcjonowania systemu technicznego oraz organizacji systemu wsparcia logistycznego;
- niezdatność badanego nadsystemu z jednej strony zależy od długości realizacji zadania logistycznego przez system wspierający (τ), na którą wpływ ma okres braku elementów rezerwowych, z drugiej strony uzależniona jest od losowego okresu wymiany elementów uszkodzonych systemu technicznego (T_r). W związku z tym, działania mające na celu poprawę wyników eksploatacyjnych nadsystemu powinny być nakierowane na minimalizację czasu realizacji zadania logistycznego poprzez dobór parametrów polityki zaopatrzenia oraz na skrócenie czasu odnowy systemu podstawowego (parametr o ograniczonej możliwości sterowania);
- badanie wrażliwości modelu nadsystemu z rezerwą czasową na zmianę parametrów polityki zaopatrzenia (wielkość partii zamówienia Q oraz poziom zapasów s) wykazało ich znaczący wpływ na wszystkie wyniki, uzyskiwane podczas symulacyjnego procesu funkcjonowania nadsystemu. Dobór najlepszych poziomów omawianych parametrów zależy z jednej strony od cech niezawodnościowych systemu technicznego (np. struktura niezawodnościowa systemu), oraz parametrów rezerwy czasowej (wydłużenie okresu dostępnej rezerwy czasowej oznacza większą tolerancję nadsystemu na zakłócenia w

procesie dostaw, co z kolei pozwala na obniżenie poziomu alarmowego s). Z drugiej strony zależy od uwarunkowań ekonomicznych funkcjonowania nadsystemu (większa partia zamówienia i wyższy poziom zamawiania s oznaczają wyższe koszty utrzymania zapasów (C_h), koszty zakupu (C_p) oraz niższe koszty obsługi zamówienia (C_o));

- analiza wrażliwości nadsystemu na zmianę oczekiwanego czasu wymian elementów uszkodzonych systemu technicznego także wykazuje dużą zależność pojawienia się niezdatności nadsystemu oraz skutków niezdatności od typu struktury niezawodnościowej systemu wspieranego. Jednocześnie pozwala na stwierdzenie, iż najbardziej ekonomiczne byłoby minimalizowanie liczby długich okresów niezdatności w nadsystemie na rzecz krótkotrwałych, co zmniejsza ryzyko przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej przez okres przywrócenia zdatności systemu technicznego;
- jednocześnie badania struktury całkowitych kosztów, jakie są ponoszone w procesie eksploatacji, wykazała, że przy przyjętych założeniach oraz poziomie parametrów modelowanego nadsystemu, koszty utrzymania zapasów (C_h) oraz koszty niezdatności nadsystemu (C_{dw}) determinują wyniki ekonomiczne funkcjonowania nadsystemu. W związku z tym, istotna jest właściwa organizacja procesu zaopatrzenia (dobór parametrów Q i s), która pozwoli na osiągnięcie równowagi pomiędzy poziomem kosztów utrzymania zapasów a ekonomicznymi skutkami niezdatności nadsystemu.

Literatura:

- [1] Aarset M. V., Ulvestad E., Decision support for optimal logistics, *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1993
- [2] Abdel-Hameed M., Inspection, maintenance and replacement models, *Computers and Operation Research*, Vol. 22, No. 4, 1995
- [3] Agnihotri R. K., Satsangi S. K., Analysis of a two unit redundant system with optimum interchangement time, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 4, 1995
- [4] Agrafiotis G. K., Tsoukalas M. Z., Reliability analysis and optimization applications of a two-unit standby redundant system with spare units, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 34, No. 9, 1994
- [5] Ahn B., Watanabe N., Hiraki S., A mathematical model to minimize the inventory and transportation costs in the logistics systems, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 27, Issue 1-4, 1994
- [6] Al-Bahi A. M., Spare provisioning policy based on maximization of availability per cost ratio, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 24, No. 1, 1993
- [7] Alfredsson P., Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities, *European Journal of Operational Research*, 99, 1997
- [8] Amiri M., Ghassemi-Tari F., A methodology for analyzing the transient availability and survivability of a system with repairable components, *Applied Mathematics and Computation*, 184, 2007
- [9] Armstrong M. J., Age repair policies for the machine repair problem, *European Journal of Operational Research*, 138, 2002
- [10] Bajda A., Prażewska M., Koncepcja wyznaczania opóźnień logistycznych mobilnego systemu telekomunikacyjnego, *Materiały Międzynarodowej Konferencji Bezpieczeństwa i Niezawodności KONBiN'01*, Szczyrk, 2001
- [11] Barron Y., Frostig E., Levikson B., Analysis of r out of n systems with several repairmen, exponential life times and phase type repair times: an algorithmic approach, *European Journal of Operational Research*, 168, 2006
- [12] Basker B. A., Sensitivity analysis of availability of units in a production/electrical system, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 16, 1977
- [13] Bhat K. S., Gururajan M., A two-unit cold standby system with imperfect repair and excessive availability period, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 33, No. 4, 1993
- [14] Bhat K. S., Gururajan M., Nayak P., A study of a 2-unit system with 'random breakdown' of the repair facility, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 28, No. 3, 1988
- [15] Biernat J., Ciesielski S., Piaseczny L., Problemy sterowania niezawodnością systemów w procesie eksploatacji, *Materiały VI Zimowej Szkoły Niezawodności Katowice 1977*, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice, 1977
- [16] Blanchard B. S., *Logistics engineering and management*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 2004
- [17] Blanchard B. S., Logistics Requirements: Established From The Beginning, *SOLETech*, Vol. 5.1, 2002
- [18] Blischke W. R., Prabhakar Murthy D. N., *Reliability: Modelling, Prediction and Optimization*, John Willey & Sons, Inc., New York, 2000
- [19] Brezavscek A., Hudoklin A., Joint optimization of block-replacement and periodic-review spare-provisioning policy, *IEEE Transactions of Reliability*, Vol., 52, No. 1, 2003

- [20] Bridgman M. S., Mount-Campbell C. A., Determining the number of spares in an inventory/repair system which supports equipment with scheduled usage, *International Journal of Production Economics*, 30-31, 1993
- [21] Bukowski L. A., Wpływ nadmiaru informacyjnego na niezawodność zautomatyzowanych systemów produkcyjnych, *Materiały XXXII Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk 2004*, Wyd. ITeE, Radom, 2004
- [22] Bukowski L. A., Prognozowanie niezawodności i bezpieczeństwa systemów zautomatyzowanych, *Materiały XXXI Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2003*, Wyd. ITeE, Radom, 2003
- [23] Bukowski L., Bukowski M., Systemowa analiza ryzyka w eksperckich metodach oceny niezawodności systemów, *Materiały XXVIII Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2000*, Wyd. ITeE, Radom, 2000
- [24] Bundschuh M., Klabjan D & Thurston D. L., *Modeling robust and reliable supply chains*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003
- [25] Buyukkurt M. D., Parlar M., A comparison of allocation policies in a two-echelon repairable-item inventory model, *International Journal of Production Economics*, 29, 1993
- [26] Caban D, Maciejewski H., Time redundancy in a transportation logistics system, *Advances in Safety & Reliability. Kotowrocki K. (ed.)*, Leiden: Taylor and Francis, 2005
- [27] Caban D., Maciejewski H., Niezawodność systemów ze skumulowaną rezerwą czasową, *Materiały XXXI Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2004*, Wyd. ITeE, Radom, 2004
- [28] Cao J., Reliability analysis of M/G/1 queuing system with repairable service station of reliability series structure, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 34, No. 4, 1994
- [29] Cao J., Yanhong W., Reliability analysis of a two-unit cold standby system with a replaceable repair facility, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 27, No. 2, 1989
- [30] Castro I. T., Sanjuan E. L., Optimal maintenance policies for repairable systems with repair facilities not always available, *Risk, reliability and societal safety. Eds Terje Aven, Jan Erik Vinnen*, Leiden: Taylor and Francis, 2007a
- [31] Castro I. T., Sanjuan E. L., An optimal repair policy for systems with a limited number of repairs, *European Journal of Operational Research*, Vol. 187, Issue 1, 2007b
- [32] Castro I. T., Alfa A. S., Lifetime replacement policy in discrete time for a single unit system, *Reliability Engineering and System Safety*, 84, 2004
- [33] Catuneanu V. M., Moldovan C., Popentiu Fl., Gheorghiu M., Optimum system availability and spare allocation, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 28, No. 3, 1988
- [34] Chaberek M., *Makro- i mikroekonomiczne aspekty wsparcia logistycznego*, Wyd. U.G. Gdańsk, 2002
- [35] Chaberek M. (red.), *Modelowanie procesów i systemów logistycznych*. Cz. 1, Wyd. UG, Gdańsk, 2001
- [36] Chelbi A., Ait-Kadi D., Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjected to random failure, *International Journal of Production Economics*, 74, 2001
- [37] Chen Y., Ray S., Song Y., Optimal pricing and inventory control policy in periodic-review systems with fixed ordering cost and lost sales, *Naval Research Logistics*, Vol. 53, 2006
- [38] Cheung K. L., Hausman W. H., A multiechelon inventory model with multiple failures, *Naval Research Logistics*, Vol. 40, 1993
- [39] Cho I., D., Parlar M., A survey of maintenance models for multi-unit systems, *European Journal of Operational Research*, 51, 1991

- [40] Christensen A., Voytek R. S. J., A data base management (DBMP) program for Integrated Logistics Support (ILS), *Microelectronics and Reliability*, Vol. 14, 1975
- [41] Chrzanowski M., Laskowski D., Prognozowanie zapotrzebowania części zapasowych w sieciach LAN, *Materiały XXXI Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2003*, Wyd. ITeE, Radom, 2003
- [42] Chung W. K., Reliability analysis of a series system with repair, *Microelectronics Reliability*, Vol. 31, No. 2/3, 1991
- [43] Cochran J. K., Lewis T. P., Computing small-fleet aircraft availabilities including redundancy and spares, *Computers and Operations Research*, 29, 2002
- [44] Coughlin R. J., Optimization of spares in a maintenance scenario, *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1984
- [45] Crossley W. A., *System of systems: an introduction of Purdue University Schools of Engineering Signature Area*, dostępne na stronie: <http://esd.mit.edu/symposium/pdfs/papers/crossley.pdf> (29.11.2006)
- [46] Dekker R., Applications of maintenance optimization models: A review and analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, 51, 1996
- [47] De La Cruz A. M. L., Veeke H. P. M., Lodewijks G., Prognostics in the control of logistics systems, *Proceedings of SOLI'06 Conference: Service Operations and Logistics, and Informatics*, 2006
- [48] *Designing and Assessing Supportability in DoD weapon systems: A Guide to Increased Reliability and Reduced Logistics Footprint*, Department of Defense, Washington, D.C., 2003
- [49] De Smidt-Destombes K. S., van der Heijden M. C., van Harten A., Availability of k-out-of-n systems under block replacement sharing limited spares and repair capacity, *International Journal of Production Economics*, 107, 2007
- [50] De Smidt-Destombes K. S., van der Heijden M. C., van Harten A., On the interaction between maintenance, spare part inventories and repair capacity for a k-out-of-n system with wear-out, *European Journal of Operational Research*, 174, 2006
- [51] De Smidt-Destombes K. S., van der Heijden M. C., van Harten A., On the availability of a k-out-of-n system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy, *Reliability Engineering and System Safety*, 83, 2004
- [52] Dey S., Sarmah P., Estimation of parameters of a model of a complex repairable system, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 4, 1997
- [53] Dhakar T. S., Schmidt Ch. P., Miller D. M., Base stock level determination for high cost low demand critical repairable spares, *Computers and Operations Research*, Vol., 21, No. 4, 1994
- [54] Diaz A., Fu M. C., Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity, *European Journal of Operational Research*, 97, 1997
- [55] Diaz A., Fu M. C., *Multi-echelon models for repairable items: a review*, Working Paper, University of Maryland, 1995
- [56] Diks E. B., de Kok A. G., Optimal control of a divergent multi-echelon inventory system, *European Journal of Operational Research*, 111, 1998
- [57] Diks E. B., de Kok A. G., Lagodimos A. G., Multi-echelon systems: A service measure perspective, *European Journal of Operational Research*, 95, 1996
- [58] Dimitri G-G., Shimon S., Ljubisa P., Resource supportability simulation model for a man-machine production system, *Mathematics and Computers in Simulation*, 53, 2000

- [59] *DoD Guide for Achieving Reliability, Availability and Maintainability*, Department of Defense, Washington, D.C., 2005
- [60] Dohi T., Ashioka A., Kaio N., Osaki S., The optimal repair-time limit replacement policy with imperfect repair: Lorenz Transform approach, *Mathematical and Computer Modelling*, 38, 2003
- [61] Dohi T., Kaio N., Osaki S., On the optimal ordering policies in maintenance theory – survey and applications, *Applied Stochastic Models and Data Analysis*, 14, 1998
- [62] Dohi T., Osaki S., Kaio N., Optimal planned maintenance with salvage cost for a two-unit standby redundant system, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 36, No. 10, 1996
- [63] *DSP Strategy for Supporting and Promoting Logistics Readiness: Interoperability and Logistics Readiness*, ITP, 2001
- [64] Feliks J., Majewska K., Wspomaganie logistyki eksploatacji przez obsługiwane aktywne, *Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej*. PAN(4), 2007. Oficyna Wyd. TEXT, Kraków, 2007
- [65] Fidelis E., Firkowicz S., Grzesiak K., Kołodziejcki J., Wiśniewski K., *Matematyczne podstawy oceny niezawodności*, PWN, Warszawa, 1966
- [66] Frees E. W., Optimizing costs of age replacement policies, *Stochastic Processes and their Applications*, 21, 1986
- [67] Frostig E., Levikson B., On the availability of r out of n repairable systems, *Naval Research Logistics*, Vol. 49, 2002
- [68] Frostig E., Jointly optimal allocation of a repairman and optimal control of service rate for machine repairman problem, *European Journal of Operational Research*, 116, 1999
- [69] Funaki K., Yoshimoto K., Distribution of total uptime during a given Time interval, *IEEE Transactions of Reliability*, Vol. 43, No. 3, 1994
- [70] Garg R., Busy period analysis of a two-unit warm standby system with imperfect switch, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 25., No. 4, 1985
- [71] Garliński B., *Metody kształtowania zapasów*, PWE, Warszawa, 1971
- [72] Gharbi A., Kenne J-P., Beit M., Optimal safety stocks and preventive maintenance periods in unreliable manufacturing systems, *International Journal of Production Economics*, 107, 2007
- [73] Gniedenko B. W., Bielajew J. K., Sołowjew A. D., *Modele matematyczne w teorii niezawodności*, WNT, Warszawa, 1968
- [74] Goel L. R., Mumtaz S. Z., Analysis of a two server-two unit cold standby system with correlated failures and repairs, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 34, No. 4, 1994
- [75] Goel L. R., Shrivastava P., A single unit man-machine system with varying physical conditions of the repairman, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 32, No. 3, 1992
- [76] Goel L. R., Rana V. S., Gupta R., Stochastic analysis of a computer system model with intelligent terminals and two types of failure, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 31, No. 6, 1991a
- [77] Goel L. R., Sharma S. C., Stochastic analysis of a two-unit deteriorating standby system with two switching devices, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 31, No. 2/3, 1991b
- [78] Goel G. D., Murari K., Two-unit cold-standby redundant system subject to random checking, corrective maintenance and system replacement with repairable and non-repairable types of failures, *Microelectronic Reliability*, Vol. 30, No. 4, 1990a
- [79] Goel L. R., Gupta R., Shrivastava P., Profit analysis of a two-unit cold standby system with varying physical conditions of the repairman, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 30, No. 4, 1990b

- [80] Goel L. R., Sharma S. C., Stochastic analysis of a two unit priority standby system with two switching devices, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 26, No. 6, 1986a
- [81] Goel L. R., Sharma S. C., Stochastic analysis of a two unit standby system with two switching devices, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 26, No. 5, 1986b
- [82] Goel L. R., Sharma S. C., Stochastic analysis of a two unit standby system with two switching devices and sliding preventive maintenance, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 26, No. 6, 1986c
- [83] Goel L. R., Sharma G. C., Gupta P., Reliability analysis of a system with preventive maintenance, inspection and two types of repair, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 26, No. 3, 1986d
- [84] Goel L. R., Sharma G. C., Gupta P., Stochastic behaviour and profit function of a system with precautionary measures under abnormal weather, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 25, No. 4, 1985
- [85] Goel L. R., Gupta R., Gupta P., Analysis of a two-unit hot standby system with three modes, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 23, No. 6, 1983a
- [86] Goel L. R., Gupta R., Multi-standby system with repair and replacement policy, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 23, No. 5, 1983b
- [87] Gopalan M. N., Kumar U. D., Probabilistic analysis of a n-unit cold-standby system with general failure and repair time distributions, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 5, 1995
- [88] Gopalan M. N., Venkateswarlu P., A reliability physics model for one-unit and two-unit standby systems with single repair facility, *Reliability Engineering*, 14, 1986
- [89] Gopalan M. N., Venkateswarlu P., A reliability physics model for dissimilar two-unit standby systems with single repair facility, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 25, No. 1, 1985
- [90] Gopalan M. N., Saxena R., Stochastic behavior of a 2-unit system with 1-server subject to delayed maintenance, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 17, 1978
- [91] Gopalan M. N., Venkatakrishnan K. S., Reliability analysis of a series system with a standby and a repair facility, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 12, 1973
- [92] Gross P., Pinkus C. E., Designing a support system for repairable items, *Computer & Operations Research*, Vol. 6, 1979
- [93] Guan J., Wu Y., Repairable consecutive-k-out-of-n:F system with fuzzy states, *Fuzzy Sets and Systems*, 157, 2006
- [94] Guide Jr V. D. R., Srivastava R., Repairable inventory theory: Models and applications, *European Journal of Operational Research*, 102, 1997
- [95] Guo T., Cao J., Reliability analysis of a two-unit redundant system with a replaceable repair facility, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 32, No. 9, 1992
- [96] Gupta R., Mumtaz S. Z., Goel R., A two dissimilar unit multi-component system with correlated failures and repairs, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 5, 1997
- [97] Gupta R., Bajaj C. P., Sinha S. M, Cost-benefit analysis of a multi-component standby system with inspection and slow switch, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 26, No. 5, 1986a
- [98] Gupta R., Cost-benefit analysis of a one-server two-unit standby system subject to imperfect switching device, random inspection and k-failure modes, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 26, No. 1, 1986b
- [99] Gupta P. P., Sharma R. K., Cost analysis of a three-state repairable redundant complex system under various modes of failures, *Microelectron and Reliability*, Vol. 26, No. 1, 1986c
- [100] Gupta P. P., Kumar A., Cost analysis of a three-state parallel redundant complex system, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 25, No. 6, 1985

- [101] Gupta S. M., Jaiswal N. K., Goel L. R., Reliability analysis of a two-unit cold standby redundant system with two operating modes, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 22, No. 4, 1982
- [102] Gurov S. V., Utkin L. V., Shubinsky I. B., Optimal reliability allocation of redundant units and repair facilities by arbitrary failure and repair distributions, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 12, 1995a
- [103] Gurov S. V., Utkin L. V., The time-dependent availability of repairable m-out-of-n and cold standby systems by arbitrary distributions and repair facilities, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 11, 1995b
- [104] Gururajan M., Srinivasan B., A complex two-unit system with random breakdown of repair facility, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 2, 1995
- [105] Hagmark P. E., Pernu H., Risk evaluation of a spare part stock by stochastic simulation, *Safety and reliability for managing risk. Eds C. G. Soares, E. Zio*, Leiden: Taylor and Francis, 2006
- [106] Haque L., Armstrong M. J., A survey of the machine interference problem, *European Journal of Operational research*, 179, 2007
- [107] Hsieh Y-Ch., Wang K-H., Reliability of a repairable system with spares and a removable repairman, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 2, 1995
- [108] Huang Ch-Y., Lo J-H., Optimal resource allocation for cost and reliability of modular software systems in the testing phase, *The Journal of Systems and Software*, 79, 2006
- [109] Inderfur K., Safety stocks in multistage divergent inventory systems: a survey, *International Journal of Production Economics*, 35, 1994
- [110] Ito K., Nakagawa T., Optimal inspection policies for a storage system with degradation at periodic tests, *Mathematical and Computer Modelling*, 31, 2000
- [111] Ito K., Nakagawa T., An optimal inspection policy for a storage system with high reliability, *Microelectronics Reliability*, Vol. 36, No. 6, 1995a
- [112] Ito K., Nakagawa T., Nishi K., Extended optimal inspection policies for a system in storage, *Mathematical and Computer Modelling*, 22, 1995b
- [113] Ito K., Nakagawa T., Optimal inspection policies for a system in storage, *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 24, No. 1/2, 1992
- [114] Itoi T., Nishida T., Kodama M., Ohi F., N-unit parallel redundant system with correlated failure and single repair facility, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 17, 1978
- [115] Jain M., Maheshwari R. S., N-policy for a machine repair system with spares and renegeing, *Applied Mathematical Modelling*, 28, 2004
- [116] Jeske D. R., Estimating the cumulative Downtime distribution of a highly reliable component, *IEEE Transactions of Reliability*, Vol. 45, No. 3, 1996
- [117] Jodejko A., Molecki B., Metoda określania liczby pojazdów rezerwowych na przykładzie wrocławskiej sieci tramwajowej. *Transport Miejski i Regionalny*, nr 1, 2008
- [118] Jodejko A., *Model procesu zaopatrzenia systemu technicznego w elementy wymienne z uwzględnieniem skutków niezdatności systemu technicznego*, Praca doktorska (nie publikowana), Politechnika Wrocławska, 2006
- [119] Kadziński A., Tomaszewski F., Niezawodnościowy i kosztowy model funkcjonowania systemu pojazdów, *Materiały Międzynarodowej Konferencji Bezpieczeństwa i Niezawodności KONBiN'01*, Szczyrk, 2001

- [120] Kalpakam S., Hameed M. A. S., Natarajan R., A priority multi-component system with spares, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 27, No. 1, 1987
- [121] Kan Ch., Wenyi W., Approximations of a two-unit cold standby system's reliability behavior, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 36, No. 5, 1996
- [122] Kaplan A., Orr D., An optimum multiechelon repair policy and stockage model, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 32, 1985
- [123] Kapur P. K., Garg R. B., Optimal number of minimal repairs before replacement with repair cost limit, *Reliability Engineering and System Safety*, 26, 1989
- [124] Ke J-Ch., Chu Y-K., Comparative analysis of availability for a redundant repairable system, *Applied Mathematics and Computation*, 188, No. 1, 2007
- [125] Kenne J-P., Gharbi A., Beit M., Age-dependent production planning and maintenance strategies in unreliable manufacturing systems with lost sale, *European Journal of Operational Research*, 178, 2007
- [126] Kennedy W. J., Patterson J. W., Fredendall L. D., An overview of recent literature on spare parts inventories, *International Journal of Production Economics*, 76, 2002
- [127] Kim J-S., Kim T-Y., Hur S., An algorithm for repairable item inventory system with depot spares and general repair time distribution, *Applied Mathematical Modelling*, 31, 2007
- [128] Kim J-S., Shin K-Ch., Yu H-K., Optimal algorithm to determine the spare inventory level for a repairable-item inventory system, *Computers and Operations Research*, Vol. 23, No. 3, 1996
- [129] Kodama M., Sawa I., Reliability and maintainability of a multicomponent series-parallel system with simultaneous failure and repair priorities, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 24, No. 1, 1984
- [130] Kodama M., Sawa I., Reliability and maintainability of a multicomponent series-parallel system under several repair disciplines, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 22, No. 6, 1982
- [131] Kopociński B., Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa, 1973
- [132] Korugan A., Gupta S. M., A multi-echelon inventory system with returns, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 35, No. 1-2, 1998
- [133] Koźniewska I., Włodarczyk M., *Modele odnowy, niezawodności i masowej obsługi*, PWN, Warszawa, 1978
- [134] Kubica F., Ogólne zasady planowania części wymiennych, *Materiały VI Zimowej Szkoły Niezawodności Katowice 1977*, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice, 1977
- [135] Kumar U. D., Knezevic J., Availability based spare optimization using renewal process, *Reliability Engineering and System Safety*, 59, 1998
- [136] Kumar U. D., Gopalan M. N., Analysis of consecutive k-out-of-n:F systems with single repair facility, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 4, 1997
- [137] Lam Y., A maintenance model for two-unit redundant system, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 3, 1997
- [138] Langer Y., System with time-redundancy, *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2001
- [139] Lau H. Ch., Song H., See Ch. T., Cheng S. Y., Evaluation of time varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation, *European Journal of Operational Research*, 170, 2006
- [140] Lau H. Ch., Song H., Evaluation of time-varying availability in multi-echelon inventory system under combat damage, *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, Edmonton, 2005

- [141] Lewandowski J., Bartczak M., Wybrane problemy logistyczne w eksploatacji obiektów technicznych, *Materiały XXII Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 1994*, Wyd. ITeE, Radom, 1994
- [142] Lewitowicz J., Ryzyko w logistyce, *Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej*. PAN (3), 2006. Oficyna Wyd. TEXT, Kraków, 2006
- [143] LG102T4: *Materiel Readiness Metrics*, Logistics Management Institute, 2003
- [144] Lisnianski A., Jeager A., Time-redundant system reliability under randomly constrained time resources, *Reliability Engineering and System Safety*, 70, 2000a
- [145] Lisnianski A., Levitin G., Ben-Haim H., Structure optimization of multi-state system with time redundancy, *Reliability Engineering and System Safety*, 67, 2000b
- [146] Love Ch. E., Purchase/replacement rules for decaying service facilities, *Computers and Operational Research*, Vol. 4, 1977
- [147] Mabini M. C. Pintelon L. M., Gelders L. F., EOQ type formulations for controlling repairable inventories, *International Journal of Production Economics*, 28, 1992
- [148] Maciejewski H., Caban D., Analiza gwarantowanej dostępności usług z uwzględnieniem rezerwy czasowej, *Materiały XXXI Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2004*, Wyd. ITeE, Radom, 2004
- [149] Magiera J., Młynarski S., Prognozowanie niezawodności w aspekcie planowania części zamiennych w eksploatacji pojazdów, *Materiały XXX Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2003*, Wyd. ITeE, Radom, 2003
- [150] Mahmoud M. A. W., El-Din M. M. M., Moshref M. E-S., Reliability analysis of a two-unit cold standby system with inspection, replacement, proviso of rest, two types of repair and preparation time, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 7, 1995
- [151] Marcinkowski J., *Rozkłady prawdopodobieństwa przydatne w rozwiązywaniu problemów transportu*, Wyd. PWr., Wrocław, 1997
- [152] Martinez E. C., Storage reliability with periodic test, *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1984
- [153] Matta K. F., A simulation model for repairable items/spare parts inventory systems, *Computers and Operations Research*, Vol. 12, No. 4, 1985
- [154] Mazur T., Łopuszyński B., Modele programowania zapasów części zamiennych w wielopoziomowych systemach zaopatrywania, *Materiały VI Zimowej Szkoły Niezawodności Katowice 1977*, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice, 1977
- [155] Mehrez A., Kaspi M., Gitlitz O., An investigation of a simple logistic model, *International Journal of Production Economics*, 29, 1993
- [156] Mehrez A., Stulman A., Age replacement in the presence of inventory constraints, *European Journal of Operational Research*, 12, 1983
- [157] Migdalski J. (red), *Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne*, Wyd. WEMA, Warszawa, 1982
- [158] Migdalski J., Niezawodność, trwałość i zapotrzebowanie na części zamienne systemów o elementach zależnych, *Materiały VI Zimowej Szkoły Niezawodności Katowice 1977*, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice, 1977
- [159] MIL-HDBK-502: *Defense Handbook: Acquisition Logistics*, Department of Defense, Washington, D.C., 1997
- [160] Mokhles N. A., Saleh E. H., Reliability analysis of a k-out-of-n:F repairable system with dependent units, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 28, No. 4, 1988

- [161] Mokaddis G. S., Tawfek M. L., Elhssia S. A. M., Cost analysis of a two dissimilar-unit cold standby redundant system subject to inspection and two types of repair, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 2, 1997
- [162] Mokaddis G. S., Tawfek M. L., Stochastic analysis of a two-dissimilar unit warm standby redundant system with two types of repair facilities, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 12, 1995
- [163] Mokaddis G. S., Elias S. S., The reliability function and the availability of a duplication redundant system with a single service facility for preventive maintenance and repair, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 29, No. 5, 1989
- [164] Mokaddis G. S., Elias S. S., Labib S. W., Probabilistic analysis of a two-unit system with a warm standby subject to preventive maintenance and a single service facility, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 27, No. 2, 1987
- [165] Montoro Cazorla D., Reres-Ocon R., Replacement times and costs in a degrading system with several types of failure: the case of phase-type holding times, *European Journal of Operational Research*, 175, 2006
- [166] Murari K., Goyal V., Cost analysis of a two-unit warm standby reliability system with two types of repair facilities, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 25, No. 4, 1985
- [167] Murari K., Goyal V., Comparison of two unit cold standby reliability models with three types of repair facilities, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 24, No. 1, 1984
- [168] Murari K., Goyal V., Reliability system with two types of repair facilities, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 23, No. 6, 1983
- [169] Murari K., Marathachalam C., 2-unit standby system with proviso for rest and maximum rest, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 21, No. 4, 1981
- [170] Myrefelt S., The reliability and availability of heating, ventilation and air conditioning systems, *Energy and Buildings*, 36, 2004
- [171] Nahmias S., Approximation techniques for several stochastic inventory model, *Computer and Operations Research*, Vol. 8, No. 3, 1981
- [172] Nakagawa T., A summary of discrete replacement policies, *European Journal of Operational Research*, 17, 1984
- [173] Nakagawa T., Osaki S., Stochastic behaviour of two-unit paralleled redundant systems with repair maintenance, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 14, 1975
- [174] Nasser S. M., Software reliability, *Proceedings of VIII Annual Conference on Computers and Industrial Engineering*, Orlando Florida, 1986
- [175] NAVSOP-3690: *Acquisition Logistics for the Rest of Us*, RD & A, Department of the Navy, Washington, D.C., 2001
- [176] Nicolai R. P., Dekker R., A review of multi-component maintenance models, *Risk, reliability and societal safety. Es T. Aven, J. E. Vinnem*, Leiden: Taylor and Francis, 2007
- [177] Nicolai R. P., Dekker R., *Optimal maintenance of multi-component systems: a review*, Economic Institute Report, 2006
- [178] Nikolov A. V., Reliability analysis of a series-parallel system under different repair disciplines, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 26, No. 5, 1986a
- [179] Nikolov A. V., Reliability of a complex system under pre-emptive repeat discipline, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 26, No. 5, 1986b

- [180] Nikolov A. N., N-unit parallel redundant system with multiple correlated failures, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 26, No. 1, 1986c
- [181] Noh J., Kang S.-J., Feldman R. M., A control policy for replacement involving two machines and one repairman, *European Journal of Operational Research*, 56, 1992
- [182] Nowakowski T., Werbińska S., Maintenance modelling concepts – state of art, (w przygotowaniu)
- [183] Nowakowski T., Problemy oceny niezawodności systemu logistycznego, *Materiały XXXV Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2007*, ITeE, Radom, 2007a
- [184] Nowakowski T., Werbińska S., Zagadnienie oceny gotowości systemu logistycznego, *Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej*. PAN (4), 2007, Oficyna Wyd. TEXT, Kraków, 2007b (2006b!!!)
- [185] Nowakowski T., Analysis of possibilities of logistics system reliability assessment, *Safety and reliability for managing risk*. Eds C. G. Soares, E. Zio, Leiden: Taylor and Francis, 2006
- [186] Nowakowski T., Modele niepewności informacji eksploatacyjnych, *Materiały Międzynarodowej Konferencji Bezpieczeństwa i Niezawodności KONBiN'99*, Szczyrk, 1999
- [187] Nowakowski T., Problemy wykorzystania nadmiaru informacyjnego do podwyższenia niezawodności maszyn, *Materiały XXIII Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 1995*, Wyd. ITeE, Radom, 1995
- [188] OPNAV Instruction 3000.12A: *Operational availability of equipments and weapons systems*, Department of the Navy, Washington D.C., 2003
- [189] Pandey D. K., Tyagi S. K., Jacob M., Profit evaluation of a two-unit system with internal and external repairs, inspection and post repair, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 2, 1995
- [190] Pandey D. K., Gupta S. M., Analysis of two-unit-standby redundant system with administrative delay in repair, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 25, No. 5, 1985
- [191] Park Y. T., Park K. S., Optimal stocking for replacement with minimal repair, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 25, No. 1, 1985
- [192] Perez-Ocon R., Montoro-Cazorla D., A multiple warm standby system with operational and repair times following phase-type distributions, *European Journal of Operational Research*, 169, 2006
- [193] Perez-Ocon R., Montoro-Cazorla D., A multiple system governed by a quasi-birth-and-death process, *Reliability Engineering and System Safety*, 84, 2004
- [194] Petkova V. T., Yuan L., Ion R. A., Sander P. C., Designing reliability information flows, *Reliability Engineering and System Safety*, 88, 2005
- [195] Pham H., Wang H., Imperfect maintenance, *European Journal of Operational Research*, 94, 1996
- [196] Pierskalla W., P., Voelker J., A., A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems, *Naval Research Logistics Quarterly* 23, 1976
- [197] PN-N-50191:1993 *Słownik terminologiczny elektryki - Niezawodność, jakość usługi*
- [198] Przystupa F. W., Diagnostics of “UUU...” type Situations in Systems, *SYSTEMS Journal of Transdisciplinary Systems Science*, Vol. 12, No. 3, 2007
- [199] Przystupa F. W., Monitoring of Information Disturbances in Logistic Systems, *SYSTEMS Journal of Transdisciplinary Systems Science*, Vol. 10, No. 2, 2005
- [200] Pyke D. F., Priority repair and dispatch policies for repairable-item logistics systems, *Naval Research Logistics*, Vol. 37, 1990
- [201] Radziejowska G., Organizacja Transportu w systemie logistycznym przedsiębiorstwa, *Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej*. PAN (3), 2006, Oficyna Wyd. TEXT, Kraków, 2006

- [202] Rajamanickam S. P., Chandrasekar B., Reliability measures for two-unit systems with a dependent structure for failure and repair times, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 5, 1997
- [203] Rakoczy A., Żółtowski J., O zagadnieniach określania zasad odnowy obiektu technicznego, *Materiały VI Zimowej Szkoły Niezawodności Katowice 1977*, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice, 1977
- [204] Redmer A., Sawicki P., Żak J., Ustalanie optymalnego harmonogramu wymiany pojazdów w przedsiębiorstwach transportowych, *Materiały konferencyjne IX Kongresu Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Krynica, 23-25 września 2001*, Vol. 2, s.191-202
- [205] Roca J. L., An approach in the life cycle cost of Integrated Logistic Support, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 27, No. 1, 1987
- [206] Sandve K., Aven T., Cost optimal replacement of monotone, repairable systems, *European Journal of Operational Research*, 116, 1999
- [207] Sarkar J., Li F., Limiting average availability of a system supported by several spares and several repair facilities, *Statistics & Probability Letters*, 76, 2006
- [208] Sarker R., Haque A., Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation, *Applied Mathematical Modelling*, 24, 2000
- [209] Sauser B., System of Systems: Do We Need a Definition of Definitions?, *Proceedings of Conference: System of Systems Engineering: Definitions, Challenges & Methods*, 2005
- [210] Scarf P. A., On the application of mathematical models in maintenance, *European Journal of Operational Research*, 99, 1997
- [211] Schneeweis W. G., Mean time to finish a randomly disturbed 2-phase mission, *IEEE Transactions of Reliability*, Vol. 44, No. 2, 1995
- [212] Scudder G. D., Chua R. Ch., Determining overtime policies for a repair shop, *International Journal of Management Science*, Vol. 15, No. 3, 1987
- [213] Scudder G. D., An evaluation of overtime policies for a repair shop, *Journal of Operations Management*, Vol. 6, No. 1, 1985
- [214] Sen P. K., Statistical analysis of some reliability models: Parametrics, semi-parametrics and nonparametrics, *Journal of Statistical Planning and Interference*, 43, 1995
- [215] Sharma U., Misra K. B., Optimal availability design of a maintained system, *Reliability Engineering and System Safety*, 20, 1988
- [216] Sherif Y., S, Reliability analysis: Optimal inspection & maintenance schedules of failing equipment, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 22, No. 1, 1982
- [217] Shetty B. N., Sekhon G. S., Chawla O. P., Kurien K. C., Optimization of maintenance facility for a repairable system subject to availability constraint, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 28, No. 6, 1988
- [218] Sheu S-H., Extended block replacement policy with used item and general random minimal repair cost, *European Journal of Operational Research*, 79, 1994
- [219] Sheu S-H., Liou Ch-T., Tseng B-Ch., Optimal ordering policies and optimal number of minimal repairs before replacement, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 32, No. 7, 1992
- [220] Shibuya T., Dohi T., Osaki S., Optimal continuous review policies for spare part provisioning with random lead times, *International Journal of Production Economics*, 55, 1998
- [221] Shtub A., Simon M., Determination of reorder points for spare parts in a two-echelon inventory system: the case of non identical maintenance facilities, *European Journal of Operational Research*, 73, 1994

- [222] Singh S. K., Shukla S., Shukla A., Cost-benefit analysis of a system with inspection, replacement and two types of repair, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 28, No. 3, 1988
- [223] Sleptchenko A., van der Heiden M. C., van Harten A., Using repair priorities to reduce stock investment in spare part networks, *European Journal of Operational Research*, 163, 2005
- [224] Sleptchenko A., van der Heiden M. C., van Harten A., Effects of finite repair capacity in multi-echelon, multi-indenture service part supply systems, *International Journal of Production Economics*, 79, 2002
- [225] Smalko Z., Geneza problematyki odnawiania obiektów technicznych w aspekcie ich niezawodności, *Materiały VI Zimowej Szkoły Niezawodności Katowice 1977*, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice, 1977
- [226] Smith Ch. H., Schaefer M. K., Optimal inventories for repairable redundant systems with aging components, *Journal of Operations Management*, Vol. 5, No. 3, 1985
- [227] Sołowjew A. D., *Analityczne metody w teorii niezawodności*, WNT, Warszawa, 1983
- [228] Song S., Deng Y., Reliability analysis of a three-unit system in a changing environment, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 33, No. 5, 1993
- [229] Sridharan V., Mohanavadivu P., Stochastic behaviour of a two-unit standby system with two types of repairmen and patience time, *Mathematical Computer Modelling*, Vol. 28, No. 9, 1998
- [230] Sridharan V., Mohanavadivu P., A note on the cost analysis of an n-unit system with spares, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 5, 1997a
- [231] Sridharan V., Mohanavadivu P., Optimum interchangement time for a two-dissimilar-unit with two types of repairman, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 4, 1997b
- [232] Sridharan V., A note on ordering policies with cost of observation and lead times, *International Journal of Production Economics*, 32, 1993
- [233] Srinivasan S. K., Analysis of a two-unit parallel redundancy with an imperfect switch, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 23, No. 2, 1983
- [234] Subramanian R., Sarma Y. V. S., Two-unit Standby systems with non-instantaneous switchover and imperfect switch, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 27, No. 2, 1987
- [235] Subramanian R., Natarajan R., An n-unit standby redundant system with r repair facilities and preventive maintenance, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 22, No. 3, 1982
- [236] Thomas M. U., Supply chain reliability for contingency operations, *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2002
- [237] Thomas L. C., A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems, *Reliability Engineering*, 16, 1986
- [238] Thomas L. C., Osaki S., An optimal ordering policy for a spare unit with lead time, *European Journal of Operational Research*, 2, 1978
- [239] Tuteja R. K., Malik S. C., A system with pre-inspection and two types of repairman, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 54, No. 2, 1994
- [240] Tuteja R. K., Taneja G., Cost-benefit analysis of a two-server, two-unit, warm standby system with different types of failure, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 32, No. 10, 1992a
- [241] Tuteja R. K., Malik S. C., Reliability and profit analysis of two single-unit models with three modes and different repair policies of repairmen who appear and disappear randomly, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 32, No. 3, 1992b
- [242] Twaróg J., *Mierniki i wskaźniki logistyczne*, ILiM, Poznań, 2003

- [243] Tylicki H., Różycki J., Niektóre problemy redukcji nadmiarowości informacji w procesie diagnostycznym maszyn, *Materiały XXXII Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2004*, Wyd. ITeE, Radom, 2004
- [244] Ushakov I. A., *Handbook of reliability engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1994
- [245] Ushakumari P. V., Krishnamoorthy A., K-out-of-n system with repair: the max (N, T) policy, *Performance Evaluation*, 57, 2004
- [246] Valdez-Flores C., Feldman R., A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems, *Naval Research Logistics*, Vol. 36, 1989
- [247] van der Heijden M. C., Diks E. B., de Kok A.G., Stock allocation in general multi-echelon distribution systems with (R,S) order-out-to-policies, *International Journal of Production Economics*, 49, 1997
- [248] van der Laan E., Dekker R., Salomon M., Ridder A., An (s,Q) inventory model with remanufacturing and disposal, *International Journal of Production Economics*, 46-47, 1996
- [249] Vanderperre E. J., Makhanov S. S., Long-run availability of a priority system: a numerical approach, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2005, Issue 1, 2005
- [250] Vanderperre E. J., Long-run availability of a two-unit standby system subjected to a priority rule, *Bulletin of the Belgian Mathematical Society*, 7, 2000
- [251] Vanderperre E. J., On the reliability of a cold standby system attended by a single repairman, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 12, 1995
- [252] Vaughan T. S., Failure replacement and preventive maintenance spare parts ordering policy, *European Journal of Operational Research*, 161, 2005
- [253] Vaurio J. K., Reliability characteristics of components and systems with tolerable repair times, *Reliability Engineering and System Safety*, 56, 1997
- [254] Venugopal N., Ahamed S. S., Reddy C. R., Optimal repair stage for k-out-of-n systems, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 29, No. 1, 1989
- [255] Vujosevic M., Petrovic R., Senborn A., Spare parts inventory planning for a redundant system subject to a phased mission, *Engineering Costs and Production Economics*, 19, 1990
- [256] Wang K-H., Dong W-L., Ke J-B., Comparison of reliability and the availability between four systems with warm standby components and standby switching failures, *Applied Mathematics and Computation*, 183, 2006
- [257] Wang N. Lu J. & Kram P., *Multi-scale spatial modelling for logistic system reliability*, Technical Report, The School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 2005
- [258] Wang H., A survey of maintenance policies of deteriorating systems, *European Journal of Operational Research*, 139, 2002
- [259] Wang H., Pham H., A survey of reliability and availability evaluation of complex networks using Monte Carlo techniques, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 2, 1997
- [260] Wang K-H., Sivazlian B. D., Reliability of a system with warm standbys and repairmen, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 29, No. 5, 1989
- [261] Wartenhorst P., N parallel queueing systems with server breakdown and repair, *European Journal of Operational Research*, 82, 1995
- [262] Ważyńska-Fiok K., Jaźwiński J., *Niezawodność systemów technicznych*, PWN, Warszawa, 1990
- [263] Werbińska S., Zagadnienie utrzymania gotowości systemu wsparcia logistycznego z zależnością czasową, *Materiały XXXVI Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk 2008*, Wyd. ITeE, Radom, 2008

- [264] Werbińska S., Interactions between logistic and operational system – an availability model, *Risk, reliability and societal safety*. Eds T. Aven, J. E. Vinnem, Leiden: Taylor and Francis, 2007a
- [265] Werbińska S., The availability model of logistic support system with time redundancy, *Eksploatacja i Niezawodność*, nr 3, 2007b
- [266] Werbińska S., Problems of designing logistic support system with time dependency, *SYSTEMS Journal of Transdisciplinary Systems Science*, Vol. 12, No. 2, 2007c
- [267] Werbińska S., Model niezawodności systemu wsparcia logistycznego, *Materiały Międzynarodowej Konferencji Total Logistics Management Zakopane 2007*, Zakopane 2007d
- [268] Werbińska S., Analiza stosowania technik intuicyjnych w prognozowaniu popytu na części zamienne marki Nashuatec, *Materiały XXXIV Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2006*, Wyd. ITeE, Radom, 2006
- [269] Werbińska S., *Analiza modelu niezawodności systemu systemów*, (przyjęty do druku w Zeszytach Naukowych AE w Katowicach)
- [270] www.mpk.wroc.pl (05.04.2008r.)
- [271] Yadavalli V. S. S., General Measures of a two-unit system, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 34, No. 7, 1994
- [272] Yam R. C. M., Zuo M. J., Zhang Y. L., A method for evaluation of reliability indices for repairable circular consecutive-k-out-of-n:F systems, *Reliability Engineering and System Safety*, 79, 2003
- [273] Yamada S., Osaki S., Reliability evaluation of a two-unit unrepairable system, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 20, 1980
- [274] Yanagi S., Aso K., Sasaki M., Optimal spare allocation problem based on the interval estimate of availability, *International Journal of Production Economics*, 24, 1992
- [275] Yanez J., Ortuno T., Vitoriano B., A simulation approach to reliability analysis of weapon systems, *European Journal of Operational Research*, 100, 1997
- [276] Yu H., Yalaoui F., Chatelet E., Chu Ch., Optimal design of a maintainable cold-standby system, *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 2007
- [277] Yun W. Y., Bai. D. S., Repair cost limit replacement policy under imperfect inspection, *Reliability Engineering and System Safety*, 23, 1988
- [278] Zamojski W. (red.), *Niezawodność i eksploatacja systemów*, Wyd. PWr., Wrocław, 1981
- [279] Zhang Y. L., Wang G. J., A deteriorating cold standby repairable system with priority in use, *European Journal of Operational Research*, 183, 2007
- [280] Zhang Y-H., Reliability analysis of an (n+1)-unit standby system with ‘pre-emptive priority’ rule, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 36, No. 1, 1996
- [281] Zhao M., Xie M., A model of storage reliability with possible initial failures, *Reliability Engineering and System Safety*, 43, 1994
- [282] Zohrul Kabir A. B. M., Al-Olayan A. S., A stocking policy for spare part provisioning under age based preventive replacement, *European Journal of Operational Research*, 90, 1996
- [283] Żółtowski B., Nadmiar informacyjny w diagnozowaniu uszkodzeń, *Materiały XXXII Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2004*, Wyd. ITeE, Radom, 2004
- [284] Żurek J., Mitkow S., Ziółkowski J., Metody oceny gotowości pojazdów, *Materiały XXXIV Zimowej Szkoły Niezawodności Szczyrk, 2006*, Wyd. ITeE, Radom, 2006

Załącznik I. Przykładowy program symulacyjny dla nadsystemu z rezerwą czasową

Poniżej przedstawiony został podstawowy program symulacyjny dla nadsystemu, w którym system techniczny posiada strukturę niezawodnościową progową:

```
r = 0;
l = 0;
w = 4000;
alfa = 1;
beta = 1/100;
alfa_d = 1;
beta_d = 1/1000;
alfa_n = 1;
beta_n = 1/10;
alfa_re = 1;
beta_re = 1/10;
M = 5;
k = 1;
Q = 30;
n = 5;
zapas = 5;

for z = 1:30
    czas_pracy = ((-log(1-rand(w,M)))/beta).^(1/alfa);
    czas_napr = ((-log(1-rand(w,M)))/beta_n).^(1/alfa_n);
    i = 1:w;
    cpn = zeros(2*w,M);
    cpn(i*2-1,:) = czas_pracy(i,:);
    cpn(i*2,:) = czas_napr(i,:);
    cpn = cumsum(cpn);
    tun = cpn(:);
    [tun,poz] = sort(tun);
clear czas_pracy czas_napr
    maximum = min(cpn(end,:));
    maximum = sum(tun>maximum);
    m=floor((0.9*w*M)/Q);
clear maximum

    czas_dost = ((-log(1-rand(1,m)))/beta_d).^(1/alfa_d);
    wpn = -ones(2*w,M);
    wpn(i*2,:) = 1;
    wpn1 = wpn(:);
    wpn = wpn1(poz);
clear i
    ku = find(wpn==-1);
    tu = [cpn(poz(ku(1:zapas)))];
    tn = [cpn(poz(ku(1:zapas))+1)];
    cpn(poz(ku(1:zapas)))=nan;
    cpn(poz(ku(1:zapas))+1)=nan;
    cpn = sort(cpn);
    if zapas==0; tu=0; tn=0; endif
    tun = cpn(:);
    tun(2:2:2*w*M)=[];
    tun=[tu;sort(tun)];
    ku=1:length(tun);
    tun(tun==0)=[];
if Q>M
    zamowienie = zapas-n:Q:zapas-n+(m-1)*Q;
    for j=0:m-1
        nr_dostawy = j+1;
        t_z_alarm = [];
        if length(zamowienie>0) & sum(zamowienie>0)==0
            t_z_alarm = zeros(m-j);
```

```

else
t_z_alarm(find(zamowienie>0)) = tun(ku(zamowienie(find(zamowienie>0))));
endif
td = t_z_alarm + czas_dost(1:m-j);
czas_dost(min(find(td==min(td))))=[];
zamowienie(min(find(td==min(td))))=[];
t_z_alarm = t_z_alarm(min(find(td==min(td))));
td = min(td);
t_dost(j+1,1) = td;
clear t_z_alarm
if td<=min(cpn(1,:))
tun = cpn(:);
[tun,poz] = sort(tun);
wpn = wpn1(poz);
ku = find(wpn==-1);
tu = [tu;cpn(poz(ku(1:Q)))];
tn = [tn;cpn(poz(ku(1:Q))+1)];
cpn(poz(ku(1:Q))) = nan;
cpn(poz(ku(1:Q))+1) = nan;
cpn = sort(cpn);

tun = cpn(:);
tun(2:2:2*w*M)=[];
tun=[tu;sort(tun)];
ku=1:length(tun);
tun(tun==0)=[];

else
kolumna = find(cpn(1,:)<=td);
[kol,poz] = sort(cpn(1,kolumna));
kolumna = kolumna(poz);
kol = min(length(kolumna),Q);
tu = [tu;(sort(cpn(1,kolumna))(1:kol))];
t_z_brak=sort(cpn(1,:))(k);
dl_braku=td-t_z_brak;
dl_braku_plus(j+1,z)=dl_braku;
przestoj = td - cpn(1,:);
przestoj = max(0,przestoj)
cpn(2:end,:) = cpn(2:end,:)+cumsum([przestoj;zeros(2*w-2,M)]);
tn = [tn;(sort(cpn(2,kolumna))(1:kol))];
cpn(1,kolumna(1:kol)) = nan;
cpn(2,kolumna(1:kol)) = nan;
cpn = sort(cpn);
tun = cpn(:);
[tun,poz] = sort(tun);
wpn = wpn1(poz);
ku = find(wpn==-1);
kol = length(kolumna);
tu = [tu;cpn(poz(ku(1:Q-kol)))];
tn = [tn;cpn(poz(ku(1:Q-kol))+1)];
cpn(poz(ku(1:Q-kol))) = nan;
cpn(poz(ku(1:Q-kol))+1) = nan;
cpn = sort(cpn);
tun = cpn(:);
tun(2:2:2*w*M)=[];
tun=[tu;sort(tun)];
ku=1:length(tun);
tun(tun==0)=[];

endif
endfor
else
zamowienie = zapas-n:Q:zapas-n+(m-1)*Q;

```

```

for j=0:m-1
nr_dostawy = j+1;
t_z_alarm(find(zamowienie>0)) = tun(ku(zamowienie(find(zamowienie>0))));
td = t_z_alarm + czas_dost(1:m-j);
czas_dost(min(find(td==min(td))))=[];
zamowienie(min(find(td==min(td))))=[];
t_z_alarm = t_z_alarm(min(find(td==min(td))));
td=min(td);
t_dost(j+1,1) = td;
clear t_z_alarm

if td<=min(cpn(1,:))
    tun = cpn(:);
    [tun,poz] = sort(tun);
    wpn = wpn1(poz);
    ku = find(wpn==-1);
    tu = [tu;cpn(poz(ku(1:Q)))];
    tn = [tn;cpn(poz(ku(1:Q))+1)];
    cpn(poz(ku(1:Q))) = nan;
    cpn(poz(ku(1:Q))+1) = nan;
    cpn = sort(cpn);
    tun = cpn(:);
    tun(2:2:2*w*M)=[];
    tun=[tu;sort(tun)];
    ku=1:length(tun);
    tun(tun==0)=[];
else
    kolumna = find(cpn(1,:)<=td);
    [kol,poz] = sort(cpn(1,kolumna));
    kolumna = kolumna(poz);
    kol = min(length(kolumna),Q);
    tu = [tu;(sort(cpn(1,kolumna(1:kol))))];
    t_z_brak=sort(cpn(1,:))(k);
    dl_braku=td-t_z_brak;
    dl_braku_plus(j+1,z)=dl_braku;
    przestoj = td - cpn(1,:);
    przestoj = max(0,przestoj);
    cpn(2:end,kolumna(1:kol)) =
cpn(2:end,kolumna(1:kol))+cumsum([przestoj(kolumna(1:kol));zeros(2*w-2,kol)]);
    tn = [tn;(sort(cpn(2,kolumna(1:kol))))];
    cpn(1,kolumna(1:kol)) = nan;
    cpn(2,kolumna(1:kol)) = nan;
    cpn = sort(cpn);

if Q>kol
    tun = cpn(:);
    [tun,poz] = sort(tun);
    wpn = wpn1(poz);
    ku = find(wpn==-1);
    tu = [tu;cpn(poz(ku(1:Q-kol)))];
    tn = [tn;cpn(poz(ku(1:Q-kol))+1)];
    cpn(poz(ku(1:Q-kol))) = nan;
    cpn(poz(ku(1:Q-kol))+1) = nan;
    cpn = sort(cpn);
endif

    tun = cpn(:);
    tun(2:2:2*w*M)=[];
    tun=[tu;sort(tun)];
    ku=1:length(tun);
    tun(tun==0)=[];
endif
endfor

```

```

endif
clear a poz czas_dost kol kolumna cpn ku przestoj dl_braku

    niezd_log=dl_braku_plus;
save niezd_log niezd_log
clear niezd_log

    td = [tu;t_dost];

    wpn = [-ones(length(tu),1);Q*ones(m,1)];
    [td,poz] = sort(td);

    wpn = wpn(poz);
clear poz

    zapas_w = cumsum([zapas;wpn(1:end-1)]);
    tuz = sort([tu;t_dost]);
    cmz=[tu(1);diff(tuz)];
    utrzymanie = sum(zapas_w(find(zapas_w>0)).*cmz(find(zapas_w>0)));
save utrzymanie utrzymanie
clear zapas_w td utrzymanie cmz wpn

    tu(tu==0) = [];
    tn(tn==0) = [];
    tun = [tu;tn];
    wpn = [-ones(length(tu),1);ones(length(tu),1)];
    [tun,poz] = sort(tun);
    wpn = wpn(poz);
clear poz
    l_urz = cumsum([M;wpn(1:end-1)]);
clear wpn

    d = 0;
    while length(l_urz)>0
    d = d+1;
    a = min(find(l_urz<k))-1;
    tus = tun(a);

    if a > 0
    tun(1:a) = [];
    l_urz(1:a)=[];
    b = min(find(l_urz>=k))-1;
    tns = tun(b);
    okres = max(tns);

    if b > 0
    tun(1:b) = [];
    l_urz(1:b)=[];
    else
    tun = [];
    l_urz = [];
    endif
    dl_niezd(d,z)=tns - tus;

    else
    tun = [];
    l_urz = [];
    endif
    endwhile

    okres_eks = okres;
save okres_eks okres_eks
clear okres_eks

```

```

dl_niezd = dl_niezd(:);
dl_niezd(find(dl_niezd == 0)) = [];

czas_rez = ((-log(1-rand(length(dl_niezd),1)))/beta_re).^(1/alfa_re);
dl_niezd_nads = dl_niezd - czas_rez;
dl_niezd_nads(find(dl_niezd_nads <= 0)) = [];
save dl_niezd dl_niezd
clear l_urz dl_niezd tn tu tun dl_niezd

ww = [m,alfa,beta,alfa_d,beta_d,alfa_n,beta_n,M,Q,n,zapas];
load niezd_log
load okres_eks
load dl_niezd
load utrzymanie
save ([int2str(1+z)],'ww','dl_niezd','okres_eks','utrzymanie','niezd_log')
endfor
for i = 1:l+z
    clear ww dl_niezd okres_eks utrzymanie niezd_log
    load (int2str(i))
    wyniki(i,:) = ww;
    cz_niezd_brak(1:length(niezd_log),i) = niezd_log;
    cz_niezd_nads(1:length(dl_niezd),i) = dl_niezd;
    okres_eks_cal(1:length(okres_eks),i) = okres_eks;
    utrzymanie_cal(1:length(utrzymanie),i)=utrzymanie;
endfor
cd..
cd kzn
l = 1+z;
nazwa = int2str (r);
save ([nazwa], 'wyniki','okres_eks_cal','cz_niezd_brak','cz_niezd_nads','utrzymanie_cal')
cd..

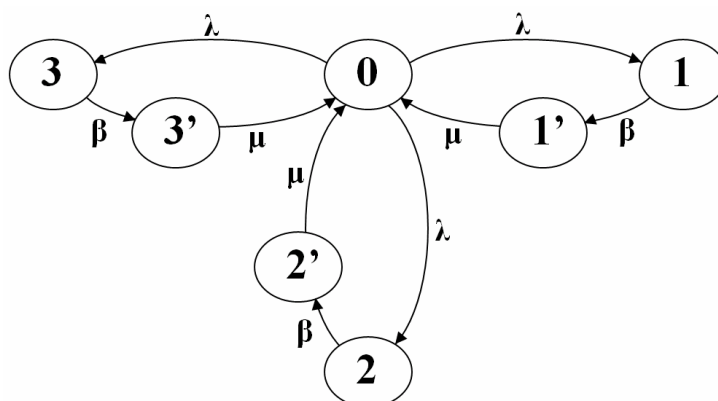
```

Załącznik II. Współczynniki gotowości nadsystemu

Dla analizowanych modeli nadsystemu, w którym elementy systemu technicznego funkcjonują w określonych strukturach niezawodnościowych, wyznaczone zostały teoretyczne wskaźniki gotowości.

Modele zostały zbudowane zgodnie z teorią procesów Markowa, przy uwzględnieniu założeń przedstawionych w punkcie 8.1.2.

Nadsystem z systemem technicznym o strukturze szeregowej:



Rys. 1. Graf stanów nadsystemu ($M = 3$)

Podstawowa charakterystyka stanów nadsystemu:

Nr stanu nadsystemu	Charakterystyka stanu	Niezawodność nadsystemu
Stan „0”	system techniczny zdatny, brak elementów wymiennych w systemie logistycznym ($I(t) = 0$)	zdatny
Stan „i”, $i = 1, 2, 3$	system techniczny niezdatny (uszkodzenie elementu pracującego nr i), brak elementów wymiennych w systemie logistycznym ($I(t) = 0$)	niezdatny
Stan „i’”, $i' = 1', 2', 3'$	system techniczny niezdatny (uszkodzenie elementu pracującego nr i), element wymienny znajduje się w systemie wsparcia logistycznego ($I(t) = 1$)	niezdatny

Współczynnik gotowości dla analizowanego modelu:

$$A = \frac{\beta\mu}{\beta\mu + 3\lambda(\mu + \beta)}$$

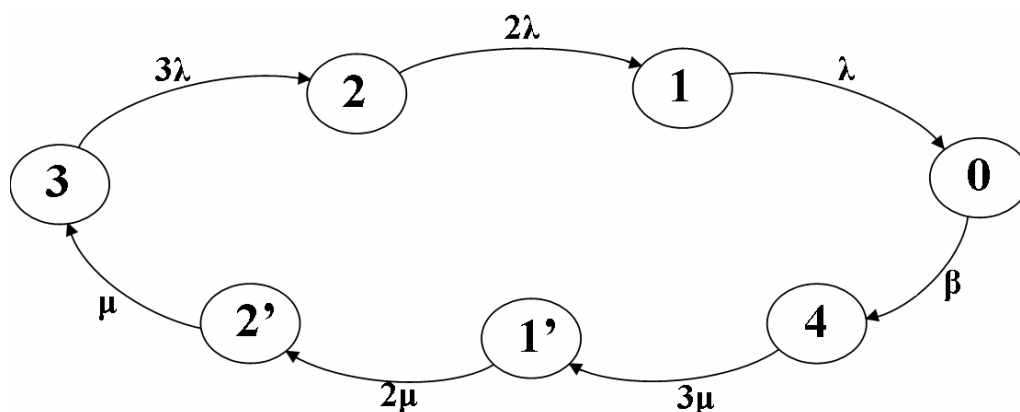
gdzie:

μ – intensywność naprawy elementu pracującego

λ – intensywność uszkodzeń elementu pracującego

β – intensywność dostawy elementu wymiennego

Nadsystem z systemem technicznym o strukturze równoległej:



Rys. 2. Graf stanów nadsystemu ($M = 3$)

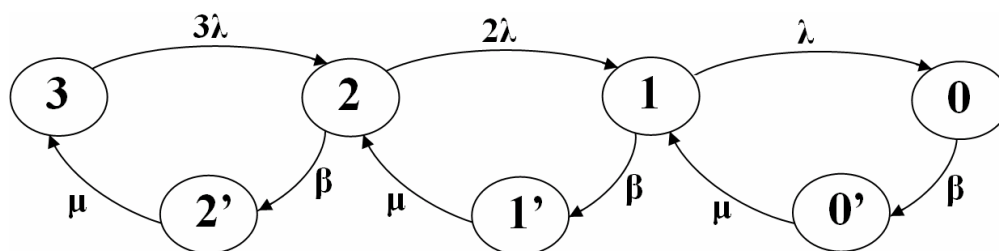
Podstawowa charakterystyka stanów nadsystemu:

Nr stanu nadsystemu	Charakterystyka stanu	Niezawodność nadsystemu
Stan „ i ”, $i = 1, 2, 3$	system techniczny zdalny (pozostaje i elementów pracujących), brak elementów wymiennych w systemie logistycznym ($I(t) = 0$)	zdalny
Stan „0”	system techniczny niezdatny (wszystkie elementy pracujące uszkodzone), brak elementów wymiennych w systemie logistycznym ($I(t) = 0$)	niezdatny
Stan „4”	system techniczny niezdatny (wszystkie elementy pracujące uszkodzone), Q elementów wymiennych dostarczono do systemu wsparcia logistycznego ($I(t) = Q = 3$)	niezdatny
Stan „ i' ”, $i' = 1', 2'$	system techniczny niezdatny (i' elementów wymienionych), w systemie wsparcia logistycznego znajduje się zapasów $I(t) = Q - i'$	niezdatny

Współczynnik gotowości dla analizowanego modelu:

$$A = \frac{11\beta\mu}{6\lambda\mu + 11\beta\mu + 14\beta\lambda}$$

Nadsystem z systemem technicznym o strukturze progowej:



Rys. 3. Graf stanów nadsystemu ($M = 3$)

Podstawowa charakterystyka stanów nadsystemu dla $k = 1$:

Nr stanu nadsystemu	Charakterystyka stanu	Niezawodność nadsystemu
Stan „ i ”, $i = 1, 2, 3$	system techniczny zdalny (pozostaje i elementów pracujących), brak elementów wymiennych w systemie logistycznym ($I(t) = 0$)	zdalny
Stan „ 0 ”	system techniczny niezdatny (wszystkie elementy pracujące uszkodzone), brak elementów wymiennych w systemie logistycznym ($I(t) = 0$)	niezdalny
Stan „ i' ”, $i' = 0', 1', 2'$	system techniczny niezdatny, element wymienny znajduje się w systemie wsparcia logistycznego ($I(t) = 1$)	niezdalny

Współczynnik gotowości dla analizowanego modelu dla $k = 1$:

$$A = 1 - \frac{6\lambda^3(\beta + \mu)}{3\lambda(\lambda + \beta)(\mu + \beta)(2\lambda + \beta^2) + \beta^3\mu}$$

Podstawowa charakterystyka stanów nadsystemu dla $k = M$:

Nr stanu nadsystemu	Charakterystyka stanu	Niezawodność nadsystemu
Stan „ 3 ”	system techniczny zdalny (wszystkie elementy pracujące zdalne), brak elementów wymiennych w systemie logistycznym ($I(t) = 0$)	zdalny
Stan „ i ”, $i = 0, 1, 2$	system techniczny niezdatny (pozostaje i elementów pracujących), brak elementów wymiennych w systemie logistycznym ($I(t) = 0$)	niezdalny
Stan „ i' ”, $i' = 1', 2'$	system techniczny niezdatny, element wymienny znajduje się w systemie wsparcia logistycznego ($I(t) = 1$)	niezdalny

Współczynnik gotowości dla analizowanego modelu dla $k = M$:

$$A = \frac{\mu\beta^3}{3\lambda(\lambda + \beta)(\mu + \beta)(2\lambda + \beta^2) + \beta^3\mu}$$

Załącznik III. Równania regresji dla parametrów modelu analizowanych w procesie badania wrażliwości modelu symulacyjnego

$x = A_o$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = -0,0066x^2 - 0,1883x + 838,45$	$y = 1856,6x^{0,0141}$	$y = 52,911\text{Ln}(x) + 632,81$
$E[\xi_1]$	$y = -0,0002x^2 - 0,0066x + 37,929$	$y = 59,187x^{0,0712}$	$y = 8,7791\text{Ln}(x) + 119,81$
A	$y = 5E-06x^2 - 9E-05x + 0,3464$	$y = 0,6407x^{-0,0557}$	$y = 0,642x^{-0,1361}$
P_{mj}	$y = -8E-05x^2 + 0,0018x + 0,8771$	$y = 0,0012\text{Ln}(x) + 0,0279$	$y = -6E-06x^2 + 0,0001x + 0,17$
C_w	$y = 126,54x^2 - 2335,6x + 6E+06$	$y = 450000$	$y = 748500$
C_o	$y = 4,2179x^2 - 77,855x + 206864$	$y = 15000$	$y = 24950$
C_p	$y = 126,54x^2 - 2335,6x + 6E+06$	$y = 450000$	$y = 748500$
C_h	$y = -137486x^2 + 3E06x + 5E+09$	$y = 10^7\text{Ln}(x) + 3E+08$	$y = 2E+09x^{-0,083}$
C_{dw}	$y = -36037x^2 + 807555x + 5E+08$	$y = 10^6\text{Ln}(x) + 10^7$	$y = 3E+06\text{Ln}(x) + 4E+07$
C_s	$y = 0,0265x^2 - 0,5142x + 865,59$	$y = 31,496\text{Ln}(x) + 794,87$	$y = 87,466\text{Ln}(x) + 2010,9$
$x = B_o$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = 924,34e^{-0,0011x}$	$y = 4E-06x^3 - 0,0066x^2 + 2,3708x + 1625$	$y = 821,93e^{-0,0036x}$
$E[\xi_1]$	$y = 35,008e^{-0,0008x}$	$y = -7E-08x^3 + 5E-05x^2 - 0,0288x + 100,58$	$y = -43,519\text{Ln}(x) + 311,65$
A	$y = 0,2167\text{Ln}(x) - 0,541$	$y = 2E-09x^3 - 4E-06x^2 + 0,0025x + 0,3896$	$y = -10^{-6}x^2 + 0,0014x + 0,5478$
P_{mj}	$y = 0,5146e^{-2E-05x}$	$y = 0,0359e^{-0,0027x}$	$y = 0,1766x^{-0,008}$
C_w	$y = 3,9023x + 6E+06$	$y = 337500$	$y = 748500$
C_o	$y = 206579e^{6E-07x}$	$y = 11250$	$y = 24950$
C_p	$y = 3,9023x + 6E+06$	$y = 337500$	$y = 748500$
C_h	$y = 4E+07x + 8E+08$	$y = 392,82x^2 + 2E+06x + 2E+07$	$y = 3538,1x^2 + 10^7x + 10^9$
C_{dw}	$y = -9E+07\text{Ln}(x) + 9E+08$	$y = 8,5039x^2 - 19063x + 1E+07$	$y = -10^7\text{Ln}(x) + 10^8$
C_s	$y = 342,47\text{Ln}(x) - 713,02$	$y = 184,33x^{0,3238}$	$y = -3E-06x^3 + 0,0057x^2 - 2,8349x + 2243,1$

$x = A_r$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = -0,0047x^2 - 0,0712x + 942,81$	$y = 0,1792x^2 - 4,7833x + 1856,1$	$y = -0,1822x^2 + 4,1292x + 610,75$
$E[\xi_1]$	$y = 0,0001x^2 - 0,009x + 41,44$	$y = -0,0022x^2 + 0,0944x + 64,487$	$y = 117,15x^{0,0298}$
A	$y = -3E-06\ln(x) + 5E-05$	$y = -6E-06x^2 + 0,0002x + 0,6161$	$y = 0,0064\ln(x) + 0,6683$
P_{mj}	$y = -4E-06x^3 + 0,0001x^2 - 0,0011x + 1,0001$	$y = 3E-06x^2 - 8E-05x + 0,0289$	$y = 0,0001x^2 - 0,0034x + 0,1649$
C_w	$y = 7,8606x^2 - 303,83x + 5E+06$	$y = 450000$	$y = 748500$
C_o	$y = 0,262x^2 - 10,128x + 182276$	$y = 15000$	$y = 24950$
C_p	$y = 7,8606x^2 - 303,83x + 5E+06$	$y = 450000$	$y = 748500$
C_h	$y = 75273x^2 - 2E+06x + 2E+09$	$y = 4514,1x^2 - 52049x + 3E+08$	$y = -2E+07\ln(x) + 2E+09$
C_{dw}	$y = 3773,6x^2 - 151450x + 6E+08$	$y = 914x^2 - 23783x + 10^7$	$y = 4E+07x^{0,0314}$
C_s	$y = 0,0138x^2 - 0,2354x + 482,63$	$y = -0,0242x^2 + 0,7845x + 806,47$	$y = 1963,8x^{0,0025}$

$x = B_r$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = 884,82e^{-0,0057x}$	$y = -0,0055x^2 - 0,4263x + 1909,3$	$y = 631,69e^{-0,0042x}$
$E[\xi_1]$	$y = 0,0013x^2 + 0,6941x + 25,646$	$y = -0,0001x^3 + 0,0173x^2 - 0,263x + 20,738$	$y = 0,0015x^2 + 1,7497x + 97,892$
A	$y = 10^{-5}x^2 - 0,0038x + 0,4682$	$y = -6E-06x^2 - 0,0003x + 0,7079$	$y = 8E-06x^2 - 0,0033x + 0,7036$
P_{mj}	$y = 0,1798\ln(x) + 0,117$	$y = 9E-06x^2 - 8E-05x + 0,0282$	$y = 0,0165\ln(x) + 0,1313$
C_w	$y = 40,15x + 6E+06$	$y = 405000$	$y = 748500$
C_o	$y = 1,3383x + 206530$	$y = 13500$	$y = 24950$
C_p	$y = 40,15x + 6E+06$	$y = 405000$	$y = 748500$
C_h	$y = 2E+08x + 3E+09$	$y = -1552,1x^2 + 3E+06x + 2E+08$	$y = 22389x^2 + 7E+06x + 2E+09$
C_{dw}	$y = 10^7x + 4E+08$	$y = 136,9x^2 + 8280x + 10^7$	$y = 278,84x^2 + 546370x + 3E+07$
C_s	$y = 482,86x^{0,2478}$	$y = -0,0131x^2 + 4,0116x + 772,86$	$y = 0,0173x^2 - 2,5071x + 1978,9$

$x = A_L$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = 840,37x^{-0,0106}$	$y = 0,7713x^3 - 27,826x^2 + 308,49x + 1580,9$	$y = 593,48x^{-0,0716}$
$E[\xi_1]$	$y = 37,992x^{-0,0078}$	$y = 0,0061x^2 - 0,228x + 66,225$	$y = 98,957x^{-0,0822}$
A	$y = 0,3448x^{0,0056}$	$y = 0,6007x^{-0,0416}$	$y = 0,0172\text{Ln}(x) + 0,7158$
P_{mj}	$y = 4E-06x^3 - 8E-05x^2 + 0,0005x + 0,8796$	$y = 0,0042\text{Ln}(x) + 0,0306$	$y = 0,0032\text{Ln}(x) + 0,0753$
C_w	$y = -168,32x^2 + 2504,7x + 6E+06$	$y = 405000$	$y = 748500$
C_o	$y = -5,6106x^2 + 83,491x + 206463$	$y = 13500$	$y = 24950$
C_p	$y = -168,32x^2 + 2504,7x + 6E+06$	$y = 405000$	$y = 748500$
C_h	$y = 2E+06x^2 - 5E+07x + 5E+09$	$y = -33447x^3 + 10^6x^2 - 2E+07x + 3E+08$	$y = 2E+09x^{-0,0681}$
C_{dw}	$y = 682645x^2 - 2E+07x + 4E+09$	$y = 51254x^3 - 2E+06x^2 + 2E+07x + 10^8$	$y = 3E+08x^{-0,0817}$
C_s	$y = 0,3129x^2 - 7,6702x + 1468,4$	$y = -0,1379x^3 + 5,4199x^2 - 66,966x + 1224,3$	$y = 2181,7x^{-0,0497}$
$x = B_L$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = 0,9129x - 92,382$	$y = -0,0003x^2 + 2,2474x - 119,16$	$y = 0,0004x^2 + 0,324x - 39,67$
$E[\xi_1]$	$y = 0,0303x + 1,8812$	$y = -10^{-5}x^2 + 0,0755x + 2,1453$	$y = 6E-05x^2 + 0,0536x + 7,904$
A	$y = 0,8703e^{-0,0007x}$	$y = 10^{-7}x^2 - 0,0006x + 1,0449$	$y = 0,9981e^{-0,0004x}$
P_{mj}	$y = 0,4809x^{0,01}$	$y = -3E-08x^2 + 6E-05x - 0,0024$	$y = -3E+0-9x^2 + 7E-06x + 0,1659$
C_w	$y = -17,233x + 6E+06$	$y = 337500$	$y = 748500$
C_o	$y = -0,5744x + 206852$	$y = 11250$	$y = 24950$
C_p	$y = -17,233x + 6E+06$	$y = 337500$	$y = 748500$
C_h	$y = 9E+09x - 0,0748$	$y = 4E+08x^{-0,079}$	$y = 1150,2x^2 - 524752x + 10^9$
C_{dw}	$y = 805,1x^2 + 3E+06x + 5E+08$	$y = 24,114x^2 + 89859x - 8E+06$	$y = 192,86x^2 + 160237x + 3E+07$
C_s	$y = 3887,4x^{-0,1509}$	$y = 5386,5x^{-0,2316}$	$y = 0,001x^2 - 0,7088x + 2027,7$

$x = A_y$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregową	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = -0,0183x^2 + 0,3972x + 940,54$	$y = 0,0801x^2 - 1,8672x + 1840$	$y = 0,0386x^2 - 0,9287x + 618,3$
$E[\xi_1]$	$y = -0,0006x^2 + 0,0134x + 41,327$	$y = 0,0014x^2 - 0,0566x + 64,295$	$y = -0,7906\ln(x) + 117,2$
A	$y = -4E-06x^2 + 8E-05x - 0,0002$	$y = 9E-07x^3 - 4E-05x^2 + 0,0006x + 0,6181$	$y = -5E-05x^2 + 0,0011x + 0,6677$
P_{mj}	$y = -2E-05x^3 + 0,0005x^2 - 0,0028x + 0,9914$	$y = 10^{-6}x^2 - 10^{-5}x + 0,0287$	$y = -5E-05x^2 + 0,0014x + 0,1729$
C_w	$y = 212,58x^2 - 8390,6x + 6E+06$	$y = 450000$	$y = 748500$
C_o	$y = 7,0859x^2 - 279,69x + 184878$	$y = 15000$	$y = 24950$
C_p	$y = 212,58x^2 - 8390,6x + 6E+06$	$y = 450000$	$y = 748500$
C_h	$y = -15436x^2 + 351734x + 2E+09$	$y = 4309,6x^2 - 108478x + 3E+08$	$y = 39457x^2 - 10^6x + 2E+09$
C_{dw}	$y = -9903,7x^2 + 231060x + 6E+08$	$y = 803,12x^2 - 19220x + 10^7$	$y = 4938,2x^2 - 120046x + 4E+07$
C_s	$y = 0,0063x^2 - 0,1437x + 482,3$	$y = -0,0009x^2 + 0,0137x + 810,23$	$y = -0,1029x + 1960,6$

$x = B_y$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregową	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = -0,0004x^2 + 0,0745x + 834,71$	$y = 0,0065x^2 - 0,5558x + 1838,4$	$y = -0,0039x^2 + 0,3504x + 607,17$
$E[\xi_1]$	$y = 0,0012x^2 - 0,2041x + 35,298$	$y = 0,0004x^2 - 0,1018x + 64,262$	$y = 0,002x^2 - 0,4322x + 120,95$
A	$y = -2E-05x^2 + 0,0037x + 0,3869$	$y = 10^{-7}x^3 - 2E-05x^2 + 0,0013x + 0,6057$	$y = -6E-06x^2 + 0,0013x + 0,6556$
P_{mj}	$y = 0,5658e^{-0,0185x}$	$y = 0,0289e^{-0,0003x}$	$y = -2E-07x^3 + 5E-05x^2 - 0,0044x + 0,2056$
C_w	$y = 1,1107x^2 - 71,74x + 6E+06$	$y = 450000$	$y = 748500$
C_o	$y = 0,037x^2 - 2,3913x + 206880$	$y = 15000$	$y = 24950$
C_p	$y = -139,93x^2 + 17276x + 6E+06$	$y = 450000$	$y = 748500$
C_h	$y = 46,48x^2 - 42595x + 6E+09$	$y = 263,35x^2 - 43286x + 3E+08$	$y = -5596,5x^2 + 536251x + 2E+09$
C_{dw}	$y = 6E+08x^{-0,1345}$	$y = 109,97x^2 - 24347x + 10^7$	$y = 901,52x^2 - 181146x + 4E+07$
C_s	$y = 0,0047x^2 - 0,7306x + 857,14$	$y = -0,0016x^2 + 0,0873x + 810,42$	$y = -0,0003x^2 - 0,0767x + 1960,2$

$x = k$	Struktura niezawodnościowa progowa
	RÓWNANIA REGRESJI
$E[\tau]$	$y = -0,9482x^2 + 5,8634x + 1159,4$
$E[\xi_1]$	$y = 0,3459x^3 - 14,009x^2 + 152,87x - 63,895$
A	$y = -0,2201\ln(x) + 0,7821$
P_{mj}	$y = 3E-05x^2 + 0,0008x + 0,0239$
C_w	$y = 1620000$
C_o	$y = 54000$
C_p	$y = 1620000$
C_h	$y = 726,82x^2 - 20049x + 2E+07$
C_{dw}	$y = 10^8 x^{0,3517}$
C_s	$y = 349,42x^{0,3265}$

$x = s$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregową	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = 969,83e^{-0,0297x}$	$y = -0,2447x^2 - 37,596x + 2032,2$	$y = 0,1292x^2 - 25,945x + 729,29$
$E[\xi_1]$	$y = 0,0094x^2 - 0,9049x + 37,039$	$y = 0,0029x^2 - 1,0543x + 69,03$	$y = 0,0213x^2 - 4,3092x + 135,76$
A	$y = -10^{-5}x^2 + 0,0063x + 0,4036$	$y = 0,0001x^2 + 0,0044x + 0,5941$	$y = 7E-05x^2 + 0,0068x + 0,6382$
P_{mj}	$y = 3E-07x^3 - 1E-05x^2 - 0,0002x + 0,5149$	$y = -10^{-5}x^2 - 0,0001x + 0,0298$	$y = 0,005x^2 - 0,1769x + 1,4748$
C_w	$y = 30,95x^2 - 1272,3x + 5E+06$	$y = 337500$	$y = 748500$
C_o	$y = 1,0317x^2 - 42,41x + 165506$	$y = 11250$	$y = 24950$
C_p	$y = 30,95x^2 - 1272,3x + 5E+06$	$y = 337500$	$y = 748500$
C_h	$y = 4E+09e^{0,0222x}$	$y = 146071x^2 - 871340x + 2E+08$	$y = 767733x^2 - 10^7x + 2E+09$
C_{dw}	$y = 925376x^2 - 9E+09x + 4E+09$	$y = -5269,2x^2 - 3E+06x + 10^8$	$y = 63744x^2 - 10^7x + 4E+08$
C_s	$y = 1212,2e^{0,0199x}$	$y = 0,9905x^2 - 8,1452x + 1157,2$	$y = 1,0848x^2 + 0,3148x + 2238$

$x = I_0$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
$E[\tau]$	$y = 0,0073x + 887,69$	$y = -0,0549x^2 + 1,7696x + 1912,5$	$y = 0,0129x^2 - 0,0609x + 166,83$
$E[\xi_1]$	$y = -0,0008x + 93,325$	$y = -0,003x^2 + 0,094x + 65,286$	$y = 0,0121x^2 - 0,1017x + 158,99$
A	$y = 8E-07x + 0,2142$	$y = 9E-06x^2 - 0,0003x + 0,6091$	$y = -2E-05x^2 + 0,0003x + 0,5808$
P_{mj}	$y = 2E-05x + 0,5436$	$y = 2E-07x^2 - 5E-06x + 0,0295$	$y = 10^{-6}x^2 - 2E-05x + 0,0185$
C_w	$y = -351,41x + 10^7$	$y = 337500$	$y = 158,55x^2 + 51319x + 621710$
C_o	$y = -11,714x + 496192$	$y = 11250$	$y = 5,285x^2 + 1710,6x + 20724$
C_p	$y = -351,41x + 10^7$	$y = 337500$	$y = 158,55x^2 + 51319x + 621710$
C_h	$y = 30363x + 10^9$	$y = -10226x^2 + 420987x + 2E+08$	$y = 8558,5x^2 + 2E+06x + 3E+07$
C_{dw}	$y = -118326x + 9E+09$	$y = -3950,3x^2 + 124993x + 10^8$	$y = 24064x^2 + 5E+06x + 6E+07$
C_s	$y = 0,0031x + 913,11$	$y = -0,0365x^2 + 1,4433x + 1125,5$	$y = 0,018x^2 - 0,1306x + 621,32$
$x = c_w$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
C_w	$y = 123270x$	$y = 9000x$	$y = 14970x$
C_s	$y = 0,0172x + 1355,2$	$y = 0,0246x + 1144,2$	$y = 0,0141x + 2218,1$
$x = c_o$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
C_o	$y = 4109x$	$y = 300x$	$y = 499x$
C_s	$y = 0,0006x + 1356,1$	$y = 0,0008x + 1145,3$	$y = 0,0005x + 2218,7$

$x = c_p$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
C_p	$y = 123270x$	$y = 9000x$	$y = 9980x$
C_s	$y = 0,0172x + 1355,2$	$y = 0,0246x + 1144,2$	$y = 0,0141x + 2218,1$
$x = c_h$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
C_h	$y = 6E+07x$	$y = 3E+06x$	$y = 2E+07x$
C_s	$y = 7,8019x + 575,9$	$y = 7,5807x + 387,31$	$y = 19,234x + 295,4$
$x = c_{dw}$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
C_{dw}	$y = 4E+06x + 6E+07$	$y = 140470x + 217330$	$y = 311110x + 10^6$
C_s	$y = 0,5653x + 790,82$	$y = 0,3842x + 761,17$	$y = 0,2929x + 1925,8$
$x = k_f$	Struktura niezawodnościowa		
	Szeregowa	Progowa	Równoległa
	RÓWNANIA REGRESJI		
C_{dw}	$y = 63667x + 4E+09$	$y = 217,33x + 10^8$	$y = 1111,6x + 3E+08$
C_s	$y = 0,0089x + 1347,2$	$y = 0,0006x + 1144,8$	$y = 0,001x + 2217,7$