



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

**RADA NAUKOWA DYSZYPLINY
INŻYNIERIA MECHANICZNA**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Agnieszka Sołtysiak

**METODA OCENY RYZYKA WYSTĄPIENIA ZDARZEŃ
NIEPOŻĄDANYCH W SYSTEMIE EKSPLOATACJI
ŚRODKÓW TRANSPORTU**

*Method of risk assessment of the occurrence
of undesirable events in the system of operation
and maintenance of transport means*

DZIEDZINA: nauki inżynieryjno-techniczne
DYSZYPLINA: inżynieria mechaniczna

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. KLAUDIUSZ MIGAWA, PROF. UCZELNI
KATEDRA EKSPLOATACJI MASZYN I TRANSPORTU
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
POLITECHNIKA BYDGOSKA IM. J. J. ŚNIADECKICH

**BYDGOSZCZ
2022**

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	5
1.1. Zarys problematyki badań	5
1.2. Cel i zakres pracy	9
2. Teoretyczne podstawy problematyki badań	11
2.1. Zagadnienie ryzyka	11
2.1.1. Ryzyko w systemach eksploatacji obiektów technicznych	11
2.1.2. Stosowane metody oceny ryzyka.....	21
2.2. Problematyka oceny efektywności w systemach eksploatacji obiektów technicznych	33
2.3. Zagadnienie modelowania procesów eksploatacji	35
2.4. Sterowanie procesem eksploatacji (proces decyzyjny)	38
2.4.1. Modele optymalizacyjne w procesie decyzyjnym	39
2.4.2. Modele efektywnościowe i optymalizacyjne stosowane w obszarze środków transportu.....	40
3. Metodyka badań eksploatacyjnych	44
3.1. Cel i założenia do badań.....	44
3.2. Identyfikacja systemu eksploatacji środków transportu.....	45
3.2.1. Model obiektu badań	51
3.3. Identyfikacja procesu eksploatacji środków transportu	54
3.3.1. Użytkowanie	55
3.3.2. Naprawa realizowana przez jednostkę pogotowia technicznego (PT) na trasie	56
3.3.3. Obsługa w dniu użytkowania (obsługa codzienna OC).....	57
3.3.4. Okresowa obsługa techniczna OT	58
3.3.5. Naprawa realizowana na stanowiskach w stacji obsługi	59
3.3.6. Diagnostowanie	61
3.4. Graf stanów modelu procesu eksploatacji środków transportu.....	61
3.5. Metoda badawcza	68
3.6. Analiza statystyczna wyników badań eksploatacyjnych.....	70
4. Metoda oceny ryzyka w wybranym systemie eksploatacji środków transportu	80
4.1. Analiza ryzyka.....	82
4.1.1. Cel i zakres analizy ryzyka	82
4.1.2. Identyfikacja i analiza zagrożeń	83
4.1.3. Semimarkowski model szacowania ryzyka	87
4.1.3.1. Model matematyczny procesu eksploatacji	89
4.1.3.2. Szacowanie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych	100
4.2. Ewaluacja ryzyka	105
4.3. Wnioski do metody oceny ryzyka.....	109
5. Decyzyjny model sterowania procesem eksploatacji z uwzględnieniem kryterium ryzyka.....	111
5.1. Analiza zagadnienia gotowości obiektów technicznych	111

5.1.1. Wyznaczenie rzeczywistych gotowości obiektu technicznego i systemu eksploatacji	115
5.1.2. Wyznaczenie wymaganych gotowości systemu eksploatacji i pojedynczego obiektu technicznego	117
5.2. Wyznaczenie strategii sterowania procesem eksploatacji w systemie autobusowego transportu miejskiego	121
6. Wyniki badań ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu i weryfikacja opracowanych modeli	137
6.1. Wyniki badań semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji środków transportu	138
6.2. Wyniki oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w badanym systemie eksploatacji	141
6.3. Wyznaczenie strategii sterowania procesem eksploatacji na podstawie wyników oceny ryzyka oraz gotowości środków transportu	143
6.3.1. Wartości gotowości rzeczywistej i gotowości wymaganej środków transportu	143
6.3.2. Wyniki badań semimarkowskiego modelu decyzyjnego sterowania procesem eksploatacji	145
7. Zakończenie	160
7.1. Podsumowanie rozprawy	160
7.2. Wnioski	163
7.3. Plan dalszych badań	164
Literatura	160
Streszczenie w języku polskim	160
Streszczenie w języku angielskim.....	174

1. WPROWADZENIE

1.1. ZARYS PROBLEMATYKI BADAŃ

Udział transportu publicznego w realizacji przewozów pasażerskich w aglomeracjach miejskich znacząco zmniejszył się na przestrzeni ostatnich 30 lat, z 7 mld pasażerów przewożonych rocznie środkami komunikacji miejskiej na początku lat 90-tych XX wieku, przez około 5 mld w roku 2000, a w latach 2005-2018, liczba ta ustabilizowała się na poziomie około 4 mld. Przyczyn takiego stanu rzeczy należy przede wszystkim dopatrywać w zwiększeniu zamożności mieszkańców, a co za tym idzie rosnącej z roku na rok liczbie samochodów osobowych. Na podstawie danych statystycznych liczba samochodów osobowych w Polsce zwiększyła się ponad dwukrotnie w roku 2015 oraz niemal 2,5 krotnie w roku 2018 w porównaniu do roku 2000. Drugą istotną przyczyną malejącego zapotrzebowania na publiczny transport miejski jest kwestia zmiany miejsca zamieszkania części mieszkańców poza tereny miejskie. Trend taki szczególnie zauważalny jest w ostatnich dwóch latach, a dodatkowym jego powodem są szeroko rozumiane skutki pandemii wywołanej koronawirusem SARS-CoV-2 w latach 2019-2021. Głównie te dwie przyczyny spowodowały znaczący spadek liczby przewożonych pasażerów środkami publicznego transportu miejskiego. Mimo to publiczny transport pozostaje nadal najbardziej istotnym elementem systemu komunikacji miejskiej. Prawidłowo zorganizowany i zarządzany system komunikacji miejskiej jest podstawą funkcjonowania i trwałego rozwoju miasta oraz obszarów zurbanizowanych. Ponadto korzystanie z publicznych usług przewozowych zamiast transportu indywidualnego niesie ze sobą szereg zalet i korzyści zarówno w aspekcie ekologicznym jak i ekonomicznym. Zastąpienie samochodu osobowego środkiem publicznego transportu miejskiego wiąże się chociażby z ograniczeniem emisji spalin do środowiska, a także zmniejszeniem kosztów związanych z podróżą oraz ewentualnych kosztów parkowania w centrum miasta.

W systemach publicznego transportu miejskiego najważniejsze znaczenie mają potrzeby przewożonych pasażerów, które powinny być zaspokojone na odpowiednim poziomie satysfakcji z odbytej podróży. Zapewnienie konkurencyjności miejskiego transportu zbiorowego w stosunku do przewozów pojazdami indywidualnymi możliwe jest wyłącznie poprzez konsekwentne polepszanie jakości oferowanych usług przewozowych. Wysoka jakość nie ogranicza się jedynie do poprawy komfortu jazdy, ale przede wszystkim oznacza zapewnienie bezpieczeństwa podróży pasażerom oraz terminowości realizowanych przewozów. W celu utrzymania wysokiego poziomu jakości działania złożonych systemów eksploatacji, jakimi są m.in. systemy eksploatacji autobusów miejskich, należy dążyć do zapewnienia racjonalnego oraz efektywnego funkcjonowania eksploatowanych środków transportu.

Racjonalne eksploatowanie maszyn (np. środków transportu) polega na kompleksowym zastosowaniu dostępnych informacji o ich stanie, niezbędnych

do sterowania procesem eksploatacji oraz opracowania odpowiedniej strategii eksploatacyjnej. Sterowanie procesem eksploatacji realizowanym w systemie eksploatacji środków transportu jest racjonalne jeżeli podejmowane decyzje pozwalają na osiągnięcie założonego celu, z punktu widzenia przyjętych kryteriów oceny [106].

Kryterium efektywności działania systemu stosowane jest do analizy i oceny systemów z punktu widzenia ich przeznaczenia oraz zdolności osiągania wyznaczonych celów, czyli zaspokajania określonych potrzeb społecznych. Punktem wyjścia do oceny efektywności działania systemu eksploatacji obiektów technicznych jest opracowanie modelu ocenowego, zawierającego zbiór miar efektywnościowych i kryteriów ich oceny, uwzględniających stopień złożoności rozpatrywanego systemu. Działanie systemu eksploatacji oceniane jest jako efektywne, jeżeli wywołuje określony, pożądany efekt. Efekty mogą być dodatnie i wtedy nazywane są najczęściej korzyściami. Ujemne efekty działania systemu nazywa się nakładami, kosztami lub stratami [76]. Bardzo często jakoś działania systemów eksploatacji obiektów technicznych oceniana jest ze względu na trzy grupy kryteriów: efektywności ekonomicznej (np. dochód, koszty), efektywności eksploatacyjno-technicznej (np. gotowość, wydajność, sprawność) oraz bezpieczeństwa (np. ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych) [62, 76].

Jednym z istotnych pojęć stosowanych w zagadnieniach dotyczących bezpieczeństwa jest pojęcie zdarzenia niepożądanego, definiowanego jako zdarzenie losowe wywołujące negatywny skutek. Źródłami zdarzeń niepożądanych mogą być: nieprawidłowe funkcjonowanie obiektów technicznych, czynniki otoczenia (oddziaływanie środowiska naturalnego) lub niewłaściwe działanie człowieka. Zaistnienie zdarzenia niepożądanego jest trudne do przewidzenia, gdyż zależy od sekwencji lub współistnienia kilku zdarzeń pochodzących z jednego lub różnych źródeł. Konsekwencją wystąpienia zdarzenia niepożądanego jest szkoda (strata). Pod pojęciem szkody lub straty rozumie się uraz fizyczny, uszczerbek na zdrowiu lub utratę życia człowieka, straty materialne spowodowane uszkodzeniem mienia (np. obiektu technicznego) lub degradację środowiska naturalnego [62, 72, 73].

Na podstawie analizy przedstawionych w literaturze definicji zdarzenia niepożądanego oraz definicji strat wynikających z jego zaistnienia, możliwe jest określenie jednego z kluczowych pojęć z punktu widzenia analizy i oceny bezpieczeństwa, którym jest pojęcie ryzyka. Pojęcie ryzyka stosowane jest nie tylko w odniesieniu do systemów technicznych. Występuje ono w wielu dziedzinach działalności człowieka, np. w medycynie stosowane jest do oceny ryzyka zachorowania lub wystąpienia epidemii, a także w ekonomii do oceny ryzyka inwestycji finansowych. W technice pojęcie ryzyka stosowane jest zarówno do opisu wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych (wypadki, kolizje), jak również znajduje zastosowanie w opisie wystąpienia zdarzeń niepożądanych, powodujących zakłócenie prawidłowej realizacji zadań przydzielonych systemowi technicznemu. W aktach normalizacyjnych [70, 72] ryzyko definiowane jest najczęściej jako kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia

zdarzenia niepożądanego i konsekwencji związanych z tym zdarzeniem, czyli ciężkości strat. W pracy przyjęto definicję ryzyka jako iloczynu prawdopodobieństwa wystąpienia niepożądanego zdarzenia i miar jego skutków. Charakterystyki opisujące ryzyko są wiodącymi z punktu widzenia analizy i oceny bezpieczeństwa działania systemów technicznych.

W przypadku systemów eksploatacji środków transportu podstawowym celem funkcjonowania jest prawidłowa realizacja przydzielonych zadań przewozowych na określonych trasach, zgodnie z przyjętym harmonogramem. Dotyczy to również systemów publicznego transportu miejskiego, w tym systemów autobusowej komunikacji miejskiej. W systemach tego typu zadania przewozowe powinny być realizowane punktualnie według przyjętego planu i harmonogramu realizowanych kursów, z dopuszczalnym odchyleniem ± 3 minuty. Głównym problemem uniemożliwiającym prawidłową realizację zadań przewozowych są wszelkiego rodzaju zakłócenia procesu transportowego wywołane niezdatnością środków transportu, w tym przede wszystkim spowodowane przez uszkodzenia, kolizje i wypadki. Wszelkie zdarzenia losowe dotyczące niezdatności środków transportu (autobusów miejskich), związane z uszkodzeniem, kolizją lub wypadkiem, powodujące zakłócenie w realizacji przydzielonych zadań przewozowych i prowadzące do powstania szkód wyrażonych w postaci strat finansowych (kosztów) nazwano w pracy zdarzeniami niepożądanymi. Przerwanie realizacji zadania przewozowego generuje jednocześnie oprócz kosztów przestojów i napraw, również dodatkowe koszty związane z karami finansowymi za niezrealizowanie zadań przewozowych oraz kosztami utrzymania pojazdów rezerwowych. Z tego względu konieczne jest poszukiwanie rozwiązań zmierzających do minimalizacji strat powodowanych wystąpieniem zdarzeń niepożądanych np. przez wybór sposobu naprawy obiektów technicznych z punktu widzenia czasu naprawy i jej kosztów, a także rozwiązań zmierzających do zapewnienia odpowiednio wysokiego poziomu gotowości eksploatowanych środków transportu umożliwiającej terminową realizację zadań przewozowych.

Rozpatrywany w pracy problem jest zagadnieniem złożonym, któremu należy przyjrzeć się z punktu widzenia zarówno ryzyka jak i innych charakterystyk analizy i oceny działania złożonych systemów eksploatacji obiektów technicznych np. gotowości środków transportu do realizacji zadań przewozowych.

Ogólnie wśród składowych sterowanych procesu eksploatacji realizowanego w złożonych systemach eksploatacji obiektów technicznych (np. środków transportu), można wyróżnić dwie główne grupy procesów: procesy dotyczące użytkowania oraz procesy dotyczące utrzymania obiektów technicznych w gotowości do realizacji przydzielonych zadań. Pierwsze z nich dotyczą przede wszystkim działań polegających na zastosowaniu obiektu technicznego zgodnie z jego przeznaczeniem (realizacji przydzielonych zadań). Druga grupa procesów dotyczy przede wszystkim takich procesów jak

obsługiwanie, naprawy, wymiany, diagnozowanie oraz zaopatrywanie obiektów technicznych [69].

Aby system eksploatacji obiektów technicznych funkcjonował prawidłowo i spełniał określone wymagania należy nim we właściwy sposób sterować. Sterowanie systemem eksploatacji obiektów technicznych polega na podejmowaniu racjonalnych decyzji, a w szczególności dotyczy to sterowania głównymi składowymi procesami eksploatacji. Podejmowanie właściwych decyzji zmierza do osiągnięcia wymaganego poziomu efektywności funkcjonowania systemu oraz ograniczenia, minimalizacji lub eliminacji ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych. Ciąg podjętych decyzji w poszczególnych stanach realizowanego procesu eksploatacji tworzy strategię działania. W systemach eksploatacji obiektów technicznych bardzo często decyzje podejmowane są w sposób intuicyjny, co oznacza, że oparte są jedynie na wiedzy i doświadczeniu decydentów systemu. Decydent zazwyczaj staje przed koniecznością wyboru jednego z przynajmniej dwóch możliwych wariantów działania. Błędny wybór strategii działania może mieć negatywne skutki zarówno w odniesieniu do efektywności funkcjonowania systemu eksploatacji oraz ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych, a tym samym poniesienia związanych z tym strat (dodatkových kosztów) dotyczących uszkodzeń obiektów technicznych, degradacji środowiska naturalnego, a nawet utraty zdrowia lub życia ludzkiego. Ze względu na ogromną odpowiedzialność związaną z wyborem błędnej decyzji konieczne jest opracowanie metody lub odpowiedniej procedury ułatwiającej wybór właściwych działań.

W literaturze istnieje wiele opracowań stanowiących cząstkowe rozwiązania problemu analizy i oceny ryzyka działania złożonych systemów eksploatacji obiektów technicznych. Metody te pozwalają na ocenę, kontrolowanie i redukcję wartości ryzyka do poziomów akceptowanych, ale nie uwzględniają lub uwzględniają tylko w ograniczonym zakresie, wpływ istotnych wartości parametrów procesu eksploatacji obiektów technicznych. Brak jest powiązania oceny ryzyka z kryteriami dotyczącymi zapewnienia możliwości prawidłowej realizacji przydzielonych zadań. Brakuje zatem kompleksowych metod umożliwiających analizę i ocenę ryzyka z punktu widzenia zapewnienia efektywnej realizacji zadań w systemie eksploatacji obiektów technicznych (środków transportu), które uwzględniają losowy charakter realizowanego procesu eksploatacji.

Na podstawie analizy literatury oraz wyników badań własnych w pracy podjęto próbę opracowania metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w aspekcie zagrożeń istniejących w rozpatrywanym systemie eksploatacji środków transportu (autobusów miejskich). W tym celu został opracowany model analizy i oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie autobusowej komunikacji miejskiej z zastosowaniem teorii procesów semi-Markowa. W celu zaprezentowania możliwości praktycznego zastosowania opracowanej metody zbudowano model decyzyjny, w którym wybór strategii sterowania (ciągu decyzji) realizowany jest z zastosowaniem decyzyjnych

procesów semi-Markowa oraz niedeterministycznych metod wyboru racjonalnej (suboptymalnej) strategii sterowania, w tym algorytmu symulowanego wyżarzania oraz frontu Pareto. Praktyczne zastosowanie opracowanej metody ma umożliwić wybór racjonalnych decyzji, w trakcie realizacji procesu eksploatacji środków transportu, uwzględniając wartości wybranych funkcji kryterialnych, tzn. ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości do realizacji przydzielonych zadań przewozowych.

1.2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest opracowanie metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu i weryfikacja możliwości jej zastosowania do racjonalnego sterowania procesem eksploatacji przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiednio wysokiego poziomu gotowości użytkowanych obiektów technicznych.

Realizacja badań z zastosowaniem opracowanej metody umożliwi wyznaczenie wartości parametrów i charakterystyk systemu eksploatacji środków transportu, przydatnych do racjonalnego sterowania procesem eksploatacji z uwzględnieniem rozpatrywanych kryteriów oceny.

Dla realizacji celu głównego pracy przyjęto następujące cele szczegółowe, które podzielono na trzy kategorie:

- 1) **cel teoretyczno-poznawczy**, którym jest analiza zagadnień i metod dotyczących oceny ryzyka oraz problemów decyzyjnych w systemach technicznych, a także pozyskanie wiedzy na podstawie wyników przeprowadzonych badań;
- 2) **cel metodologiczny**, którym jest opracowanie metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych przydatnej do sterowania procesem eksploatacji środków transportu;
- 3) **cel utylitarny**, którym jest możliwość zastosowania uzyskanych wyników badań opracowanych modeli do sterowania procesem eksploatacji realizowanym w rzeczywistym systemie eksploatacji autobusów miejskich.

Cel główny pracy zostanie osiągnięty w wyniku realizacji zadań cząstkowych, stanowiących zarówno zakres pracy jak i kolejne etapy opracowania metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu, tzn.:

- analizy literatury,
- wyboru i identyfikacji obiektu badań (systemu eksploatacji środków transportu),
- identyfikacji procesu eksploatacji realizowanego w obiekcie badań,
- opracowania wyników badań eksploatacyjnych,
- zbudowania 21-stanowego grafu modelu procesu eksploatacji i matematycznego modelu procesu eksploatacji realizowanego w obiekcie badań,

- zbudowania modelu oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu,
- zbudowania decyzyjnego modelu sterowania procesem eksploatacji w systemie eksploatacji środków transportu,
- badania i weryfikacji zbudowanych modeli,
- analizy wyników,
- sformułowania wniosków.

2. TEORETYCZNE PODSTAWY PROBLEMATYKI BADAŃ

W celu opracowania metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w złożonym systemie eksploatacji obiektów technicznym (systemie eksploatacji środków transportu) konieczne jest dokonanie wnikliwej analizy dostępnych materiałów źródłowych oraz zdefiniowanie podstawowych pojęć i zagadnień dotyczących problematyki pracy. Kluczowymi pojęciami, wokół których koncentrują się rozważania podjęte w pracy doktorskiej są system i proces eksploatacji, analiza i ocena ryzyka, sterowanie procesem eksploatacji oraz gotowość obiektów technicznych do realizacji przydzielonych zadań. Mając na uwadze cel pracy, na podstawie literatury przedmiotowej, zostały zdefiniowane i omówione poszczególne pojęcia i zagadnienia w sposób uzasadniający celowość opracowania metody oceny ryzyka w obszarze analizowanej problematyki badań.

W ramach analizy literatury przybliżono zagadnienie ryzyka w odniesieniu do systemów technicznych. Dokonano przeglądu dotychczasowych opracowań stanowiących rozwiązania problemu analizy i oceny ryzyka działania złożonych systemów eksploatacji. Ponadto omówiono stosowane metody oceny funkcjonowania systemów eksploatacji. Analizie poddano także zaproponowane w literaturze modele rozwiązań optymalizacyjnych stosowanych w obszarze środków transportu przy uwzględnieniu różnych kryteriów oceny tych modeli. Efekty przeprowadzonej analizy podstaw teoretycznych z zakresu problematyki badań przedstawiono w niniejszym rozdziale.

2.1. ZAGADNIENIE RYZYKA

2.1.1. Ryzyko w systemach eksploatacji obiektów technicznych

Dynamiczny rozwój nauki, techniki oraz informatyzacji wymusza konieczność zapewnienia bezpieczeństwa korzystania z nowych osiągnięć, wynalazków czy systemów technicznych. Miarami bezpieczeństwa mogą być wybrane charakterystyki opisujące analizowany system np. prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia czy ryzyko wystąpienia zdarzenia niepożądanego.

Pojęcie bezpieczeństwa jest silnie związane z pojęciem ryzyka. Wzrastające ryzyko wystąpienia negatywnych skutków zdarzeń powoduje zmniejszenie bezpieczeństwa, natomiast mała wartość ryzyka oznacza wysoki poziom bezpieczeństwa.

Analizę ryzyka przeprowadza się w wielu dziedzinach działalności człowieka. W ekonomii analizuje się m.in. ryzyko inwestycji finansowych, ryzyko zmiany popytu, ryzyko niepowodzenia w przypadku kosztownych innowacji czy niedotrzymania terminów płatności lub niedotrzymania warunków umowy. W obszarze medycyny rozpatruje się np. ryzyko zachorowania lub ryzyko powikłań pooperacyjnych. Szczególną uwagę na ryzyko i bezpieczeństwo zwraca się w przypadku eksploatacji obiektów technicznych. Pod pojęciem

eksploatacji rozumie się zespół celowych działań (organizacyjno-technicznych i ekonomicznych) ludzi z obiektem technicznym oraz wzajemne relacje, występujące pomiędzy nimi od chwili przejścia obiektu technicznego do użytkowania zgodnie z przeznaczeniem, aż do podjęcia decyzji o jego likwidacji [6, 115]. Działania te decydują o efektywności i skuteczności zastosowania obiektu technicznego oraz o możliwości realizacji celów, dla których został on zaprojektowany i wytworzony [76]. W badaniach dotyczących procesów eksploatacji obiektów technicznych ocenia się m.in. ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych związanych z wypadkami, kolizjami i uszkodzeniami obiektów oraz skutkami powstałymi w wyniku ich zaistnienia. Skutki wystąpienia zdarzeń niepożądanych mogą wiązać się z poniesieniem strat materialnych, negatywnym wpływem na środowisko naturalne oraz mieć poważne konsekwencje dla zdrowia i życia ludzkiego.

W ostatnich dwudziestu latach pojawiło się bardzo dużo publikacji z zakresu zagadnień dotyczących ryzyka i bezpieczeństwa technicznego. W części z nich podjęto próbę uporządkowania pojęć i uzyskania jednolitej terminologii dążąc do uniknięcia błędów i nieporozumień na tle odmiennej interpretacji podstawowych definicji np. szkody, zagrożenia, zdarzenia niepożądanego, konsekwencji, ryzyka, analizy i oceny ryzyka. Takim przykładem są m.in. normy dotyczące bezpieczeństwa i ryzyka [70, 72, 73]. Nadal jednak istnieje istotna rozbieżność oraz brak precyzji i konsekwencji w zastosowaniu kluczowych pojęć związanych z omawianą problematyką wśród rodzimych publikacji. Powodem tego stanu rzeczy może być m.in. odmiennosc w tłumaczeniu i interpretacji pojęć pochodzących z języka angielskiego. W tej części pracy dokonano przeglądu literatury polskiej oraz literatury zagranicznej z punktu widzenia terminologii związanej z ryzykiem.

Ryzyko traktowane jest jako jeden z najważniejszych terminów związanych bezpośrednio z kształtowaniem bezpieczeństwa systemów, a jego wartość stanowi podstawę oceny systemu pod względem bezpieczeństwa. Bezpieczeństwo systemu definiowane jest jako jego stan, w którym nie występują zagrożenia, przyjmując, że skutkiem zagrożenia są poniesione straty [108]. Racjonalne kształtowanie bezpieczeństwa systemów jest możliwe jedynie przez systematyczną ocenę jego poziomu w każdej fazie istnienia obiektu technicznego, w szczególności w fazie eksploatacji. Tego typu ocena wymaga opracowania metod i kryteriów oceny ilościowej m.in. z punktu widzenia ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych [26, 62, 70, 72, 73, 76, 78, 79].

W aktach normalizacyjnych można znaleźć wiele definicji ryzyka. Spośród nich wybrano poniższe trzy definicje, najistotniejsze z punktu widzenia realizacji rozprawy doktorskiej:

- ryzyko jest to kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia szkody i ciężkości tej szkody [72];
- ryzyko jest wyrażone jako kombinacja następstwa zdarzenia (z uwzględnieniem zmian okoliczności) i związanego z nim prawdopodobieństwa jego wystąpienia [70];

- ryzyko jest to kombinacja częstości lub prawdopodobieństwa wystąpienia określonego zdarzenia niebezpiecznego i konsekwencji związanych z tym zdarzeniem [73].

Część wspólną definicji ryzyka stanowią pojęcia szkody oraz prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia powodującego tę szkodę. Ustalenie jednolitej terminologii w tym zakresie jest kluczem do dalszych rozważań nad problematyką ryzyka w systemach eksploatacji obiektów technicznych.

Szkoda rozumiana jest jako uraz fizyczny lub pogorszenie stanu zdrowia [72], przy czym norma [73] uzupełnia tę definicję również o uszkodzenie mienia lub degradację środowiska naturalnego. Potencjalnym źródłem szkody (potencjalną zdolnością do wyrządzenia szkody) jest zagrożenie [47, 72]. Inaczej mówiąc zagrożenie jest warunkową możliwością ujawnienia się szkód (strat) w przypadku jego aktywizacji [34]. Zagrożenie ma swoje źródło w postaci obiektu lub zdarzenia a także stanu systemu, w którym w sposób znaczący wzrasta niebezpieczeństwo wystąpienia zdarzeń niepożądanych a nawet katastroficznych [47, 76]. Za zdarzenie katastroficzne uznaje się zdarzenie, w wyniku którego nastąpiła utrata życia lub zdrowia człowieka, samounicestwienie systemu, zniszczenie systemów współistniejących i/lub degradacja środowiska naturalnego [76]. Źródła zagrożenia, nazywane w literaturze również czynnikami zagrożenia lub czynnikami ryzyka, są to twory, których obecność we wskazanym obszarze analiz, stanu czy właściwości jest powodem sformułowania zagrożenia [13, 34]. Należy przy tym zaznaczyć, że zagrożenie niekoniecznie oznacza faktyczne wystąpienie szkody lub wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia szkody [47].

W kontekście badań nad ryzykiem w literaturze używa się pojęć: zdarzenia niebezpiecznego i zdarzenia niepożądanego. Niezależnie od tego, która z nazw użyta jest w definicji ryzyka to wystąpienie każdego z tych zdarzeń prowadzi do powstania szkody.

O zdarzeniu niebezpiecznym mowa jest wtedy, gdy dochodzi do wystąpienia niebezpiecznej sytuacji, konsekwencją której jest powstawanie strat. Sytuacja niebezpieczna nazywana jest również zdarzeniem inicjującym, wynikającym z istniejącego zagrożenia. [47]

Zdefiniowanie zdarzenia niepożądanego stanowi bardziej złożony problem ze względu na to, że interpretacja pojęcia zdarzenia niepożądanego może być różna w zależności od podejścia badacza do rozpatrywanego problemu. Dla jednych badaczy to samo zdarzenie może być traktowane jako pożądane, podczas gdy inni mogą uznać, że to zdarzenie jest niepożądane. [27]

Zdarzenie niepożądane w odniesieniu do systemów technicznych definiowane jest jako okoliczność powstająca w wyniku istniejącego zagrożenia powodująca wystąpienie szkody [3, 47]. Jest to zdarzenie losowe, trudno przewidywalne, bo zależne od sekwencji lub współlistnienia różnych zdarzeń [62]. W eksploatacji systemów technicznych zdarzenie niepożądane jest skutkiem pierwotnego zdarzenia wynikającego z uszkodzenia obiektu, błędu człowieka lub niespodziewanego, katastroficznego stanu środowiska

naturalnego. Traktując obiekty techniczne, ludzi i środowisko naturalne jak elementy systemu eksploatacji, można uznać, że zdarzenie niepożądane zachodzi w chwili niekorzystnego zbiegu okoliczności polegającego na przekroczeniu dopuszczalnych wartości przedziałów zmienności przez jedną lub kilka charakterystycznych cech elementów systemu. Przypisanie każdemu z elementów systemu atrybutu określającego wartość strat związanych ze stanem niezdatności i koniecznością przywrócenia stanu jego zdatności umożliwi oszacowanie całkowitych strat wynikających z wystąpienia zdarzenia niepożądanego [62]. W pracy [109] przedstawiono klasyfikację zdarzeń niepożądanych w odniesieniu do transportu autobusowego ze względu na następujące kryteria:

- rodzaj zdarzenia,
- miejsce zajścia zdarzenia,
- przyczyny zajścia zdarzenia.

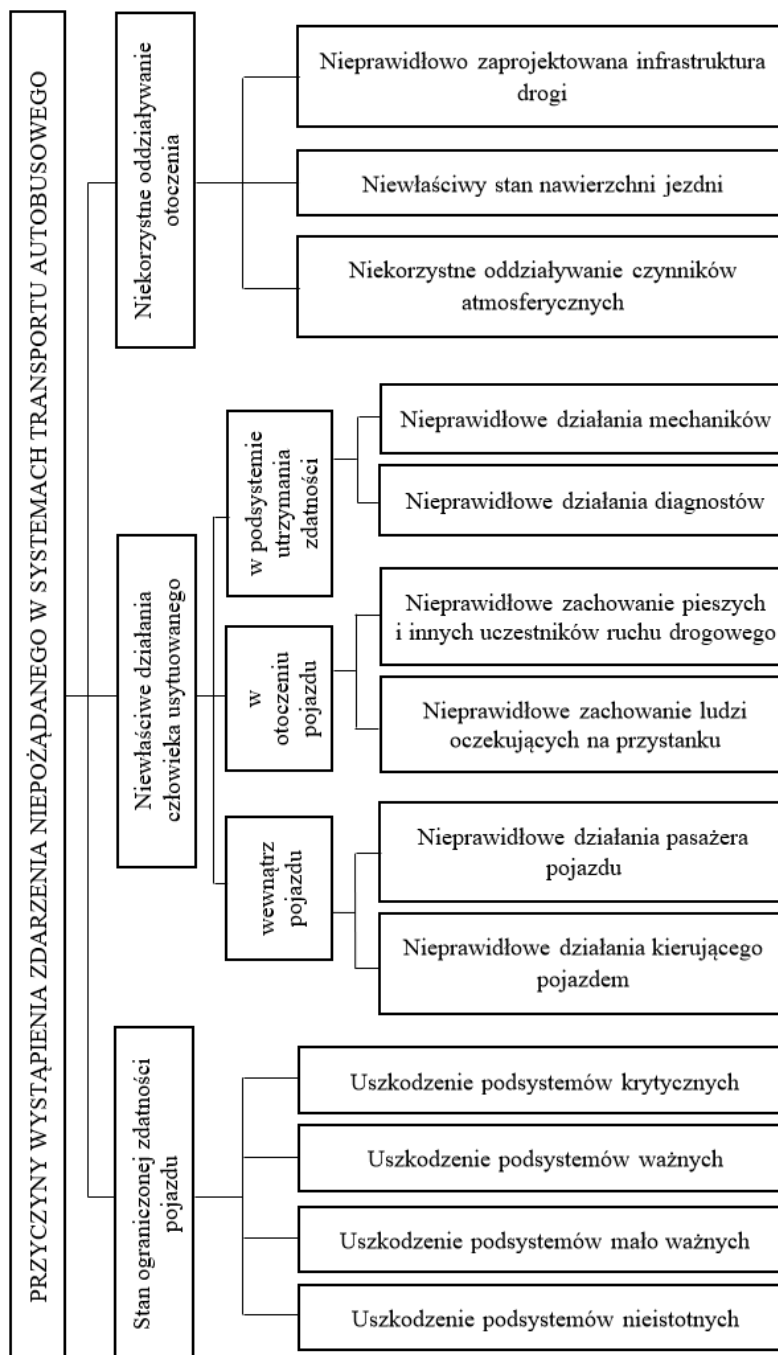
Ze względu na rodzaj zdarzenia niepożądanego i strat z nim związanych wyróżnia się [80, 103, 109]:

- wypadek drogowy – zdarzenie mające miejsce w ruchu drogowym, spowodowane przez naruszenie zasad bezpieczeństwa obowiązujących w tym ruchu, którego skutkiem jest śmierć uczestnika (uczestników) lub obrażenia ciała powodujące naruszenie czynności narządu ciała lub rozstrój zdrowia trwające dłużej niż 7 dni,
- kolizję drogową – zdarzenie powodujące zagrożenie w ruchu drogowym, którego skutkiem są straty materialne lub też uczestnik (uczestnicy) tego zdarzenia doznał obrażeń ciała powodujących naruszenie czynności narządu ciała lub rozstrój zdrowia trwający poniżej 7 dni,
- dewastację pojazdu – świadome działanie ludzi (w tym pasażerów), mające na celu uszkodzenie pojazdu,
- uszkodzenie pojazdu – przekroczenie dopuszczalnych wartości granicznych przez cechy opisujące pojazd, powodujące zmianę jego stanu, ze stanu zdatności do stanu ograniczonej zdatności lub niezdatności.

Według klasyfikacji zdarzeń niepożądanych w zależności od miejsca ich wystąpienia są to zdarzenia powstające [109]:

- na drodze,
- na przystanku autobusowym i w jego obrębie,
- w zajezdni autobusowej,
- w podsystemie zapewniania zdatności,
- wewnątrz pojazdu.

Analizując przyczyny powstawania zdarzeń niepożądanych należy odwołać się do elementów systemu, czyli do człowieka, obiektu technicznego oraz otoczenia i rozpatrywać przyczyny zdarzeń w obszarach związanych z funkcjonowaniem tych elementów [109]. Klasyfikację przyczyn wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemach transportu autobusowego przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Klasyfikacja przyczyn wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemach transportu autobusowego [109]

Analizowane publikacje z zakresu bezpieczeństwa systemów technicznych wskazują, iż najważniejszym elementem systemu jest człowiek, który stanowi zarówno obiekt narażenia na skutki niepożądanych zdarzeń, ale także źródło powstawania sytuacji prowadzących do utraty bezpieczeństwa. Kwalifikacje pracowników, ich naturalne cechy oraz zdolności decydują o prawidłowym użytkowaniu obiektów technicznych i efektywności pracy. Niekorzystne warunki pracy mogą powodować zmęczenie, zaburzenia koordynacji motorycznej, psychicznej czy umysłowej i w konsekwencji prowadzić do zakłóceń pracy a nawet wypadków. Niedostateczna koncentracja lub jej brak są przyczyną nie tylko dezorganizacji systemu, ale również mogą zagrażać życiu lub zdrowiu człowieka [50]. Straty wynikające z doznania uszczerbku na zdrowiu, jego utraty lub w najgorszym przypadku śmierci spowodowanej wypadkiem osiągają wartości praktycznie niemierzalne z punktu widzenia oceny ryzyka i bezpieczeństwa. Ponadto okazuje się, że ingerencja człowieka w systemie technicznym z jednej strony umożliwia identyfikowanie potencjalnych zagrożeń, ale może być również źródłem wielu innych niepożądanych zdarzeń przez nieprawidłowe działania i popełnione błędy [62, 76].

W wielu pracach, w których omawia się zagadnienia analizy i oceny ryzyka pojawia się pojęcie niepewności [16, 47, 51, 79]. Niepewność towarzyszy działaniom we wszystkich fazach istnienia obiektu technicznego i systemu eksploatacji. Wynika ona z braku lub niekompletności wiedzy o obiektywnych przyczynach stanów projektowych, technologicznych i eksploatacyjnych oraz ze świadomości własnych ograniczeń poznawczych. Miarą niepewności jest prawdopodobieństwo, możliwość, czy też wiarygodność wystąpienia określonego zdarzenia [51]. Rozpatrując ryzyko i niepewność w aspekcie uszkodzeń obiektów technicznych w pracy [16] przedstawiono pogląd, że różnica między ryzykiem a niepewnością polega na tym, że w przypadku ryzyka zakłada się, że można określić rozkład prawdopodobieństwa czasu do awarii, co nie ma miejsca w przypadku niepewności.

Istotną różnicę między ryzykiem a niepewnością stanowi stopień dostępnych informacji służących do podejmowania decyzji w złożonych systemach eksploatacji obiektów technicznych. Podejmowanie decyzji w warunkach ryzyka wiąże się z oszacowaniem wyników tej decyzji z pewnym prawdopodobieństwem. W warunkach niepewności trudno jest przewidzieć i właściwie oszacować wyniki podjętych decyzji, nawet z uwzględnieniem stopnia prawdopodobieństwa [8].

Funkcjonowanie złożonych systemów eksploatacji obiektów technicznych obarczone jest zarówno ryzykiem jak i niepewnością, co utrudnia prawidłowe zarządzanie i sterowanie tego typu systemami. Minimalizacja ryzyka wymaga od decydentów m.in. prawidłowej oceny stopnia niepewności otrzymywanych informacji z systemu. W przypadku dysponowania dużą liczbą danych eksploatacyjnych do oceny ryzyka i niepewności stosuje się metody probabilistyczne z zastosowaniem elementów rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej [51]. Celowe jest zatem poszukiwanie rozwiązań

umożliwiających ocenę funkcjonowania systemu oraz prawidłowe (racjonalne) sterowanie tym systemem przez decydentów z punktu widzenia różnych kryteriów, w tym również dotyczących bezpieczeństwa.

Znane w literaturze sposoby minimalizacji ryzyka zmierzają do zapobiegania jego powstawania, co nazywane jest bezpieczeństwem aktywnym oraz zmierzają do łagodzenia jego skutków, czyli tzw. bezpieczeństwo pasywne. Zapobieganie jest działaniem zmniejszającym częstotliwość występowania niepożądanego zdarzenia, podczas gdy łagodzenie skutków jest działaniem zmniejszającym konsekwencje tego zdarzenia [47].

Wiele metod przypisanych do analizy ryzyka jest zbieżnych z metodami analizy niezawodności systemów technicznych. Związek teorii niezawodności z ryzykiem i bezpieczeństwem jest szeroko opisywany w literaturze przedmiotu [51, 62, 76, 78, 96]. Wynika to w szczególności z faktu, że zawodność systemu technicznego oraz błędy człowieka (operatora systemu) stanowią potencjalne zagrożenie bezpieczeństwa [76]. Ryzyko w rozważaniach niezawodnościowych odnosi się zarówno do obiektu technicznego jak i całego systemu eksploatacji. Przedział czasu do wystąpienia dowolnego zdarzenia lub zjawiska, np. uszkodzenia, wypadku, niekorzystnych zmian otoczenia (grad, burza, oblodzenie) należy rozpatrywać w kategoriach zmiennej losowej. W takim przypadku powyższym zdarzeniom i zjawiskom można przypisać określone prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Za pomocą działań profilaktycznych, np. diagnozowań czy napraw prewencyjnych, można wpływać na zmianę wartości prawdopodobieństwa wystąpienia niektórych zdarzeń losowych, ale nie można uzyskać pewności, że zdarzenia takie wystąpią w danej chwili. W określonych warunkach otoczenia oraz ramach czasowych można przyjąć, że prawdopodobieństwo poprawnego działania systemu eksploatacji będzie stosunkowo duże dzięki zastosowaniu m.in. współczynników (wskaźników) bezpieczeństwa [51, 96]. Wskaźnikiem bezpieczeństwa systemu jest każda charakterystyka funkcyjna lub liczbowa określająca stan bezpieczeństwa systemu, np. charakterystyki probabilistyczne czasu przebywania systemu w wyróżnionym stanie [76].

W obszarze problematyki ryzyka związanego z funkcjonowaniem obiektów technicznych w wielu pracach (publikacjach) autorzy dużą uwagę zwracają na termin uszkodzenie, traktowane jako każde zakłócenie w działaniu maszyny lub jej zasilaniu energią powodujące utratę zdolności do spełniania wymaganej funkcji przez maszynę w danym przedziale czasu. Utrata możliwości realizacji zadania przez obiekt techniczny oznacza utratę stanu jego zdatności. Stan zdatności jest zatem definiowany jako stan, w którym maszyna może realizować funkcje zgodne z wymaganiami sformułowanymi w dokumentacji technicznej [76, 116]. Dane o uszkodzeniach stanowią również wiarygodne źródło informacji o stanie obiektu, zdarzeniach eksploatacyjnych i relacjach między nimi. Czynniki wywołujące uszkodzenia obiektów technicznych są związane bądź z samym obiektem i realizowanymi przez obiekt zadaniami lub funkcjami, bądź z jego otoczeniem [50, 76]. Klasyfikację uszkodzeń przeprowadza się na podstawie

różnych kryteriów oceny. Klasyfikacja uszkodzeń w odniesieniu do przyjętego kryterium oceny przedstawiono w tabeli 2.1.

Tab. 2.1. Klasyfikacja uszkodzeń ze względu na przyjęte kryteria oceny [50, 116]

L.p.	Kryterium	Klasyfikacja uszkodzeń
1	Przyczyna uszkodzenia	<ul style="list-style-type: none"> - przypadkowe, o stałym ryzyku wystąpienia w procesie eksploatacji; uszkodzeniom takim podlegają elementy, których stan techniczny nie zależy od czasu funkcjonowania, - spowodowane błędami wytwarzania i obsługi o gasnącym ryzyku występowania w procesie eksploatacji, występujące najczęściej w początkowym okresie eksploatacji, - spowodowane procesami zużycia i starzenia się elementów o rosnącym ryzyku występowania w procesie eksploatacji; tego typu uszkodzenia pojawiają się przede wszystkim w końcowym okresie eksploatacji, - spowodowane nieprzebraniem założonych warunków eksploatacji, np. przeciążeniami różnej natury; rozkład tych uszkodzeń w czasie jest na ogół nieznany; przyjmuje się najczęściej stałe ryzyko ich występowania w procesie eksploatacji.
2	Charakter uszkodzenia	<ul style="list-style-type: none"> - pierwotne (niezależne), czyli takie, których pojawienie się nie było wywołane innym uszkodzeniem, - wtórne (zależne), jeżeli uszkodzenie jednego urządzenia zostało spowodowane wystąpieniem uszkodzenia w innym urządzeniu, - łączne, czyli uszkodzenia różnych elementów tego samego urządzenia występujące jednocześnie, - pojedyncze, gdy uszkodzenia elementów tego samego urządzenia nie występują jednocześnie.
3	Tempo powstania uszkodzenia	<ul style="list-style-type: none"> - stopniowe, gdy wartość obciążenia zewnętrznego stopniowo się zwiększa i/lub wytrzymałość obiektu stopniowo się pogarsza, - nagle, gdy niespodziewanie zmienia się wartość obciążenia lub następuje nagły spadek wytrzymałości obiektu.
4	Wpływ na możliwość funkcjonowania obiektu technicznego	<ul style="list-style-type: none"> - krytyczne, wykluczające możliwość dalszego użytkowania obiektu, - ważne, wymagające niezwłocznego podjęcia działań związanych z przywróceniem zdatności obiektu, - mało ważne, umożliwiające dalsze użytkowanie obiektu, ale wymagające podjęcia działań związanych z przywróceniem zdatności obiektu, - nieistotne, pomijalne w zakresie wpływu na funkcjonowanie obiektu.

cd. tab. 2.1. Klasyfikacja uszkodzeń ze względu na przyjęte kryteria oceny [50, 116]

5	Rozległość skutków	- usterka , - uszkodzenie , - awaria , - zniszczenie .
6	Możliwość przywrócenia stanu zdatowności obiektowi	- usuwalne , zwane czasowymi lub chwilowymi, - nieusuwalne , zwane stałymi.

W literaturze istnieją opisy metod, których praktyczne zastosowanie ma na celu zmniejszenie liczby oraz przeciwdziałanie występowaniu uszkodzeń obiektów technicznych w trakcie procesu eksploatacji. Są nimi [116]:

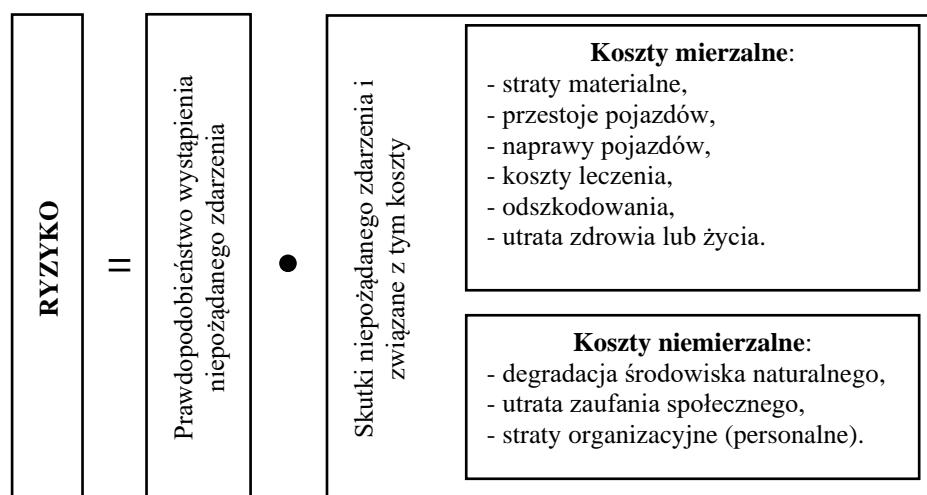
- racjonalna eksploatacja obiektów w zadanych warunkach i określonym przeznaczeniu,
- badanie stanu obiektów i monitorowanie rozwijających się uszkodzeń metodami diagnostycznymi,
- przestrzeganie wymagań określonych w dokumentacji techniczno-ruchowej (DTR) w zakresie częstotliwości i zakresu czynności obsługi technicznych,
- badania statystyczne uszkodzeń w celu modernizacji (wprowadzenia zmian konstrukcyjnych) obiektów, racjonalizacji gospodarki częściami zamiennymi itp.

Nieprawidłowa eksploatacja obiektów technicznych powoduje zwiększenie intensywności oddziaływania procesów zużycia prowadzących do przedwczesnych uszkodzeń i zagrożeń bezpieczeństwa. Każde powstałe uszkodzenie wiąże się ze wzrostem wartości ryzyka wystąpienia zdarzenia niepożądanego [50, 62, 72, 116].

Wystąpienie zdarzenia niepożądanego w systemie eksploatacji środków transportu powoduje powstanie szeregu skutków i związanych z nimi kosztów. W praktyce eksploatacyjnej dużo uwagi poświęca się analizie zagadnienia kosztów, m.in. w pracach [66, 115]. W aspekcie ryzyka występowania zdarzeń niepożądanych w systemach technicznych i jego definicji, koszty generowane w wyniku wystąpienia tych zdarzeń można podzielić na mierzalne i niemierzalne. Klasyfikację kosztów zdarzeń niepożądanych występujących w obszarze środków transportu przedstawiono na rysunku 2.2.

Ze względu na różnorodność oraz wielkość strat trudnym zadaniem jest ustalenie jednolitej, odpowiadającej każdemu ze skutków miary strat. W szczególności trudności tego typu pojawiają się w przypadku utraty życia ludzkiego, które ze względów etycznych jest wartością niemierzalną. Z drugiej strony dla celów ekonomicznych czy zapewnienia bezpieczeństwa, np. przez ocenę ryzyka, życie ludzkie przyjmuje wartość mierzalną w postaci walutowej [78]. Podobnie jest w przypadku strat związanych z degradacją środowiska

naturalnego w wyniku zaistnienia zdarzenia niepożądanego. Straty ekologiczne, powstałe pierwotnie, stanowią koszty łatwo mierzalne i możliwe do wyrażenia w ujęciu wartościowym, natomiast straty wtórne, np. wzrost śmiertelności noworodków czy wzrost przedwczesnych zgonów spowodowanych zanieczyszczeniem powietrza i degradacją środowiska naturalnego są często niemożliwe do wyznaczenia [92].



Rys. 2.2. Koszty wystąpienia zdarzeń niepożądanych w aspekcie definicji ryzyka (opracowano na podstawie [78])

W realizowanej rozprawie doktorskiej przyjęto, że jako zdarzenia niepożądane w systemach eksploatacji środków transportu rozumie się uszkodzenia, kolizje i wypadki pojazdów występujące w trakcie realizacji przydzielonych zadań przewozowych powodujące zakłócenie realizacji tych zadań oraz związaną z nimi możliwość poniesienia straty (szkody) w wyniku podjęcia działań zmierzających do usunięcia skutków tych zdarzeń. Szkodą wynikającą z wystąpienia zdarzenia niepożądanego jest poniesienie kosztów związanych z koniecznością naprawy obiektu (autobusu miejskiego), zastosowania pojazdu zastępczego, interwencji jednostek pogotowia technicznego lub konieczności wymiany obiektu na nowy.

Na podstawie powyższych rozważań dla realizacji celu niniejszej rozprawy doktorskiej przyjęto definicję ryzyka:

Ryzyko jest to iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia niepożądanego zdarzenia i miar jego skutków.

Do wyznaczenia wartości ryzyka w ramach zaproponowanej metody jego oceny oraz późniejszej weryfikacji możliwości jej praktycznego zastosowania uwzględniono koszty wynikające ze strat (szkód) poniesionych wyłącznie w badanym systemie eksploatacji obiektów technicznych, pomijając tym samym

koszty strat otoczenia (środowiska naturalnego, infrastruktury drogowej, itd.) oraz koszty utraty zdrowia lub życia ludzkiego, odszkodowań i ewentualnego leczenia.

2.1.2. Stosowane metody oceny ryzyka

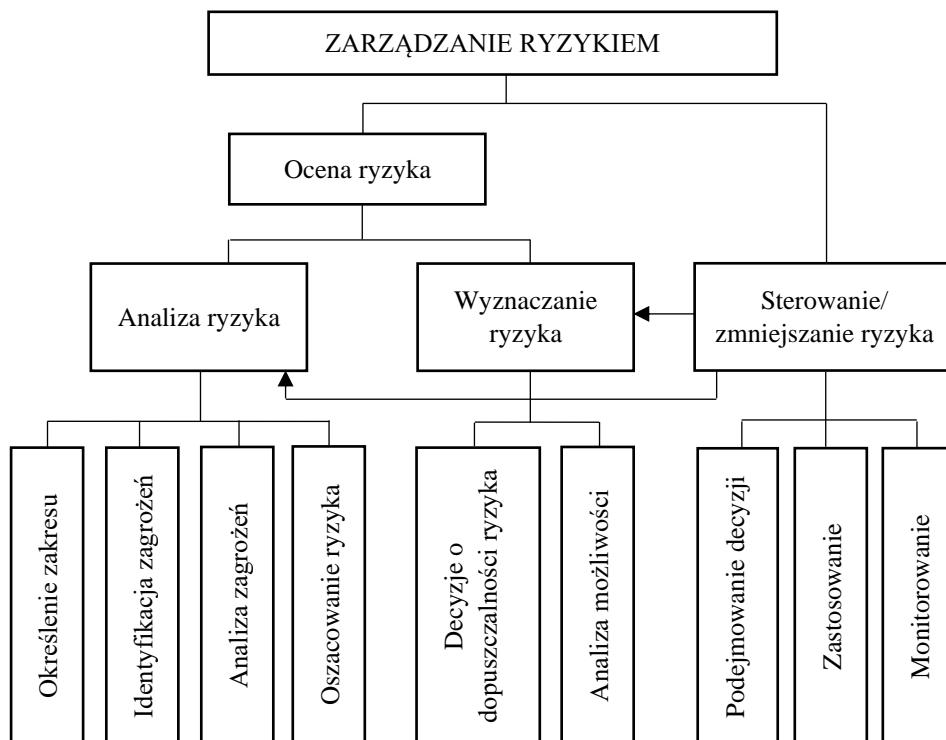
W procesie zapewnienia bezpieczeństwa funkcjonowania obiektów technicznych konieczne jest umiejętne zarządzanie ryzykiem. Wieloletnie analizy występujących zagrożeń i sposobów ich minimalizacji umożliwiły opracowanie programu zarządzania ryzykiem obejmującego: ocenę ryzyka (analizę i wyznaczenie ryzyka) oraz jego sterowanie (reagowanie na ryzyko). Zarządzanie ryzykiem stanowi szereg czynności, które mogą być zrealizowane na każdym etapie funkcjonowania obiektu technicznego, rozpoczynając od projektowania i konstruowania, poprzez wytwarzanie i eksploatację aż do jego likwidacji. Zarządzanie ryzykiem dotyczy wykrywania zagrożeń, przyczyn ich powstawania oraz poszukiwania zdarzeń inicjujących i towarzyszących rozwojowi ich skutków. Ponadto obejmuje wartościowanie ryzyka i określanie jego poziomu akceptowalności, a także generowanie sposobów ograniczania ryzyka. [3, 10, 72, 78, 99]

Bogata literatura przedmiotu przedstawia wiele programów lub schematów zarządzania ryzykiem. Na szczególną uwagę z punktu widzenia zarządzania ryzykiem w aspekcie funkcjonowania obiektów technicznych zasługują prace [3, 29, 31, 47, 70, 72, 73, 99]. Dla przytoczonych publikacji wyróżnia się cechy wspólne, na które składają się: analiza ryzyka, wyznaczanie ryzyka, ocena ryzyka oraz sterowanie ryzykiem lub reagowanie na ryzyko. Przykładowy program zarządzania ryzykiem został przedstawiony na rysunku 2.3.

Ocena ryzyka jako jeden z elementów stanowiących podstawę zarządzania ryzykiem jest szeregiem logicznych etapów umożliwiających analizę i wyznaczenie ryzyka w usystematyzowany sposób [72]. Z założenia ocena ryzyka powinna umożliwiać wytypowanie zagrożeń i zdarzeń niepożądanych, wyznaczenie częstotliwości i wielkości strat, określenie akceptowalnej wartości ryzyka, a w kolejnych etapach związanych z reagowaniem na ryzyko opracowanie rankingu ryzyka, skatalogowanie przedsięwzięć, które należy podjąć oraz oszacowanie czasu, po którym ryzyko może osiągnąć wartość krytyczną [1, 78].

W celu ujednoczenia stosowanej terminologii, na podstawie pracy [3], ocenę ryzyka można zapisać w postaci sumy dwóch składowych:

$$\begin{aligned} \textit{Analiza ryzyka} + \textit{Wyznaczenie (wartościowanie/ewaluacja) ryzyka} &= \textit{Ocena} \\ &\textit{ryzyka} \\ \textit{Risk analysis} + \textit{Risk evaluation} &= \textit{Risk assessment} \end{aligned}$$



Rys. 2.3. Elementy programu zarządzania ryzykiem [78]

Analiza ryzyka polega na systematycznym zastosowaniu wszystkich dostępnych informacji w celu rozpoznania źródeł zagrożeń, identyfikacji zagrożeń oraz oszacowania ryzyka we wskazanym obszarze analiz. Analiza ryzyka powinna być przeprowadzona przez zespół ekspertów, których cechuje bardzo dobra znajomość stosowanych metod i analizowanego systemu. Etapy tej analizy obejmują [1, 3, 72, 73, 78, 86]:

- określenie obszaru, celu i zakresu analizy;
- identyfikację zagrożeń;
- analizę zagrożeń;
- dobór modeli i miar ryzyka oraz oszacowanie ryzyka.

Obszarem analiz może być określony system, obszar funkcjonowania konkretnych obiektów technicznych czy też innego rodzaju obszar, dla którego istnieje potrzeba prowadzenia badań nad powstawaniem szkód i/lub ryzykiem. We wstępnym etapie analizy ryzyka formułowane są cele i definiowane kryteria analizy przy jednoczesnym określeniu ograniczeń dotyczących badanego systemu lub obiektu technicznego oraz ustalenie wymaganego rezultatu badań umożliwiających wsparcie procesu decyzyjnego.

Wskazanie obszaru analiz oraz określenie celu i ich zakresu umożliwia w dalszej kolejności realizację procedury identyfikacji zagrożeń. Na identyfikowanie zagrożeń składają się następujące procesy [34, 44]:

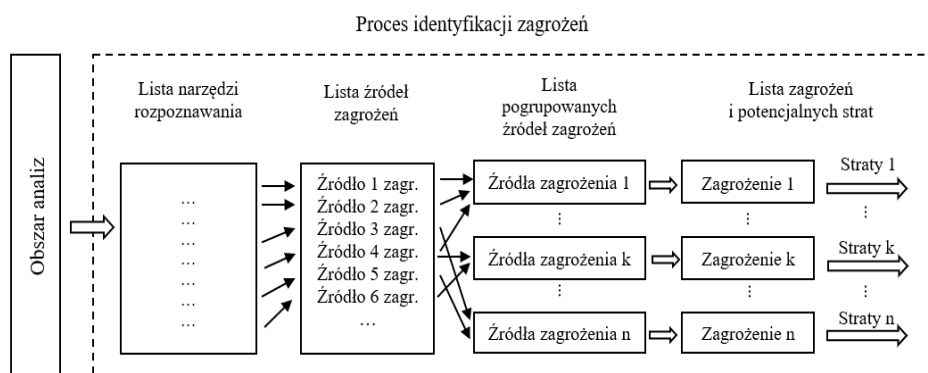
- rozpoznawanie źródeł zagrożeń,
- grupowanie źródeł zagrożeń,
- formułowanie zagrożeń,
- wskazanie wielkości szkód (strat) wynikających z aktywizacji zagrożeń – wskazanie konsekwencji.

Etap rozpoznawania źródeł zagrożeń ma na celu wytypowanie źródeł zagrożeń, które mogą w konsekwencji spowodować wystąpienie zdarzeń niepożądanych, szkód (strat) i obniżenie poziomu bezpieczeństwa. Do rozpoznawania źródeł zagrożeń stosowane są różne metody i techniki, opisywane w literaturze w sposób teoretyczny oraz na przykładach, m.in. [3, 21, 34, 44]. Wśród nich wyróżnia się techniki oparte na opinii ekspertów przy zastosowaniu wiedzy inżynierskiej, metodę „burzy mózgów” i listy kontrolne. Przykłady stosowania list kontrolnych w celu rozpoznawania źródeł zagrożeń przedstawiono w pracach [19, 34]. Źródła zagrożeń rozpoznawane są także na podstawie przeglądu dokumentacji technicznej obiektów i procesów realizowanych w badanym systemie, analizowania norm i standardów bezpieczeństwa, wywiadów oraz wizji terenowych, analizy statystyk, raportów i wyników bieżących badań występujących zdarzeń.

Wymienione techniki stanowią podstawę do zastosowania bardziej zaawansowanych metod np. FMEA, HAZOP, SWIFT [3].

Z rozpoznanych źródeł zagrożeń w kolejnym etapie prac tworzona jest lista a następnie są one podzielone na ustalone grupy, które odpowiadają za powstawanie danego zagrożenia. W efekcie formułowane są zagrożenia oraz wskazywane potencjalne straty, które mogą wynikać z ich aktywizacji.

Schemat ideowy procesu identyfikacji zagrożeń przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Schemat ideowy procesu identyfikacji zagrożeń [34, 44]

Biorąc pod uwagę pewien określony kierunek realizacji procesu identyfikacji zagrożeń przyjmuje się, że można je identyfikować „w przód”, czyli na podstawie pojedynczych przyczyn (źródeł zagrożeń) sformułować zagrożenia i wyciągnąć z nich uzasadnione wnioski (wskazać możliwe do wystąpienia zdarzenia niepożądane) lub „wstecz”, co oznacza przyporządkowanie istniejącym zdarzeniom niepożądanym pewnej grupy źródeł zagrożeń i identyfikację tych zagrożeń (poszukiwanie nieznanych przyczyn do znanych skutków) określane jako backward hazard identification proces (BHIP) [21, 102].

Prawidłowa identyfikacja zagrożeń umożliwia analizę zagrożeń, obejmującą ustalenie przyczyn powstawania zagrożeń i zdarzeń inicjujących oraz możliwych konsekwencji dla każdego zidentyfikowanego zagrożenia (ustalenie możliwych związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy określonym zagrożeniem a związanymi z nim konsekwencjami).

Ostatnim etapem analizy ryzyka jest dobór modeli i miar ryzyka oraz oszacowanie poziomu ryzyka. Poziom ryzyka jest to wielkość ryzyka lub kombinacji ryzyk, wyrażona w postaci kombinacji następstw oraz ich prawdopodobieństwa [70]. Wybór modelu do analizy ryzyka i jego miary zależy jest od decydenta analizowanego systemu oraz od rodzaju ryzyka. Szacowanie ryzyka polega na analizie szeregu podstawowych aspektów ryzyka i obejmuje analizę częstości, analizę konsekwencji oraz obliczenie ryzyka, np. szacując stopień ciężkości możliwej szkody ustala się czy dotyczy ona również ludzi, jakiego typu urazy mogą powstać w jej wyniku (odwracalne, nieodwracalne), czy mogą być ofiary śmiertelne; przyjętym miarom ryzyka nadaje się odpowiednie wartości np. wartość prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń niepożądanych, wartość strat w wyniku zaistnienia zdarzenia.

Istnieje wiele metod analizy ryzyka. Zgodnie z normą [73] do analizy ryzyka zastosowanie mają metody jakościowe i ilościowe. Metody jakościowe oceny i analizy ryzyka pozwalają ustalić względną wartość ryzyka na podstawie doświadczeń, czyli dotychczas znanych zagrożeń w obrębie systemu i subiektywnej oceny występujących zdarzeń wykorzystując dostępne tablice, matryce, nomogramy i wykresy. W przypadku zastosowania metod jakościowych nie ma konieczności ilościowego określania skutków i częstotliwości występowania zdarzeń niepożądanych. W związku z tym wskazują one jedynie ogólne obszary ryzyka, które w miarę potrzeb należałoby szczegółowo przeanalizować stosując inne metody analizy ryzyka, np. metody ilościowe. Sformułowanie definicji ryzyka stało się podstawą do budowy ilościowych modeli ryzyka. Dla metod ilościowych wyznacza się prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia oraz miary jego skutków, czyli ilościowe konsekwencje związane z wystąpieniem niepożądanego zdarzenia określone np. za pomocą poniesionych kosztów (strat). [75, 78]. Ilościowe metody analizy ryzyka wymagają współpracy matematyków oraz zastosowania programów służących do kalkulacji i przeliczeń, które pozwolą określić i zrozumieć wiele parametrów ryzyka prezentowanych w sposób liczbowy.

W aspekcie praktycznym częściej stosuje się metody jakościowe ze względu na ich uniwersalność i ścisłe procedury zastosowania [75].

Analiza ryzyka stanowi dogodne źródło informacji diagnostycznych, niezbędnych w tworzeniu procedur awaryjnego obsługiwanie obiektów, a także dostarcza danych do modelowania zagrożeń w procesie eksploatacji [18, 47, 62, 79, 95].

W ocenie ryzyka obok jego analizy kluczową kwestią jest wyznaczenie ryzyka, nazywane także jego wartościowaniem lub ewaluacją. Ewaluacja ryzyka polega na porównaniu poziomu ryzyka zidentyfikowanego w procesie jego analizy z przyjętymi kryteriami. Porównanie tego typu wymaga dużej rzetelności i dokładności. W konkretnym obszarze analizy systemu wyznaczenie ryzyka polega na sprawdzeniu klasy (kategorii) ryzyka (zwykle akceptowalnej, tolerowanej, nieakceptowalnej), do której należy oszacowane ryzyko. W ten sposób ocenia się, czy oszacowane ryzyko mieści się w granicach akceptacji lub tolerancji [31, 75].

Ewaluacja ryzyka jest zatem procesem porównywania wartości ryzyka z zadanymi kryteriami ryzyka w celu określenia jego wagi i przypisaniu do odpowiedniej kategorii. Akceptowalna wartość ryzyka oznacza, że obliczone według określonej miary ryzyko jest niższe niż wcześniej ustalona (oczekiwana) jego wartość. Ryzyko może nie być akceptowalne, ale może mieścić się w przyjętych granicach tolerancji i wtedy mowa jest o tolerowalnej wartości ryzyka. Jeżeli obliczona wartość ryzyka przewyższa ustaloną wartość (nie mieści się w granicach tolerancji) to ryzyko jest nieakceptowalne [3, 75].

W celu wyznaczenia kategorii ryzyka określany jest poziom ryzyka - przyjęty, wyznaczony lub wyliczony przez podmiot zarządzający ryzykiem, na którego zapotrzebowanie szacowane było ryzyko. W zależności od potrzeb można wyodrębnić kilka poziomów ryzyka – najczęściej od 3 do 5, np. bardzo wysoki, wysoki, istotny, niski, pomijalny. Dla wyróżnionych poziomów ryzyka określa się kategorię ryzyka. Przykład wartościowania ryzyka w stosunku do wyznaczonego poziomu przedstawiono w tabeli 2.2.

Tab. 2.2. Schemat wartościowania ryzyka w odniesieniu do poziomów ryzyka [97]

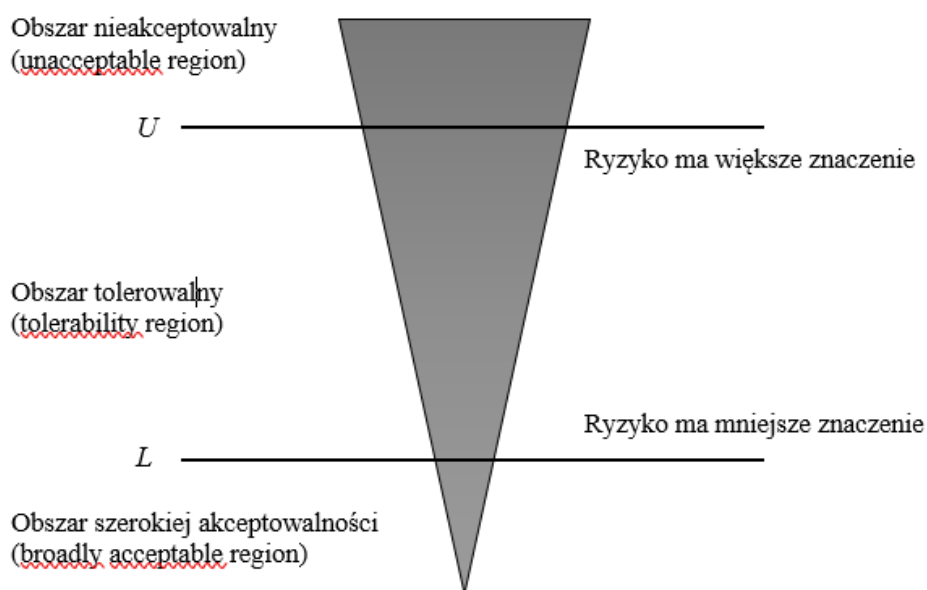
Kategoria ryzyka	Poziom ryzyka
Nieakceptowalne	bardzo wysoki
	wysoki
Tolerowalne	istotny
Akceptowalne	niski
	pomijalny

Ważnym aspektem oceny ryzyka jest opracowanie metody umożliwiającej przełożenie wyników analizy ryzyka na zalecenia dotyczące dopuszczalności ryzyka i jego zakresu. Punktem wyjścia jest znalezienie kryterium, według którego należy wyodrębnić poszczególne poziomy ryzyka [99]. Wybór

kryterium, jak również wartości tego kryterium wyznaczające odpowiednie poziomy ryzyka są indywidualną kwestią osoby zarządzającej badanym systemem. Dla jednych dana wartość ryzyka może być wartością akceptowalną, natomiast ta sama wartość dla innych decydentów może być nieakceptowalna. Dla przykładu w systemach transportowych, których nadrzędnym celem funkcjonowania jest realizacja zadań przewozowych na rzecz komunikacji publicznej, konkretna wartość ryzyka wyliczona w PLN/h (oznaczająca np. koszty jednostkowe ponoszone przez przedsiębiorstwo) może być ryzykiem akceptowalnym, podczas gdy dla przedsiębiorstwa prywatnego będzie zaledwie ryzykiem tolerowalnym lub nawet nieakceptowalnym (poniesione koszty spowodują mniejszy niż zakładany dochód dla przedsiębiorstwa).

Najczęściej spotykany jest trójstopniowy podział ryzyka: na ryzyko akceptowalne, tolerowalne oraz nieakceptowalne, jak np. w opracowaniach [12, 20, 47, 68, 97].

Gdy zostanie wybrane kryterium oceny ryzyka i wyodrębnione poziomy tego ryzyka ocenę przeprowadza się zazwyczaj w sposób graficzny, za pomocą macierzy lub rysunku, przedstawiający podział na kategorie ryzyka. Poniżej na rysunku 2.5 i w tabeli 2.3 przedstawiono sposoby kategoryzacji ryzyka najczęściej prezentowane w literaturze.



Rys. 2.5. Kategoryzacja ryzyka na podstawie [47, 68]: L-lower level, U-upper level

Strefa znajdująca się w górnej części rysunku 2.5 oddzielona poziomą linią U oznaczającą wyższy poziom ryzyka stanowi obszar nieakceptowalności, w którym poziom ryzyka uznaje się za niedopuszczalny bez względu na poziom

korzyści związanych z realizowanym przedsięwzięciem. Strefa dolna oddzielona linią L (lower level) jest obszarem o szerokiej akceptowalności, gdzie ryzyko traktowane jest zwykle jako małe i nieistotne oraz odpowiednio kontrolowane. [47, 68]

Obszar znajdujący się pomiędzy liniami L i U jest obszarem ryzyka tolerowalnego. Oznacza to możliwość funkcjonowania systemu w określonych warunkach ryzyka w celu osiągnięcia korzyści, mając jednocześnie na uwadze, że to ryzyko jest warte podjęcia i prawidłowo kontrolowane. W tym obszarze znajduje zastosowanie zasada ALARP (as low as reasonably practicable), zgodnie z którą ryzyko zostało obniżane do chwili, gdy było to uzasadnione i wykonalne, a kolejne próby obniżenia ryzyka wiążą się z nieproporcjonalnie wysokim kosztem w stosunku do unikniętego ryzyka. [47, 68]

Bardzo popularnym i uniwersalnym narzędziem stosowanym do oceny ryzyka jest macierz ryzyka (matryca ryzyka lub matryca skutek/prawdopodobieństwo). Umożliwia ona ocenę ryzyka ze wskazaniem, które z rodzajów ryzyka wymagają dalszej lub głębszej analizy, które podjęcia działań zapobiegawczych, a które są tolerowalne z punktu widzenia prawdopodobieństwa ich wystąpienia oraz konsekwencji jakie się z nimi wiążą [75]. Uniwersalność matrycy polega na tym, że nie istnieją jasno wytyczone wymagania oraz ramy dotyczące wyznaczenia prawdopodobieństw wystąpienia zdarzeń oraz ich konsekwencji. Klasyfikację zdarzeń, prawdopodobieństwa ich wystąpienia i ich skutki rozpatrywane są indywidualnie w odniesieniu do badanego problemu i prowadzonej analizy. Ustalając, na podstawie obserwacji i/lub doświadczeń, które ze zdarzeń niepożądanych występują najczęściej, często, niezbyt często, sporadycznie lub wcale według pewnej określonej skali, można wyznaczyć prawdopodobieństwa zajścia tych zdarzeń. W aspekcie konsekwencji przyjmuje się, że mogą być one np. małe, średnie, duże, ekstremalne lub krytyczne (w zależności od nazewnictwa przyjętego w danym opracowaniu). Z reguły analizowanym kryteriom przypisuje się pewną ustaloną wartość punktową, a następnie wylicza się iloczyn tych wartości [93]. Taka analiza prowadzi do sporządzenia matrycy, która często przyjmuje postać 3x3, 4x4 lub 5x5, np. [1, 74, 110]. W zależności od potrzeb budowane są mniejsze macierze lub większe, bardziej rozbudowane macierze, w których podziały możliwych konsekwencji i prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń niepożądanych są bardziej szczegółowe.

W tabeli 2.3 przedstawiono macierz ryzyka w postaci 3x3. W macierzy przedstawiono przykładowe wartości ryzyka.

Wyliczone na podstawie ustalonych kryteriów wartości ryzyka mogą oznaczać odpowiednie poziomy ryzyka np.: 1 – poziom pomijalny, 2 – poziom niski, 3 i 4 – poziom istotny, 6 – poziom wysoki, 9 – poziom bardzo wysoki. Na podstawie wyznaczonych poziomów ryzyka przeprowadza się jego wartościowanie metodą punktową, czyli klasyfikację ryzyka według jego kategorii. Z reguły przyjmuje się skalę dwóch lub trzech kategorii ryzyka np. akceptowalne, nieakceptowalne (dopuszczalne, niedopuszczalne) [74, 100] lub

akceptowalne, tolerowalne, nieakceptowalne [110]. Dla powyższego przykładu kolorem zielonym oznaczono ryzyko akceptowalne (punktacja 1÷2), żółtym tolerowalne (punktacja 3÷4), a czerwonym nieakceptowalne (punktacja 5÷9). Ponadto dla określonej kategorii ryzyka definiuje się sposoby postępowania z tym ryzykiem. Przykładowo dla ryzyka akceptowalnego (dopuszczalnego) zakłada się utrzymywanie ryzyka na tym samym poziomie oraz zaplanowanie i podjęcie działań (w przypadku wyższych wartości ryzyka w kategorii ryzyka akceptowalnego) w celu jego ograniczenia. Dla ryzyka nieakceptowalnego (niedopuszczalnego) należy natychmiast podjąć działania w celu zmniejszenia tego ryzyka. [74]

Tab. 2.3. Przykładowa macierz ryzyka na podstawie m.in. [74]

PRAWDOPODOBIENSTWO	KONSEKWENCJE		
	małe	średnie	duże
mało prawdopodobne	1	2	3
prawdopodobne	2	4	6
bardzo prawdopodobne	3	6	9

W procesie zarządzania ryzykiem ostatnim krokiem a zarazem rezultatem oceny ryzyka jest podjęcie decyzji o dalszym postępowaniu z ryzykiem na podstawie otrzymanego rankingu ryzyka oraz analiza możliwości reakcji w danej kategorii ryzyka. Decyzja polega w szczególności na tym, aby wytypować ryzyka wymagające pogłębionej analizy i podjęcia dalszych działań.

Realizacja szeregu zaplanowanych działań mających na celu racjonalne zarządzanie oraz minimalizację ryzyka w procesie podejmowania decyzji nazywana jest sterowaniem ryzykiem [73]. Prawidłowe sterowanie oparte na analizie i ocenie ryzyka umożliwia wytypowanie potencjalnych zagrożeń w danej działalności oraz ich kontrolowanie, minimalizację czy nawet eliminację. W literaturze obok sterowania ryzykiem używa się pojęcia reagowanie na ryzyko. Pod każdym z tych pojęć rozumiane jest podejmowanie decyzji, wdrożenie pewnych działań mających na celu unikanie, redukcję, przenoszenie lub akceptowanie ryzyka a także jego monitorowanie i komunikowanie o nim poprzez przekazywanie lub wymianę informacji pomiędzy osobami podejmującymi decyzję zarządczą a użytkownikami systemu transportowego. [13, 31, 34, 86]

Ryzyko w systemach transportowych można rozpatrywać w wielu aspektach, ze względu na [13, 86]:

- źródła zagrożenia (ryzyko: techniczne, osobowe, środowiskowe);
- strategię oceny ryzyka (ryzyko: indywidualne, społeczne);
- obiektywność/subiektywność oceny (ryzyko: obiektywne, subiektywne, właściwe);
- sposób oceny (ryzyko: ilościowe, jakościowe, mieszane);

- charakter strat (ryzyko: osobowe, materialne, środowiskowe, ekonomiczne);
- horyzont czasowy (ryzyko: operacyjne, taktyczne, strategiczne);
- kryterium dopuszczalności działania (ryzyko: akceptowalne, tolerowane, nieakceptowalne);
- możliwości kwantyfikacji, uogólniania i wnioskowania (ryzyko: rzeczywiste, probabilistyczne, estymowane).

Zgodnie z międzynarodowym standardem [29] przyjmuje się, że istnieje 31 metod i narzędzi stosowanych do oceny ryzyka. W normie [29] scharakteryzowano każdą z metod z punktu widzenia ich przydatności do identyfikacji zagrożeń, wytypowania konsekwencji tych zagrożeń, wyznaczenia prawdopodobieństwa ich wystąpienia, wyznaczenia poziomu ryzyka (szacowania ryzyka) oraz ewaluacji ryzyka. Narzędzia i metody te przedstawiono w tabeli 2.4 i wskazano zakres, w jakim są stosowane w procesie oceny ryzyka. Przydatność wskazanej metody w danym etapie procesu oceny ryzyka oznaczono symbolem „+”.

Tab. 2.4. Narzędzia i metody stosowane w ocenie ryzyka [29, 75]

Nazwa metody	Etapy procesu oceny ryzyka				
	Analiza ryzyka				Ewaluacja ryzyka
	Identyfikacja zagrożeń	Konsekwencje	Prawdopodobieństwo	Poziom ryzyka	
burza mózgów	+	-	-	-	-
wywiad standaryzowany	+	-	-	-	-
metoda delficka	+	-	-	-	-
lista kontrolna	+	-	-	-	-
podstawowa analiza zagrożeń PHA	+	-	-	-	-
analiza HAZOP	+	+	+	+	+
analiza HACCP	+	+	-	-	+
ocena ryzyka środowiskowego	+	+	+	+	+
metoda SWIFT	+	+	+	+	+
analiza scenariuszy	+	+	+	+	+
analiza BIA	+	+	+	+	+
analiza przyczyn źródłowych	-	+	+	+	+
analiza FMEA	+	+	+	+	+
analiza FTA	+	-	+	+	+
analiza ETA	+	+	+	+	-
analiza przyczyn i konsekwencji	+	+	+	+	+
analiza przyczynowo skutkowa	+	+	-	-	-

cd. tab. 2.4. Narzędzia i metody stosowane w ocenie ryzyka [29, 75]

analiza warstw ochrony LOPA	+	+	+	+	-
drzewo decyzyjne	-	+	+	-	-
analiza niezawodności człowieka HRA	+	+	+	+	-
metoda muchy	-	+	+	+	-
metoda utrzymania ukierunkowana na niezawodność RCM	+	+	+	+	+
zapowiedź analizy obwodu SCA	+	-	-	-	-
model Markowa	+	+	-	-	-
metoda Monte Carlo	-	-	-	-	+
statystyki i sieci Bayesia	-	+	-	-	-
krzywe wyniku fałszywie ujemnego	+	+	+	+	+
wskaźniki ryzyka	+	+	+	+	+
macierz ryzyka	+	+	+	+	+
analiza koszty/korzyści CBA	+	+	+	+	+
wielokryterialna analiza decyzyjna MCDA	+	+	+	+	+

Zarówno w normie [29] jak i innych normach i pracach, m.in. [73–75, 78] zebrano, usystematyzowano i omówiono powyższe metody stosowane do oceny ryzyka.

W zależności od rozpatrywanego problemu w systemach technicznych zastosowanie znajdują różne z wyżej wymienionych metod. Z punktu widzenia obiektu badań realizowanej rozprawy w dalszej części wskazano metody najczęściej stosowane do oceny ryzyka w systemach eksploatacji obiektów technicznych, w szczególności środków transportu. Dużą popularnością cieszy się metoda FMEA. Autorzy w pracach [7, 78] przedstawiają przykłady zastosowania metody FMEA m.in. w ocenie ryzyka transportu lądowego materiałów niebezpiecznych, w analizie jakości wytworów w celu uniknięcia negatywnych skutków uszkodzeń wytworu.

W pracy [78] przedstawiono również zastosowanie metod drzew logicznych (drzewa błędów FTA oraz drzewa zdarzeń ETA) w analizie ryzyka wystąpienia zdarzenia niepożądanego w układzie automatycznego włączania silnika zapasowego generatora prądu. Drzewa błędów można zastosować w jakościowej lub ilościowej analizie ryzyka [91]. Zdarzenie niepożądane stanowi wierzchołkowe zdarzenie drzewa, a awarie komponentów stanowią podstawowe zdarzenia drzewa [3]. Różnica między FTA i ETA polega na tym, że jakościowe

drzewo błędów ma strukturę językową i nie wymaga użycia tej samej rygorystycznej logiki, co formalne drzewo błędów ilościowych [91].

Metody drzew logicznych ułatwiają analizę występujących zdarzeń oraz błędów i mogą być traktowane jako jeden z elementów bardziej obszernych i nowatorskich metod oceny ryzyka, przedstawionych np. w opracowaniach [28, 36]. W wymienionych publikacjach autorzy przedstawiają zastosowanie metody RBM uznawanej zarówno w Europie jak i w Ameryce za jedną z najbardziej efektywnych metod zorientowanych na bezpieczeństwo, w której podstawą obliczeniową poziomu ryzyka jest jego definicja [79]. Metoda RBM jest również przedstawiona w artykule [14], gdzie dokonano przeglądu zastosowanych technik oceny ryzyka i harmonogramu utrzymania oraz ram planowania utrzymania (strategii) opartego na ryzyku (RBM) stosowanych na statkach i okrętach wojennych. Krytycznie oceniono dotychczasowe metody konserwacji ze względu na brak poprawy gotowości statku mimo rosnących kosztów utrzymania oraz występujące uszkodzenia statków spowodowane nieskuteczną konserwacją. Autorzy wytypowali ramy RBM jako ulepszenie istniejących metod utrzymania prewencyjnego (PM) oraz jednej z wyżej wymienionych metod oceny ryzyka – utrzymania skoncentrowanego na niezawodności (RCM). Ponadto jako wskaźniki oceny ryzyka dla ram planowania RBM zasugerowano gotowość i całkowity koszt utrzymania.

W ocenie ryzyka systemów technicznych, a także w rozwiązywaniu zadań z zakresu niezawodności i bezpieczeństwa bardzo często stosuje się metodę Monte Carlo. Przykłady formułowania i rozwiązywania zadań za pomocą tej metody przedstawiono w pracach [11, 23].

Część z wymienionych wyżej metod można sklasyfikować w obszarze probabilistycznej oceny ryzyka, czyli metody opartej na prawdopodobieństwie wystąpienia niepożądanych zdarzeń. W pracy [47] wyjaśniono, że PRA (Probabilistic Risk Assessment) jest metodologią, która przekształca zdarzenia inicjujące w tzw. profile ryzyka. Profile ryzyka, przedstawione w formie graficznej, wynikają ze skorelowania wyrządzonych szkód z częstotliwością występowania niepożądanych zdarzeń. Każda obserwacja zdarzenia daje unikalny profil ryzyka dla miary jego konsekwencji. Poprzez losowe pobieranie próbek (losową obserwację zdarzeń) można otrzymać kilkaset profili ryzyka. Wśród wymienionych wcześniej metod oceny ryzyka w obszarze PRA znajdują się m.in.: FTA, ETA, HRA, FMEA. [47]

Obszar oceny ryzyka (bezpieczeństwa) obejmuje zakres od często występujących wypadków o niewielkich skutkach do bardzo rzadko występujących katastrof powodujących rozległe konsekwencje. Zatem ocena maksymalnych szkód bez uwzględnienia prawdopodobieństwa ich wystąpienia nie jest dostateczną miarą akceptowalności ryzyka (poziomu bezpieczeństwa) systemów technicznych. Istotne czynniki, mające wpływ na wartość prawdopodobieństwa wystąpienia szkody przedstawiono w tabeli 2.5. [78]

Tab. 2.5. Czynniki kształtujące prawdopodobieństwo wystąpienia szkody [78]

Rodzaje czynników kształtujących prawdopodobieństwo wystąpienia szkody		
Częstość i okres narażenia na zagrożenie	Prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego	Możliwość uniknięcia i ograniczenia szkody
<ul style="list-style-type: none"> • charakter i potrzeba dostępu do strefy zagrożenia, • czas i liczba osób przebywających w strefie zagrożenia, • częstość dostępu. 	<ul style="list-style-type: none"> • dane statystyczne i modele niezawodności, • scenariusze wypadku i możliwy ubytek zdrowia, • porównawcza analiza drzew niezdatności. 	<ul style="list-style-type: none"> • kwalifikacje operatora, wiedza i doświadczenie, umiejętność reagowania w sytuacji zagrożenia, • charakter zdarzenia (nagłe, szybkie, powolne), • poziom świadomości ryzyka.

W systemach socjotechnicznych typu człowiek – obiekt techniczny – otoczenie <C, OT, O>, w procesie szacowania ryzyka zwraca się szczególną uwagę na wpływ czynnika ludzkiego na prawdopodobieństwo wystąpienia szkody [47, 78]. Z tabeli 2.5 wynika, że realizacja pewnych działań i czynności, np. zapewnienie odpowiednich warunków pracy, świadomość ryzyka czy wiedza, kwalifikacje i doświadczenie operatora może znacznie przyczynić się do zmniejszenia ryzyka.

W praktyce najczęściej łączy się kilka dostępnych metod oceny ryzyka tworząc jedną złożoną metodę oceny w zależności od potrzeb i celu badań. Na przykład w artykule [18] autor dokonuje analizy ryzyka nieprzetrvania katastrofy na morzu przez obiekt oceanotechniczny lub statek w stanie uszkodzonym w oparciu o metodę drzewa zdarzeń ETA, a następnie wylicza i ocenia ryzyko za pomocą macierzy ryzyka. Stosuje przy tym dodatkowe kryteria oceny, np. kryteria akceptacji ryzyka (RAC) oraz opcje kontroli ryzyka (RCO). Podobne połączenia znanych metod tworzone na potrzeby oceny ryzyka (a także niezawodności) konkretnego obiektu technicznego lub systemu można odnaleźć w pracach [11, 78].

Mnogość dostępnych metod oceny ryzyka umożliwia wybór najlepszej z nich w zakresie analizowanej problematyki i dostosowanie tej metody do potrzeb prowadzonej oceny systemu technicznego. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury dotyczącej problematyki ryzyka oraz badań własnych w dalszej części pracy przedstawiono metodę oceny ryzyka opracowaną i dedykowaną dla systemów eksploatacji środków transportu uwzględniającą dotychczasową wiedzę z zakresu metod i sposobów oceny ryzyka.

2.2. PROBLEMATYKA OCENY EFEKTYWNOŚCI W SYSTEMACH EKSPLOATACJI OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

Problemy dotyczące oceny efektywności funkcjonowania złożonych systemów technicznych oraz zagadnień związanych z prawidłową organizacją i sterowaniem procesami eksploatacji są podstawą rozważań wielu prac naukowych. Istotą dokonywania oceny efektywności działania systemów jest uzyskanie określonych, pożądaných informacji o przedmiocie oceny, czyli określonym stanie (wartości cech/cechy) analizowanego systemu. Informacje te wyrażone są w sposób wartościowy poprzez pomiar wartości cech systemowych, istotnych dla danego kryterium. Na ich podstawie formułowane jest zdanie oceniające (ocena). Przyjmuje się zatem, że ocena stanowi stwierdzenie wartościujące wyrażające aprobatę lub dezaprobatę dla stanu ocenianego systemu w aspekcie przyjętych kryteriów (kryterium) [76].

Punktem wyjścia do analizy i wyboru metod oceny efektywności funkcjonowania systemów oraz modeli ocen jest określenie celów eksploatacyjnych, które mają zostać osiągnięte przy zastosowaniu opracowanych metod i modeli. Cele eksploatacyjne obejmują m.in. [52]:

- wydłużanie czasu efektywnej pracy eksploatowanych obiektów technicznych,
- skracanie czasu odnawiania zdolności eksploatacyjnej obiektów przy równoczesnym polepszaniu jakości odnawiania,
- zwiększanie trwałości i niezawodności obiektów eksploatacji,
- zmniejszanie zużycia materiałów eksploatacyjnych (paliwa, oleje, smary, inne nośniki energii itp.),
- optymalizację gospodarki częściami zamiennymi,
- optymalizację przepływu informacji w systemie technicznym,
- kształcenie specjalistów w zakresie eksploatacji,
- formułowanie zaleceń i kryteriów "eksploatacyjnych" dla procesów projektowania i konstruowania oraz wytwarzania środków technicznych,
- usprawnianie warunków użytkowania obiektów technicznych (polepszanie bezpieczeństwa pracy pracowników, eliminację zagrożeń środowiska wywoływanych przez użytkowanie obiektów technicznych).

Efektywność można rozpatrywać z różnych punktów widzenia, w wyniku czego w literaturze pojawia się wiele kryteriów jej oceny. Ze względu na specyfikę danego systemu eksploatacji obiektów technicznych, do oceny efektywności jego funkcjonowania należy dobrać odpowiednie kryteria. Wiele systemów eksploatacji maszyn jest nastawionych na generowanie zysku, dla innych systemów najważniejszym kryterium oceny może być niezawodność obiektów technicznych lub poziom emisji zanieczyszczeń. Wśród innych istotnych kryteriów, stanowiących cechy systemu, są również m.in. bezpieczeństwo, trwałość czy gotowość [76]. Autor w pracy [76] proponuje możliwość oceny efektywności funkcjonowania systemów ze względu na następujące kryteria:

- operacyjne – służące do oceny funkcjonowania oraz stopnia osiągnięcia zamierzonych celów lub realizacji określonych potrzeb systemu,
- ekonomiczne – służące do oceny efektów dodatnich i ujemnych oraz wyrażających, najogólniej, korzyści z działalności inwestycyjno-finansowej w systemie,
- informacyjne – służące do oceny organizacji systemu i przebiegu procesów informacyjnych oraz wyrażające, najogólniej wpływ podsystemu sterowania na funkcjonowanie systemu,
- techniczne – służące do oceny jakości elementów systemu, a w szczególności środków technicznych i wyrażające, najogólniej wpływ techniki na funkcjonowanie systemu,
- eksploatacyjne – służące do oceny funkcjonowania elementów i środków działania oraz wyrażające ich wpływ na zdolność systemu do bezawaryjnego funkcjonowania w określonym czasie.

Efektywność funkcjonowania systemu z punktu widzenia kryterium operacyjności, nazywanego również skutecznością działania, charakteryzowana jest przez stopień realizacji przez system celów, jakie zostały mu przypisane [66]. Istotne jest, aby ocena efektywności była formułowana przy uwzględnieniu zasady racjonalności eksploatacji systemów technicznych, w myśl której podejmowane decyzje pozwalają na osiągnięcie założonego celu w aspekcie przyjętych kryteriów oceny. Cel działania systemu, dla którego został on zaprojektowany i wytworzony, jest zatem kategorią nadrzędną, ale musi być realizowany przy zastosowaniu racjonalnych środków i metod. Dążenie do osiągnięcia celów systemu z wyłączeniem racjonalności środków i metod prowadzi do nieracjonalności działania i „osiągania określonych stanów za wszelką cenę”. Z drugiej strony racjonalność środków i metod bez celowości jest pozbawiona sensu. [76, 106]

Spśród wyżej wymienionych kryteriów w literaturze przeważają dwa główne kierunki oceny efektywności funkcjonowania systemów eksploatacji. Pierwszy z nich prezentuje podejście ekonomiczne uwzględniające relacje między korzyściami (traktowanymi jako zysk lub dochód) a poniesionymi nakładami (kosztami). Efektywność ekonomiczna wyrażona jest w postaci różnicy lub ilorazu tych wielkości [53, 66, 76, 98, 105, 114]. Analizę kosztów w eksploatacji obiektów technicznych z wyszczególnieniem ich rodzajów szczegółowo omówiono w pracy [66].

Drugi nurt koncentruje się na kryterium eksploatacyjno-technicznym związanym najczęściej z oceną niezawodności, gotowości czy trwałości obiektów technicznych, przy częściowym lub całkowitym pominięciu aspektu ekonomicznego [76, 98, 105]. Przegląd literatury w tym zakresie wskazuje, iż najłatwiej i najczęściej dokonuje się oceny efektywności funkcjonowania systemów eksploatacji obiektów technicznych przy uwzględnieniu jednego z kryteriów oceny. Dużo trudniej jest dokonać oceny efektywności systemu w sposób wielokryterialny.

Do oceny efektywności funkcjonowania systemów eksploatacji obiektów technicznych stosuje się różnego rodzaju miary w zależności od potrzeb. Należy przyjąć, że wyżej wymienione kryteria oceny (cechy systemu) stanowią grupy miar, aniżeli pojedyncze wielkości. W każdej z grup można zlokalizować nawet kilka rodzajów miar (wskaźników), opisujących i oceniających wybrane aspekty eksploatacyjne funkcjonowania systemów technicznych [52]. Przykładem w grupie miar związanych z niezawodnością są [84]:

- przeciętny czas do uszkodzenia (MTTF);
- liczba uszkodzeń przypadająca na jednostkę czasu;
- prawdopodobieństwo, że obiekt nie ulegnie uszkodzeniu w przedziale czasu $\langle 0, t \rangle$;
- prawdopodobieństwo, że obiekt jest zdolny do funkcjonowania w chwili t .

2.3. ZAGADNIENIE MODELOWANIA PROCESÓW EKSPLOATACJI

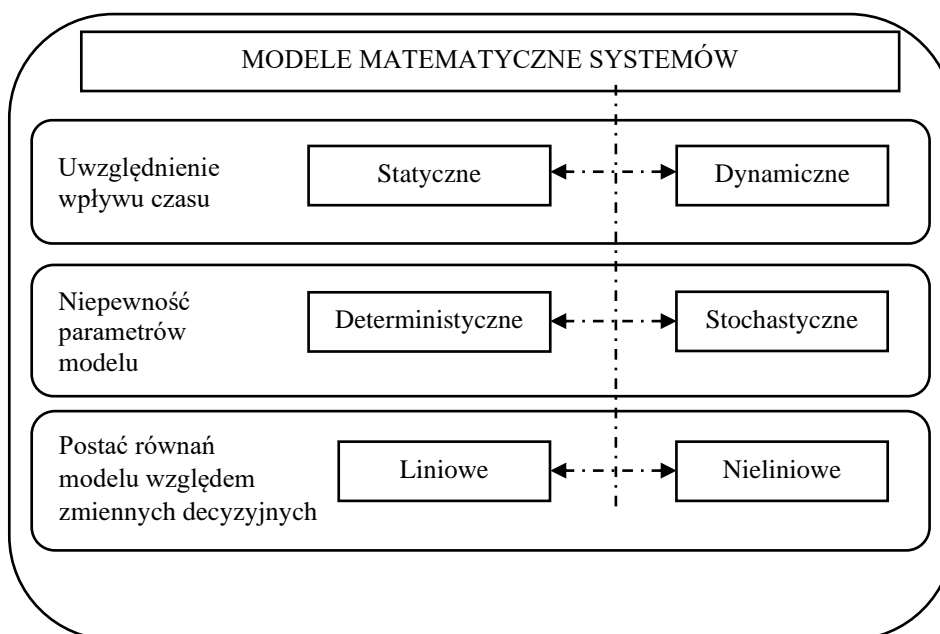
Wybór istotnych zmiennych badanych zjawisk i procesów z punktu widzenia kryteriów prowadzonej oceny systemu eksploatacji zmierza do opracowania modelu badanego procesu lub systemu. Model definiowany jest w teorii eksploatacji jako dający się pomyśleć lub materialnie zrealizować układ, który odzwierciedlając lub odwzorowując obiekt badań, zdolny jest zastępować go tak, że jego badanie dostarcza nowej informacji o obiekcie [76, 114]. Istotą modelu jest celowe, umyślne uproszczenie, idealizacja rzeczywistości przez wyodrębnienie cech (zmiennych) istotnych ze względu na cel badań. Należy zwrócić uwagę, że zmienne, które są nieistotne z punktu widzenia kryteriów oceny systemu, najczęściej są całkowicie pomijalne [30, 76, 114].

Powyższa analiza definicji modelu prowadzi do stwierdzenia, iż modelowanie jest działaniem polegającym na odwzorowaniu lub odzwierciedleniu pewnego układu w celu zbadania jego cech, istotnych w punktu widzenia zamierzonych badań [30, 76].

W ujęciu naukowym występuje wiele rodzajów modeli, które pełnią różne funkcje i są stosowane do realizacji różnych celów. Ze względu na cel zastosowania w pracy [76] wyróżniono modele doświadczalne, logiczne, matematyczne oraz teoretyczne. Biorąc pod uwagę stopień abstrakcji, czyli stopień uproszczenia odwzorowania obiektu rzeczywistego, rozróżnia się modele opisowe, fizyczne, analogowe oraz matematyczne [30]. W innych opracowaniach [8, 114] można odnaleźć podział modeli według kryterium postaci modelu (modele strukturalne, modele funkcjonalne) oraz z punktu widzenia środków wykorzystanych do budowy modelu, przy uwzględnieniu sposobu odzwierciedlenia wybranych cech i celu badań (modele materialne, modele idealne, modele sformalizowane, modele energetyczne).

Dominującą rolę w naukach ścisłych i technicznych odgrywają modele matematyczne, pojawiające się najczęściej w różnych klasyfikacjach modeli, nazywane również w pracy [114] modelami sformalizowanymi. Model

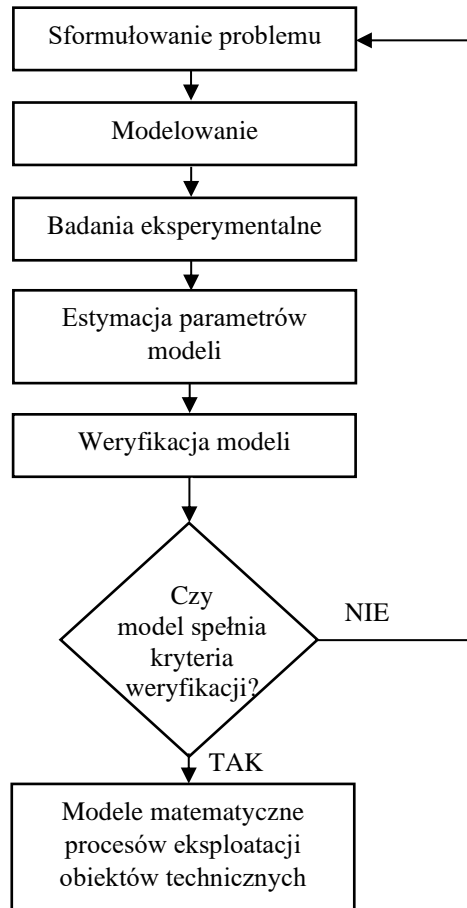
matematyczny obiektu badań jest to zbiór zależności o charakterze przyczynowo-skutkowym określony za pomocą właściwych wielkości (fizycznych, chemicznych, biologicznych, ekonomicznych) [66]. Modele te zapisywane są w postaci równań różniczkowych, całkowych, deterministycznych lub probabilistycznych. Budowa modeli matematycznych i ich badania umożliwiają uzyskanie istotnych i wartościowych informacji o systemach eksploatacji z punktu widzenia celu badań, wykorzystywanych m.in. do prawidłowego sterowania procesem eksploatacji [114]. Klasyfikację modeli matematycznych systemów technicznych uwzględniającą zmienność w czasie, niepewność informacji o właściwościach odwzorowań charakterystyk elementów struktury oraz postaci równań modelu systemu i otoczenia obrazuje rysunek 2.6.



Rys. 2.6. Uproszczony schemat klasyfikacji modeli matematycznych [30]

Modele procesu eksploatacji służą do badania procesów realizowanych w rzeczywistych systemach eksploatacji. Modele te opisują zachowanie się obiektów technicznych w określonych warunkach ich użytkowania oraz obsługi i odnowy, które mają na celu utrzymywanie i odtwarzanie zdolności obiektów. Istotą modelu procesu eksploatacji jest opis kolejnych zmian stanów obiektów, eksploatacyjnych lub niezawodnościowych [106].

Budowa modelu matematycznego procesu eksploatacji obiektów technicznych polega na realizacji poszczególnych kroków (etapów) począwszy od sformułowania problemu aż do otrzymania ostatecznego modelu matematycznego [114]. Etapy budowy modeli matematycznych przedstawiono na rysunku 2.7.



Rys. 2.7. Uproszczony schemat algorytmu budowy modeli matematycznych procesów eksploatacji obiektów technicznych [114]

Etap modelowania polega na poszukiwaniu struktury modeli najlepiej opisujących rzeczywiste procesy eksploatacji obiektów technicznych. W ramach etapu modelowania realizowane są trzy główne założenia pozostające ze sobą w ścisłej relacji [114]:

- identyfikacja systemu i procesu eksploatacji - opis modelu procesu eksploatacji obiektów,
- budowa grafu analizowanego procesu eksploatacji,
- opracowanie matematycznego modelu analizowanego procesu eksploatacji.

Przedstawioną metodę modelowania procesów eksploatacji obiektów technicznych w przykładach można odnaleźć w wielu opracowaniach i publikacjach naukowych m.in. [9, 40, 48, 49, 51, 56, 58, 81, 105, 106, 113, 117]. W pracy [114] omówiono modele procesów eksploatacji dla różnych obiektów technicznych np. maszyn rolniczych, samochodów osobowych, okrętowego silnika spalinowego czy autobusów.

W kolejnych etapach budowy modeli matematycznych procesów eksploatacji obiektów technicznych przeprowadza się badania eksperymentalne na rzeczywistych obiektach, wyznacza parametry, w tym charakterystyki liczbowe i funkcyjne tych modeli oraz weryfikuje je z punktu widzenia przyjętego kryterium. Model spełniający kryteria weryfikacji stanowi model matematyczny procesu eksploatacji obiektów technicznych. W przypadku niespełnienia kryterium weryfikacji budowa nowego modelu wymaga powrotu do etapu początkowego tj. ponownego sformułowania problemu badawczego.

2.4. STEROWANIE PROCESEM EKSPLOATACJI (PROCES DECYZYJNY)

Racjonalne sterowanie i eksploataowanie systemów wiąże się z koniecznością podejmowania decyzji na każdym etapie procesu eksploatacji. Decyzje często podejmowane są w warunkach niepewności oraz przy niewystarczającym dostępie do informacji, co powoduje zwiększenie ryzyka dokonania niewłaściwego wyboru i poniesienie związanych z tym konsekwencji. W przypadku wyboru niewłaściwych decyzji na poziomie operacyjnym ich konsekwencje (np. problemy w funkcjonowaniu systemu) mogą być mniej dotkliwe niż w przypadku decyzji taktycznych lub strategicznych (np. upadłość przedsiębiorstwa). Wybór niewłaściwych decyzji w każdym z podanych przykładów jest sytuacją niepożądaną [8].

Dokonywanie wyboru w sytuacji decyzyjnej, czyli między co najmniej dwoma możliwymi wariantami działania różniącymi się między sobą stopniem korzyści sprowadza się do zagadnienia jakim jest problem decyzyjny. W pracy [8] pod pojęciem problemu decyzyjnego rozumie się konieczność porównania stanu oczekiwanego ze stanem rzeczywistym, pomiaru występujących między nimi odchyleń i dokonania na ich podstawie wyboru jednej z istniejących możliwości działania.

Stopień złożoności problemu decyzyjnego oraz zakres podjętej decyzji zależne są od złożoności systemu eksploatacji, rodzaju obiektów technicznych eksploatowanych w badanym systemie, stosowanej strategii eksploatacji czy rodzaju technologii produkcji. Dokonanie wyboru teoretycznie najlepszej spośród możliwych decyzji jest podyktowane oceną systemu z punktu widzenia różnych kryteriów, zazwyczaj technicznych i ekonomicznych [106].

Rozwiązanie problemu decyzyjnego wymaga utworzenia co najmniej jednego modelu decyzyjnego. Budowa modeli decyzyjnych, pozwala na wyznaczenie najkorzystniejszej decyzji oraz znalezienie ewentualnych przyczyn wyboru niewłaściwego wariantu działania [87].

Podstawą do formułowania modelu decyzyjnego jest określenie funkcji celu, nazywanej funkcją kryterialną, która umożliwia ocenę rozpatrywanego systemu eksploatacji z punktu widzenia wybranego kryterium oceny. Funkcja kryterialna wyznaczana jest przy wykorzystaniu zmiennych decyzyjnych i zmiennych niezależnych [106].

2.4.1. Modele optymalizacyjne w procesie decyzyjnym

Kluczową rolę w procesach decyzyjnych dotyczących eksploatacji obiektów technicznych odgrywają problemy optymalizacji. Optymalizacja polega na wyborze spośród możliwych rozwiązań takiego rozwiązania, które w najwyższym możliwym stopniu spełnia przyjęte kryterium optymalizacji [87]. Wybór najlepszego wariantu działania wymaga zatem znajomości kryteriów optymalizacji decyzji. W tym miejscu należy podkreślić, że rozwiązanie optymalne istnieje tylko w aspekcie określonego kryterium [67].

Optymalizacja jest jednym z najczęstszych sposobów zastosowania modelu matematycznego [66]. W końcowych latach ubiegłego wieku analizy i techniki matematyczne przeważały nad rozwiązaniami praktycznymi w kontekście rozważań dotyczących optymalizacji. Jak twierdzi autor pracy [16] w aspekcie modeli optymalizacji utrzymania obiektów technicznych, wiele opracowań z zakresu optymalizacji zostało napisanych wyłącznie w celach matematycznych, co powodowało dużą lukę między teorią a praktyką. Na początku nowego wieku, wraz z szybkim rozwojem przemysłu i wysoce konkurencyjnym rynkiem międzynarodowym, coraz częściej modele optymalizacji zaczęto stosować w celu minimalizacji kosztów związanych z eksploatacją, biorąc pod uwagę również aspekty techniczne, jak np. w pracy [65].

Problemy optymalizacji w systemach eksploatacji obiektów technicznych mogą być różnorodne i mogą dotyczyć zarówno całego systemu eksploatacji jak i pojedynczego obiektu technicznego. Budowa modeli optymalizacyjnych oraz procedur optymalizacji systemu ma na celu wytworzenie układu działania o najkorzystniejszych właściwościach eksploatacyjnych [87]. Przykładowe pytania stawiane przed decydem w zakresie tej problematyki przedstawiono w tabeli 2.6.

Rozwiązanie problemu optymalizacyjnego sprowadza się do wyboru cech obiektu lub systemu istotnych z punktu widzenia rozpatrywanego problemu i kryteriów jego oceny oraz do budowy modelu analizowanego zjawiska lub procesu. Opracowanie właściwego modelu umożliwia podjęcie odpowiednich decyzji w procesie sterowania systemem eksploatacji.

W procesie podejmowania decyzji decydent rozpatruje jedno lub wiele kryteriów oceny jednocześnie. Uwzględnienie wielu aspektów w jednym rozwiązaniu umożliwia modelowanie rzeczywistych problemów eksploatacyjnych. W optymalizacji wielokryterialnej jako kryteria cząstkowe najczęściej przyjmuje się [2, 30, 38, 67, 82, 87]:

- maksymalizację, np. zysku, gotowości obiektów, wielkości pracy przewozowej, mobilności;
- minimalizację: kosztów, czasu, ryzyka.

Tab. 2.6. Przykładowe problemy optymalizacji dotyczące obiektu technicznego i systemu eksploatacji (opracowanie własne na podstawie [87])

L.p.	Przykładowe rodzaje problemów	
	związane z obiektem technicznym	związane z systemem eksploatacji
1	- jak ustalać zakresy prac obsługowych i normy międzyobsługowe?	- jakie powinno być wyposażenie jednostek pogotowia technicznego?
2	- jakich przedsięwzięć wymaga przedłużenie żywotności obiektu?	- jaka liczba stanowisk naprawczych powinna znajdować się w podsystemie utrzymania ruchu?
3	- jak często i w jakim zakresie wykonywać odnowy prewencyjne?	- ilu pracowników i z jakimi kwalifikacjami powinno pracować w podsystemie interwencyjnym?
4	- czy wykonywać naprawę minimalną czy naprawę dokładną?	- jak organizować magazynowanie i transport obiektów w systemie eksploatacji?

Najczęściej stosowanym kryterium optymalizacyjnym w ramach polityki eksploatacyjnej prowadzonej przez przedsiębiorstwa jest minimalizacja kosztu eksploatacji, będącego sumą uogólnionych nakładów na użytkowanie i obsługiwane obiektów technicznych [115].

2.4.2. Modele efektywnościowe i optymalizacyjne stosowane w obszarze środków transportu

Zagadnienia związane z oceną efektywności działania systemów eksploatacji środków transportu oraz metodami poszukiwania optymalnych rozwiązań stanowią problem złożony, co powoduje, że ich modelowanie wymaga doboru i zastosowania odpowiednich narzędzi matematycznych. Szerokie zastosowanie w modelowaniu procesów eksploatacji obiektów technicznych znalazły procesy Markowa i semi-Markowa. Teoretyczne podstawy modelowania procesów markowskich przedstawiono w pracach [5, 22–24, 33, 56].

Autorzy pracy [114] wskazują związek modelowania matematycznego za pomocą teorii procesów semi-Markowa z oceną efektywności funkcjonowania systemów eksploatacji obiektów technicznych poprzez przedstawienie charakterystyk procesów Markowa jako mierników decyzyjnych do sterowania eksploatacją obiektów technicznych. Mierniki podzielone są na trzy kategorie: mierniki czasu, mierniki wartości oraz współczynniki. Najważniejsze rodzaje mierników według kategorii przedstawiono w tabeli 2.7.

Tab. 2.7. Mierniki oceny efektywności funkcjonowania systemów eksploatacji obiektów technicznych dla zastosowania teorii procesów semi-Markowa [67, 114]

Kategoria miernika	Rodzaj miernika
<p>Mierniki czasu – stanowiące podstawę do oceny efektywności procesów eksploatacji obiektów technicznych</p>	<ul style="list-style-type: none"> – wartość oczekiwana i odchylenie standardowe czasów przebywania obiektów w wyróżnionych stanach, określone typem rozkładu i wartością jego parametrów, – sumaryczny czas przebywania pojedynczego obiektu w wyróżnionym stanie, – średni czas przebywania pojedynczego obiektu w wyróżnionym stanie, – sumaryczny czas przebywania n obiektów w wyróżnionym stanie, – średni czas przebywania n obiektów w wyróżnionym stanie.
<p>Mierniki wartości – stosowane do sterowania procesem eksploatacji, wyrażone w postaci walutowej</p>	<ul style="list-style-type: none"> – wartości oczekiwane i odchylenia standardowe dochodów uzyskanych z przebywania obiektów w wyróżnionych stanach, określone typem rozkładu i wartością jego parametrów, – jednostkowy dochód wynikający z eksploatacji jednego obiektu przypadający na jednostkę czasu, gdy obiekt ten znajduje się w wyróżnionym stanie, – sumaryczny dochód uzyskany z eksploatacji pojedynczego obiektu technicznego w przedziale czasu $\langle 0, t \rangle$ w wyróżnionym stanie, – jednostkowe koszty utrzymania obiektów technicznych w stanie zdatności funkcjonalnej i zadaniowej w wyróżnionych stanach procesu eksploatacji, – sumaryczne koszty eksploatacji pojedynczego obiektu technicznego w przedziale czasu $\langle 0, t \rangle$ w wyróżnionym stanie, – wartości oczekiwane i odchylenia standardowe zysków uzyskane z eksploatacji obiektów w wyróżnionych stanach określone typem rozkładu i wartością jego parametrów, – zysk jednostkowy wynikający z eksploatacji jednego obiektu technicznego, przypadający na jednostkę czasu, gdy obiekt ten znajduje się w wyróżnionym stanie, – sumaryczny zysk uzyskany z eksploatacji pojedynczego obiektu technicznego w przedziale czasu $\langle 0, t \rangle$ w wyróżnionym stanie.
<p>Współczynniki</p>	<ul style="list-style-type: none"> – prawdopodobieństwa przebywania obiektów w wyróżnionych stanach, – sumaryczne prawdopodobieństwa przebywania obiektów w kilku wyróżnionych stanach np. stanach gotowości (współczynnik gotowości technicznej), – prawdopodobieństwa przejść obiektów technicznych określone za pomocą macierzy prawdopodobieństw przejść.

Modelowanie procesu eksploatacji środków transportu za pomocą procesów Markowa i semi-Markowa przedstawiono m.in. w pracach [9, 42, 43, 58–60, 67, 88, 117].

W modelowaniu zagadnień związanych z problematyką optymalizacji dużą popularnością cieszą się metody poszukiwania rozwiązań optymalnych z zastosowaniem decyzyjnych procesów semi-Markowa oraz metod optymalizacji jedno i wielokryterialnej, którym poświęcono prace [8, 30, 56, 81]. W praktyce eksploatacyjnej metody te odnoszą się bezpośrednio do rodzaju zadań, dla których są opracowywane, zatem cechują się dużą różnorodnością.

W obszarze poszukiwania rozwiązań optymalnych dotyczących problemu modelowania systemów eksploatacji obiektów technicznych, wyboru decyzji do sterowania procesem eksploatacji a także oceny efektywności działania tych systemów znajduje się bardzo dużo publikacji naukowych. Ze względu na cel realizowanej rozprawy doktorskiej w ramach przeprowadzonej analizy literatury podjęto próbę usystematyzowania dotychczasowych metod optymalizacyjnych stosowanych w obszarze środków transportu. Dla wymienionych systemów eksploatacji środków transportu wyszczególniono wybrane rodzaje metod oraz rodzaj i liczbę przyjętych kryteriów ich oceny. Zebrane informacje przedstawiono w tabeli 2.8.

Dotychczasowe metody wyboru optymalnych rozwiązań w procesie sterowania systemami eksploatacji środków transportu są zazwyczaj metodami jednokryterialnymi, gdzie kryteriami oceny są najczęściej: koszty, dochody, stan techniczny środków transportu, gotowość oraz ryzyko. Natomiast dotychczas stosowane metody wielokryterialne nie uwzględniają lub uwzględniają jedynie w ograniczonym zakresie wpływ istotnych parametrów eksploatacji obiektów technicznych na wartość ryzyka.

Przedstawione w rozdziale zagadnienia dotyczące poszukiwania optymalnych rozwiązań w zakresie funkcjonowania systemów eksploatacji środków transportu dowodzą, że analiza ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych stanowi jedną z krytycznych metod w procesie podejmowania decyzji strategicznych, której celem jest zapewnienie bezpieczeństwa technicznego i minimalizacja kosztów działalności systemu eksploatacji [79].

Analiza literatury wskazuje na dużą różnorodność metod oceny efektywności działania systemów eksploatacji, w tym oceny ryzyka a także metod sterowania procesami eksploatacji przez wybór optymalnych rozwiązań w procesie decyzyjnym. W literaturze istnieje wiele rozwiązań cząstkowych, które nie uwzględniają lub uwzględniają tylko w ograniczonym zakresie wpływ istotnych parametrów procesu eksploatacji środków transportu na ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych i możliwość prawidłowej realizacji przydzielonego zadania.

Tabela 2.8. Przykładowe modele rozwiązań optymalizacyjnych stosowanych w obszarze obiektów technicznych, w tym środków transportu

Obszar analizy	Zastosowane metody	Kryterium optymalizacji
system eksploatacji statków morskich	metody deterministyczne wyboru rozwiązania optymalnego [14]	ryzyko, gotowość, koszt
system eksploatacji statków powietrznych	modele probabilistyczne [51]	ryzyko
systemy eksploatacji środków transportu kolejowego	metody wnioskowania bayesowskiego [32]	ryzyko
	algorytm genetyczny NSGA II [17]	koszt cyklu życia (LCC)+ niezawodność
	rozwiązania optymalne w sensie Pareto [35]	koszt + niezaspokojona potrzeba w zakresie transportu pasażerskiego/ładunku
system eksploatacji środków transportu miejskiego	stochastyczne modele decyzyjne, Decyzyjne procesy semi-Markowa (SMDP), algorytm ewolucyjny, algorytm genetyczny [56]	dochód jednostkowy + gotowość
	optymalizacja wielokryterialna, model matematyczny [20]	ryzyko (szkody/straty + możliwość aktywizacji zagrożeń)
systemy obsługi środków transportu	procesy semi-Markowa (SMP), metody deterministyczne wyboru racjonalnego rozwiązania [56]	dochód lub gotowość
system eksploatacji pojazdów specjalnych	procesy semi-Markowa [9]	gotowość
system eksploatacji pojazdów	procesy Markowa, procesy semi-Markowa [67]	koszt lub zysk
	modele probabilistyczne [64]	ryzyko
system eksploatacji obiektów technicznych	procesy semi-Markowa [42, 48]	zysk, gotowość; wskaźniki niezawodności
	techniki scenariuszowe [53]	koszt, wskaźniki niezawodności
	optymalizacja wielokryterialna, model matematyczny [82]	ryzyko + koszty
	algorytm Monte Carlo [11]	wskaźniki niezawodności

3. METODYKA BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

Podstawą do racjonalnego sterowania eksploatacją maszyn są informacje o realizowanych składowych procesach eksploatacji dotyczących użytkowania i zapewniania zdatności, a także informacje o stanie technicznym maszyn, o rodzajach, przyczynach i skutkach ich uszkodzeń. Wyznaczenie i weryfikacja parametrów procesu eksploatacji obiektów technicznych możliwa jest na podstawie wyników badań eksploatacyjnych zrealizowanych w analizowanym rzeczywistym systemie eksploatacji. Badania eksploatacyjne definiowane są jako zespół działań polegających na obserwacji obiektu w naturalnych warunkach eksploatacji, pozyskiwaniu i archiwizacji danych oraz przetwarzaniu tych danych. Tego typu badania stanowią jedno z najlepszych źródeł wiedzy decyzyjnej zarówno w bieżącym zarządzaniu, jak i projektowaniu przyszłych obiektów i systemów ich eksploatacji. W rzeczywistych systemach eksploatacji badania eksploatacyjne obiektów technicznych są przedsięwzięciem realizowanym zwykle w długim przedziale czasu, wymagającym znacznych zasobów ludzkich i finansowych oraz odpowiedniego przygotowania merytorycznego, metodycznego, organizacyjnego i technicznego [62, 76].

Metodyka opracowania badań eksploatacyjnych opiera się na systemowej analizie problemu, która prowadzi do wydzielenia trzech płaszczyzn badawczych [62, 76]:

- płaszczyzny założeń i wymagań obejmujących: cel, założenia i zakres badań oraz analizę ograniczeń;
- płaszczyzny systemu i procesu eksploatacji rozpatrywanych obiektów technicznych;
- płaszczyzny modułu badawczego obejmującego: strukturę badań, jego system, program i plan badawczy oraz wdrożenie badań do rzeczywistego systemu eksploatacji, w tym: zebranie informacji o stanie i uszkodzeniach obiektów technicznych, przetworzenie informacji uzyskanych z badań eksploatacyjnych, wnioskowanie i zastosowanie wyników badań do sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych.

W pracy doktorskiej wyodrębniono i scharakteryzowano następujące obszary w ramach metodyki przeprowadzonych badań eksploatacyjnych:

- cel i założenia do badań,
- identyfikację systemu eksploatacji środków transportu,
- identyfikację procesu eksploatacji środków transportu,
- graf stanów modelu procesu eksploatacji środków transportu,
- metodę badawczą (opis badań).

3.1. CEL I ZAŁOŻENIA DO BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań eksploatacyjnych jest pozyskanie danych dotyczących badanego systemu eksploatacji obiektów technicznych

niezbędnych do analizy i oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu oraz do racjonalnego zarządzania tym systemem w wyniku podejmowania odpowiednich decyzji sterujących.

Głównym rezultatem badań jest uzyskanie zbiorów wartości parametrów charakteryzujących realizowany proces eksploatacji obiektów technicznych (autobusów miejskich), w szczególności danych mających posłużyć do wyznaczenia wartości ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych a także gotowości środków transportu do realizacji zadania przewozowego.

Dodatkowym rezultatem wykonanych badań jest realizacja celów poznawczych poszerzających wiedzę o procesach technicznych, degradacyjnych, socjotechnicznych i innych zjawiskach zachodzących podczas eksploatacji obiektu w jego naturalnych warunkach funkcjonowania.

Poszczególne etapy badań dotyczą:

- identyfikacji systemu eksploatacji środków transportu,
- identyfikacji procesu eksploatacji środków transportu,
- przeprowadzenia badań w rzeczywistym systemie eksploatacji autobusów miejskich w wybranej aglomeracji miejskiej przy uwzględnieniu możliwości organizacyjnych, technicznych i finansowych,
- analizy statystycznej uzyskanych wyników badań.

Na podstawie identyfikacji systemu i procesu eksploatacji oraz uzyskanych danych eksploatacyjnych zostaną zbudowane modele procesu eksploatacji środków transportu: model matematyczny, model oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz model decyzyjny sterowania procesem eksploatacji środków transportu.

3.2. IDENTYFIKACJA SYSTEMU EKSPLOATACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU

Rozpatrywanym w pracy obiektem badań jest rzeczywisty system eksploatacji autobusów miejskich - Zakład Autobusowy, stanowiący jeden z podsystemów systemu transportu miejskiego - Miejskich Zakładów Komunikacyjnych w wybranej aglomeracji miejskiej.

Podstawową działalnością Miejskich Zakładów Komunikacyjnych funkcjonujących w formie spółki z ograniczoną odpowiedzialnością jest zaspokajanie potrzeb mieszkańców w zakresie transportu pasażerskiego na terenie miasta i w strefie podmiejskiej. Miejskie Zakłady Komunikacyjnych odpłatnie świadczą usługi przewozu pasażerów i ich bagażu komunikacją autobusową i tramwajową na wyznaczonych trasach komunikacyjnych zgodnie z ustalonym rozkładem jazdy. Ponadto Spółka oferuje odpłatne świadczenie usług w zakresie:

- wynajmu środków transportu,
- badań technicznych pojazdów,

- reklamy w postaci udostępniania zewnętrznych powierzchni taboru i obiektów należących do Miejskich Zakładów Komunikacyjnych.

Zgodnie z zapisami Umowy Spółki w przedmiocie jej działania znajdują się również:

- działalność taksówek osobowych,
- transport drogowy towarów,
- wynajem i dzierżawa maszyn, urządzeń oraz dóbr materialnych,
- roboty związane z budową dróg i autostrad,
- roboty związane z budową dróg szynowych i kolei podziemnej,
- rozbiórka i burzenie obiektów budowlanych,
- przygotowywanie terenu pod budowę,
- konserwacja i naprawa pojazdów samochodowych, z wyłączeniem motocykli,
- działalność usługowa wspomagająca transport lądowy,
- roboty związane z budową linii telekomunikacyjnych i elektroenergetycznych,
- wynajem i zarządzanie nieruchomościami własnymi i dzierżawionymi,
- pozostałe badania i analizy techniczne,
- produkcja lokomotyw kolejowych oraz taboru szynowego,
- transport wodny śródlądowy pasażerski,
- wynajem i dzierżawa środków transportu wodnego,
- badanie rynku i opinii publicznej,
- pozostała działalność w zakresie opieki zdrowotnej, gdzie indziej niesklasyfikowana,
- działalność agencji reklamowych,
- pozaszkolne formy edukacji z zakresu nauki jazdy i pilotażu.

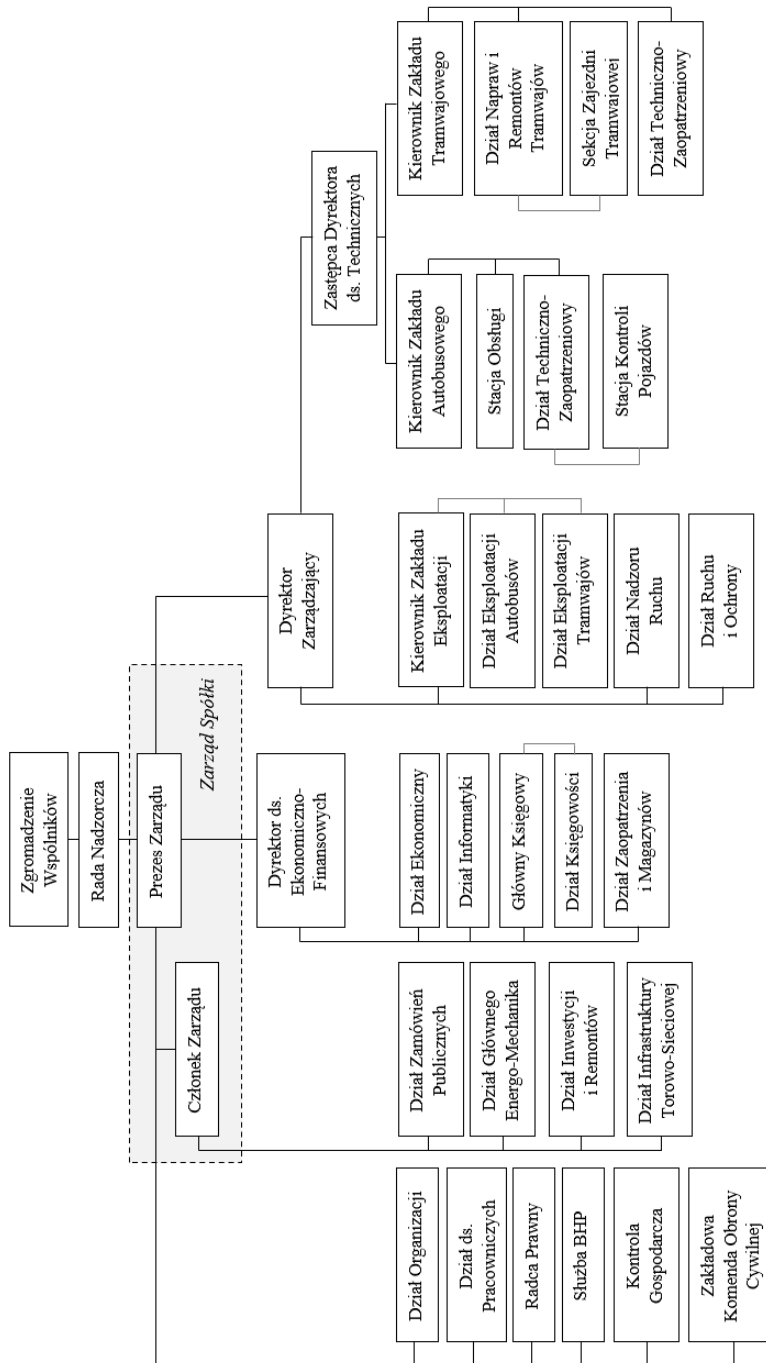
W strukturze organizacyjnej Spółki wyodrębnia się cztery pionory funkcjonalne:

- pion Prezesa Zarządu,
- pion Członka Zarządu,
- pion Dyrektora ds. Ekonomiczno-Finansowych,
- pion Dyrektora Zarządzającego.

Schemat organizacyjny Miejskich Zakładów Komunikacyjnych przedstawiono na rysunku 3.1.

Wyodrębnione w poszczególnych pionach komórki organizacyjne realizują zadania związane z bieżącym zarządzaniem, planowaniem, rozliczaniem i kontrolą działalności eksploatacyjnej prowadzonej przez Miejskie Zakłady Komunikacyjne.

Obiekt badań realizowanej rozprawy doktorskiej, Zakład Autobusowy, wchodzi w skład pionu Dyrektora Zarządzającego i podlega zastępcy Dyrektora ds. Technicznych, który nadzoruje zadania związane z bieżącym utrzymaniem w stanie zdatności taboru autobusowego i tramwajowego.

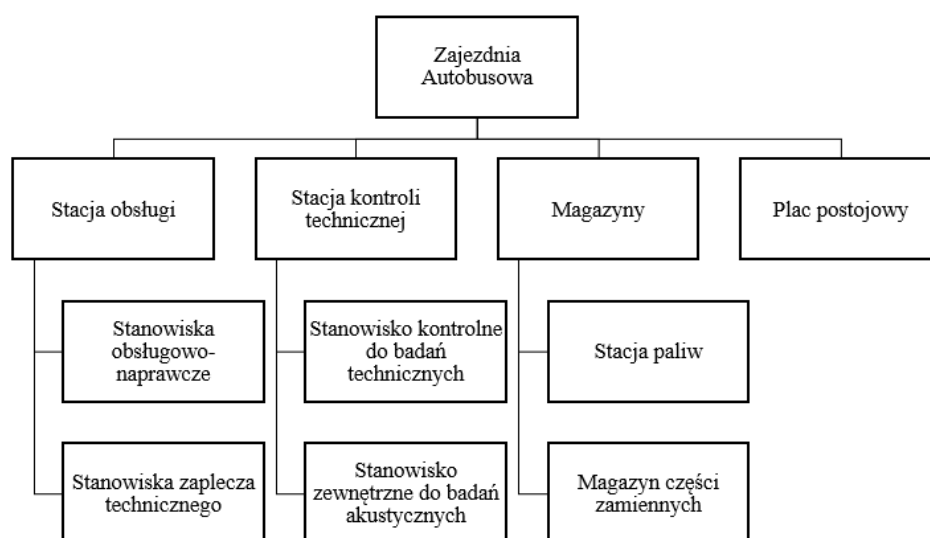


Rys. 3.1. Schemat struktury organizacyjnej MZK w wybranej aglomeracji [opracowanie własne na podstawie informacji źródłowych]

W Zakładzie Autobusowym funkcję decyzyjną sprawuje Kierownik Zakładu Autobusowego, który zarządza i nadzoruje działalnością Zakładu wraz z zastępcą. W Zakładzie Autobusowym realizowane są zadania dotyczące:

- planowania działań i kierowania ich realizacją,
- sterowania użytkowaniem pojazdów,
- utrzymania pojazdów,
- logistycznego zabezpieczenia działania systemu,
- przechowywania pojazdów.

W ramach Zakładu Autobusowego funkcjonuje zajezdnia autobusowa. Dekompozycja zajezdni autobusowej została przedstawiona na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Dekompozycja zajezdni autobusowej znajdującej się w analizowanym Zakładzie Autobusowym [opracowanie własne na podstawie informacji źródłowych]

W zajezdni autobusowej realizowane są czynności dotyczące zaopatrzenia pojazdów (autobusów miejskich) w paliwo, kontroli diagnostycznej ich stanu technicznego, wykonywania obsługi profilaktycznych oraz napraw uszkodzonych pojazdów, a także przechowywania pojazdów na placu postojowym. Wymienione czynności realizowane są na poszczególnych stanowiskach w stacji obsługi, stacji kontroli technicznej pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3,5 tony, magazynach oraz placu postojowym, zgodnie z przedstawioną powyżej dekompozycją zajezdni autobusowej.

Każdorazowo przed rozpoczęciem użytkowania, a także po jego zakończeniu autobusy są zawsze sprawdzane oraz zaopatrywane w materiały eksploatacyjne na stanowiskach w stacji obsługi w ramach tzw. obsługi codziennej (obsługi w dniu użytkowania). W stacji obsługi realizowane są również czynności związane z obsługą okresową i naprawą uszkodzonych

pojazdów. Stacja obsługi wyposażona jest w 10 rodzajów stanowisk obsługowo-naprawczych:

- stanowisko obsługi codziennej (obsługi w dniu użytkowania),
- stanowisko okresowych obsług technicznych,
- stanowiska napraw bieżących,
- stanowisko napraw silników,
- stanowisko wymiany silników,
- stanowisko obsług akumulatorów,
- stanowisko napraw tapicerskich,
- stanowisko napraw układu ogrzewania i klimatyzacji, rozruszników i alternatorów,
- stanowisko napraw ogumienia,
- stanowisko napraw powłok lakierniczych.

Na stanowiskach obsługowo-naprawczych obsłudze lub odnowie podlegają następujące układy pojazdu:

- silnik z osprzętem,
- układ napędowy,
- układ kierowniczy,
- układ hamulcowy,
- układ zawieszenia,
- układ jezdny,
- układ elektryczny,
- układ zasilania w sprężone powietrze,
- nadwozie pojazdu,
- pozostałe układy.

W systemach eksploatacji autobusów miejskich mogą być użytkowane autobusy różnych klas. W zależności od liczby pasażerów, dopuszczalnej masy całkowitej (dmc) oraz długości pojazdu, wyróżnia się 5 klas autobusów miejskich zgodnie z tabelą 3.1.

Tab. 3.1. Klasy autobusów miejskich [37]

Klasa autobusu	Liczba pasażerów	dmc [t]	Długość [m]
Mikrobusy	9 - 16	do 3,5	do 6
MINI	do 50	6 - 9	6 - 8
MIDI	do 75	12 - 15	9 - 10
MAXI	do 120	16 - 19	11 - 12
MEGA	pow. 120	24 - 28	do 18

W badanym systemie eksploatacji środków transportu użytkowanych jest 149 autobusów miejskich. W tabeli 3.2 przedstawiono wykaz marek, typów i klas wraz z podaniem wartości wybranych parametrów technicznych użytkowanych w badanym systemie autobusów miejskich, natomiast w tabeli 3.3 liczby poszczególnych marek i typów oraz strukturę wiekową badanych pojazdów.

Tab. 3.2. Wybrane parametry techniczne marek i typów autobusów miejskich użytkowanych w badanym systemie eksploatacji

Marka i typ autobusu	Typ nadwozia (terminologia branżowa)	Klasa	l. miejsc siedzących	l. miejsc stojących	dmc [t]
Mercedes-Benz 628 O530 G Citaro	długi niskopodłogowy	MEGA	45	125/126	28
Mercedes-Benz 628 O530 Citaro	krótki niskopodłogowy	MAXI	30	76	18
Mercedes-Benz O345 G Conecto	długi średniopodłogowy	MEGA	52	114	28
Mercedes-Benz 628 Conecto G	długi niskopodłogowy	MEGA	45	125	28
Mercedes-Benz 628 Conecto LF	krótki niskopodłogowy	MAXI	30	75	18
Solaris Urbino 18	długi niskopodłogowy	MEGA	47	119	28
Solaris Urbino 18 EURO6	długi niskopodłogowy	MEGA	44	97	28
Solaris Urbino 12	krótki niskopodłogowy	MAXI	31	65	18
Solaris Urbino 12 EURO6	krótki niskopodłogowy	MAXI	28	63	18
Solaris Urbino 8,6	midy niskopodłogowy	MIDI	16+1	38	14,4

Tab. 3.3. Liczby autobusów miejskich eksploatowanych w obiekcie badań z podziałem na markę, typ i rok produkcji

Marka i typ autobusu	Rok produkcji													Suma
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		
Mercedes-Benz 628 O530 G Citaro			9	12										21
Mercedes-Benz 628 O530 Citaro			2											2
Mercedes-Benz O345 G Conecto	3	10	9											22
Mercedes-Benz 628 Conecto G					3	6	12							21
Mercedes-Benz 628 Conecto LF				2	3	2	2							9
Solaris Urbino 18									11					11
Solaris Urbino 18 EURO6										7	7			14
Solaris Urbino 12								2	14					16
Solaris Urbino 12 EURO6										11	16	4		31
Solaris Urbino 8,6									2					2
Suma	3	10	20	14	6	8	14	2	27	18	23	4		149

Zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 3.3 średni wiek badanych autobusów realizujących zadania przewozowe na terenie analizowanej aglomeracji miejskiej w roku 2016 wynosi 5,4 lat.

3.2.1. Model obiektu badań

Obiektem badań w pracy jest ogólnie pojęty system eksploatacji środków transportu należący do pewnej klasy złożonych systemów socjotechnicznych, którego zadaniem jest przewóz pasażerów.

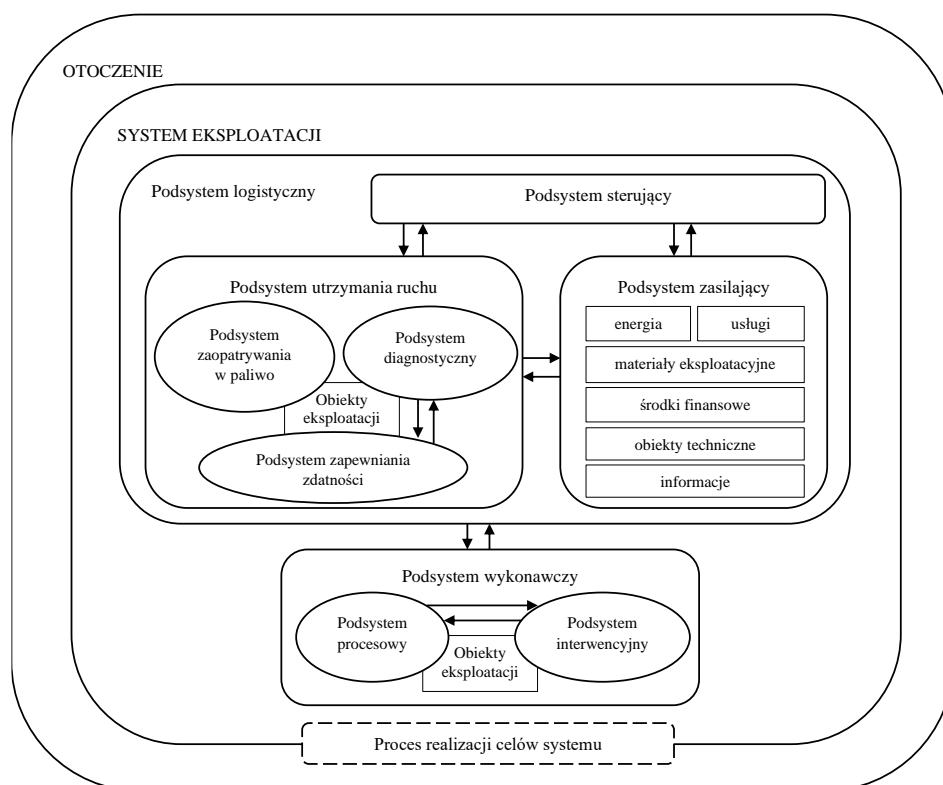
Złożoność systemów eksploatacji polega na tym, że systemy tego typu zbudowane są z dużej liczby podsystemów i elementów oraz posiadają skomplikowaną strukturę, w której pomiędzy podsystemami i elementami systemu zachodzi znaczna liczba różnorodnych relacji. Uporządkowanie działań w systemie możliwe jest w wyniku opracowania dekompozycji systemu, czyli wyodrębnienie na różnych poziomach złożoności jego składowych oraz podział zadań, kompetencji i odpowiedzialności pomiędzy te podsystemy [76]. W złożonym systemie realizowana jest znaczna liczba funkcji w podsystemach znajdujących się na poszczególnych poziomach dekompozycji, często sterowanych w sposób hierarchiczny. Na najniższym poziomie dekompozycji systemu złożonego znajdują się niepodzielne podsystemy nazwane podsystemami elementarnymi (elementy). Podział systemu na podsystemy jest podziałem umownym, zależnym od przyjętego celu badań [106].

Tab. 3.4. Dekompozycja systemu eksploatacji autobusów miejskich

L.p.	Poziomy dekompozycji		
	1	2	3
1	Podsystem wykonawczy	Podsystem procesowy	Podsystem roboczy
			Podsystem rezerwowy
		Podsystem interwencyjny	-
2	Podsystem logistyczny	Podsystem sterujący	Podsystem zarządzania eksploatacją
			Podsystem informacyjny
			Podsystem użytkowania
		Podsystem utrzymania ruchu	Podsystem zaopatrzenia w paliwo
			Podsystem zapewniania zdatności
			Podsystem diagnostyczny
Podsystem zasilający	-		

Na podstawie badań przeprowadzonych w rzeczywistym systemie eksploatacji autobusów miejskich wyróżniono jego dwa główne podsystemy,

a wśród nich wyodrębniono podsystemy niższego szczebla. Dekompozycję analizowanego systemu eksploatacji środków transportu przedstawiono w tabeli 3.4, a jego model na rysunku 3.3. Na rysunku 3.3 strzałkami ciągłymi oznaczono relacje pomiędzy wyróżnionymi podsystemami.



Rys. 3.3. Model systemu eksploatacji środków transportu

Rozpatrywany system eksploatacji autobusów miejskich jest systemem działaniowym, co oznacza, że oddziałuje na otoczenie i tak reaguje na jego wpływ, aby osiągnąć określony cel. Warunkiem koniecznym racjonalnego działania systemu jest to, aby kolejność następujących po sobie stanów systemu doprowadziła do osiągnięcia zamierzonego stanu umożliwiającego prawidłową realizację celów systemu. System ten jest zatem systemem sterowalnym, w którym rolę organu sterującego pełni człowiek.

W podsystemie wykonawczym będącym jednym z dwóch głównych podsystemów systemu eksploatacji, podejmowane są działania mające na celu zapewnienie prawidłowej realizacji zadań przewozowych. Realizacja zadań przewozowych w zakresie przewozu osób na terenie miasta wykonywana jest w podsystemie procesowym składającym się z podsystemów: roboczego oraz rezerwowego. Obydwa podsystemy złożone są z podsystemów elementarnych

typu człowiek-obiekt techniczny, w przypadku rozpatrywanego systemu eksploatacji jest to kierowca-autobus. W podsystemie roboczym znajdują się obiekty podstawowe (autobusy miejskie) realizujące zadanie przewozowe na wyznaczonych trasach zgodnie z przyjętym harmonogramem (rozkładem jazdy autobusów miejskich). Podsystem rezerwowy stanowi bazę obiektów rezerwowych, które realizują zadania przewozowe zastępując niezdatne obiekty podstawowe.

Podsystem procesowy współpracuje z podsystemem interwencyjnym, którego celem jest naprawa środków transportu uszkodzonych na trasie, w trakcie realizacji zadania przewozowego. Zaplecze tego podsystemu stanowią specjalistyczne jednostki pogotowia technicznego, które diagnozują na trasie stan uszkodzonych autobusów miejskich i w miarę możliwości dokonują ich uzdatnienia umożliwiając kontynuację realizowanego zadania przewozowego. Jeżeli uzdatnienie pojazdu trwa w dłuższym przedziale czasu, ale jest możliwe do przeprowadzenia na trasie, wówczas uszkodzony pojazd podlega naprawie z utratą kursu i oczekuje na przydzielenie kolejnego zadania przewozowego (kolejnego kursu). W przypadku gdy uszkodzenie jest na tyle poważne, że jednostka pogotowia technicznego nie ma możliwości przeprowadzenia naprawy na trasie, uszkodzony autobus miejski kierowany jest na stanowisko diagnostyczne w stacji obsługi. Zjazd autobusu z trasy może odbywać się samodzielnie lub przy pomocy holownika, jeżeli samodzielny zjazd nie jest możliwy.

W podsystemie logistycznym na kolejnym poziomie dekompozycji wyróżnia się podsystemy: sterujący, utrzymania ruchu oraz zasilający. Głównym zadaniem podsystemu sterującego jest pełnienie funkcji kierującej i nadzorującej działanie systemu eksploatacji środków transportu a także precyzowanie jego celów działania. Z punktu widzenia zarządzania eksploatacją podsystem sterujący ma za zadanie opracowanie planów działań, obejmujących wyznaczenie podmiotów oraz przedmiotów działania, form, czasu, miejsca i zakresu działania oraz ustalenie kosztów i realnych dochodów uzyskiwanych z tych działań. W tym podsystemie opracowuje się również plany pozyskiwania, przetwarzania, gromadzenia oraz przepływu materiałów, energii i informacji. Ponadto podsystem sterujący ma za zadanie pobudzanie do działań, bieżącą kontrolę realizacji zadań oraz ich koordynowanie, nadzorowanie i ocenianie ich wyników, sterowanie składowaniem i zabezpieczeniem materiałów oraz sterowanie utrzymaniem w ruchu podstawowych środków działań, tj. autobusów miejskich, jednostek pogotowia technicznego, aparatury, itp. [76]. W relacji hierarchicznej do podsystemu sterującego znajdują się podsystem utrzymania ruchu, podsystem zasilający oraz podsystem wykonawczy.

W podsystemie utrzymania ruchu realizowane są czynności dotyczące zaopatrywania pojazdów w paliwo, kontrole diagnostyczne stanu pojazdów wykonywane po uszkodzeniach lub naprawach, obsługi w dniu użytkowania, okresowe obsługi techniczne oraz naprawy uszkodzonych pojazdów. Ze względu

na przyjęte kryteria klasyfikacji każdemu rodzajowi środków transportu można przyporządkować charakterystyczne rodzaje obsługi. Kryteriami tymi są [50]:

- czas występowania obsługi,
- jedno lub wielokrotność występowania obsługi,
- okresowość występowania obsługi,
- cel obsługi,
- stan techniczny obiektu.

Na podstawie powyższych kryteriów oraz zakresu czynności technicznych i organizacyjnych w podsystemach utrzymania ruchu można wyróżnić następujące rodzaje obsługi [50]:

- w dniu użytkowania, nazywaną też obsługą codzienną (OC),
- okresową (OO) nazywaną też obsługą techniczną (OT), którą oznacza się kolejnymi numerami, np. OT-1, OT-2, itd.,
- gwarancyjną (OG),
- zabezpieczającą (konserwacyjną) (OZ),
- sezonową (OS),
- diagnostyczną (kontrola stanu) (OD),
- transportowanie (Tr),
- magazynowanie (Mg).

Zadaniem podsystemu zasilającego jest prognozowanie zapotrzebowania oraz zaopatrywanie w usługi, materiały eksploatacyjne, obiekty techniczne, energię, środki finansowe i informacje.

Efektywność działań realizowanych w podsystemie wykonawczym oraz podsystemie logistycznym decyduje o efektywności realizowanego procesu eksploatacji.

3.3. IDENTYFIKACJA PROCESU EKSPLOATACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU

Proces eksploatacji obiektów technicznych stanowi ogół procesów dotyczących tych obiektów w fazie ich eksploatacji i decyduje o efektywności ich zastosowania lub możliwościach realizacji celów częściowych [76]. Właściwa identyfikacja procesu eksploatacji obiektów technicznych oraz składowych tego procesu umożliwia prawidłowe sterowanie i nadzór nad działaniem systemu eksploatacji i jego podsystemów. W procesie eksploatacji realizowanym w obiekcie badań, zgodnie z wiedzą przedstawioną w pracach [76, 105, 106], wyróżniono dwa zbiory procesów dotyczących środków transportu w fazie ich eksploatacji:

- procesy sterowane,
- procesy niesterowane, będące procesami destrukcyjnymi, spowodowane zużywaniem się i starzeniem elementów maszyn.

Wśród procesów sterowanych, realizowanych w analizowanym systemie eksploatacji środków transportu, najbardziej istotnymi procesami z punktu widzenia zapewnienia prawidłowej realizacji przewozów pasażerskich, są

procesy użytkowania, zapewniania zdatności i diagnozowania środków transportu [105, 107].

W ramach identyfikacji analizowanego procesu eksploatacji autobusów miejskich poniżej przedstawiono opis głównych składowych tego procesu, a następnie wyszczególniono istotne z punktu widzenia celu badań stany eksploatacyjne oraz opracowano graf stanów modelu tego procesu.

3.3.1. Użytkowanie

Użytkowanie środków transportu jest to proces, w którym autobusy miejskie wraz z operatorami (kierowcami) realizują przydzielone im zadania przewozowe. Zadania przewozowe wykonywane są zgodnie z obowiązującym rozkładem jazdy autobusów na poszczególnych liniach komunikacyjnych, według istniejącego planu tras, opracowanych przez Zarząd Dróg Miejskich i Komunikacji Publicznej w wybranej aglomeracji miejskiej.

Realizacja przewozów pasażerskich podzielona jest na pięć przedziałów dobowych:

- szczyt komunikacyjny poranny (w godz. 5:00 - 9:00),
- przedział międzyszczytowy (w godz. 9:00 - 13:00),
- szczyt komunikacyjny popołudniowy (w godz. 13:00 - 19:00),
- godziny wieczorne (w godz. 19:00 - 23:00),
- przewozy nocne (w godz. 23:00 - 5:00).

Dla każdego z wyżej wymienionych przedziałów dobowych przydzielona jest odpowiednia liczba autobusów w danej klasie umożliwiającą prawidłową realizację przewozów pasażerskich. Podział analizowanego taboru autobusowego według klasy w zależności od przedziałów dobowego realizowanych przewozów przedstawiono w tabeli 3.5. Zgodnie z nomenklaturą branżową klasy autobusu oznaczono w następujący sposób:

- D – autobusy „długie” klasy MEGA,
- K – autobusy „krótkie” klasy MAXI,
- M – autobusy klasy MIDI.

Tab. 3.5. Klasy i liczby autobusów realizujących zadania przewozowe w danym przedziale dobowym

Przedział dobowy	5:00 - 9:00			9:00 - 13:00			13:00 - 19:00			19:00 - 23:00			23:00 - 5:00		
	D	K	M	D	K	M	D	K	M	D	K	M	D	K	M
Liczba autobusów	73	51	2	60	30	2	71	52	2	30	37	2	0	13	0
SUMA	126			92			125			69			13		

Liczba oraz zakres realizowanych zadań przewozowych w analizowanym systemie eksploatacji charakteryzuje się zmienną wartością w ciągu doby.

W związku z większym zapotrzebowaniem na realizację zadań przewozowych w godzinach szczytów komunikacyjnych, na trasę wysyłana jest większa liczba autobusów „długich” klasy MEGA i autobusów „krótkich” klasy MAXI.

Monitorowanie prawidłowości i terminowości realizowanego procesu przewozowego odbywa się przy zastosowaniu elektronicznego systemu kontroli (systemu pomiarowego znajdującego się na wybranych przystankach oraz pomiędzy przystankami) a także przy użyciu dokumentacji ewidencyjno-rozliczeniowej. Najważniejszym dokumentem z punktu widzenia użytkownika środka transportu jest Karta drogowa. Dokument ten jest wydawany kierowcy przez dyspozytora przy pierwszym wyjeździe na trasę w danym dniu. Ponadto kierowca w dniu wyjazdu przed rozpoczęciem pierwszego kursu otrzymuje dokumenty pojazdu oraz dokument Zlecenia naprawy, zawierający informacje o braku stwierdzonych uszkodzeń w pojeździe.

Karta drogowa wystawiana jest każdego dnia dla danego pojazdu na podstawie Karty drogowej z dnia poprzedniego. W bieżącej Karcie drogowej znajduje się informacja o przeprowadzonej obsłudze codziennej autobusu, która została wykonana po zakończeniu wszystkich zadań przewozowych realizowanych dzień wcześniej. Jeżeli w ramach obsługi codziennej nie wykryto uszkodzeń w pojeździe to jest on kierowany na plac postojowy, gdzie oczekuje do dnia następnego na przydzielenie nowego zadania przewozowego. Poprzednia Karta drogowa przekazywana jest do Działu Techniczno-Eksploatacyjnego celem ewidencji i kontroli czasu pracy kierowcy oraz zużycia paliwa przez autobus.

W Karcie drogowej dyspozytor odnotowuje godziny każdego wyjazdu z terenu i wjazdu na teren zajezdni autobusowej, natomiast kierowca wpisuje godziny rozpoczęcia i zakończenia kursów wraz z liczbą przebytych kilometrów.

3.3.2. Naprawa realizowana przez jednostkę pogotowia technicznego (PT) na trasie

Jeżeli podczas realizacji zadania przewozowego kierowca stwierdzi uszkodzenie autobusu, to niezwłocznie zgłasza drogą radiową informację o wykrytych nieprawidłowościach, ich rodzaju oraz miejscu występowania do Centrali ruchu. Centrala ruchu, przy uwzględnieniu aktualnego obciążenia realizacją zadań poszczególnych jednostek pogotowia technicznego oraz informacji dotyczących realizowanych przewozów przez pozostałe autobusy, podejmuje decyzję o rodzaju interwencji. W ramach interwencji Centrala ruchu podejmuje następujące działania:

- wysłanie jednostki pogotowia technicznego PT celem wykonania naprawy,
- wysłanie jednostki pogotowia technicznego PT celem holowania uszkodzonego autobusu do stacji obsługi,
- skierowanie autobusu do stacji obsługi w ramach samodzielnego zjazdu celem wykonania naprawy.

Informacje o rodzaju podjętych działań oraz stosowne dyspozycje przekazywane są drogą radiową kierowcy i odpowiedniej jednostce PT. Zaistniałe zdarzenia rejestrowane są w Karcie zjazdów awaryjnych oraz Karcie przestojów.

W przypadku wysłania na miejsce zdarzenia jednostki pogotowia technicznego, czas oczekiwania na jej przybycie może przyjmować różne wartości w zależności od:

- miejsca wystąpienia uszkodzenia na trasie,
- miejsca, w którym znajduje się jednostka PT,
- aktualnego natężenia ruchu drogowego.

W trakcie interwencji mechanik pogotowia technicznego diagnozuje stan autobusu, a rodzaj uszkodzenia w postaci kodu wpisuje do Zlecenia naprawy. W zależności od oceny stanu uszkodzonego autobusu, jest on naprawiany przez mechaników PT albo zostaje skierowany do zajezdni autobusowej. Jeżeli powstałe uszkodzenie jest na tyle poważne, że mechanicy PT nie są w stanie wykonać naprawy na trasie, a autobus nie ma możliwości realizacji samodzielnego zjazdu, zostają podjęte działania zmierzające do holowania pojazdu do stacji obsługi przez przeznaczoną do tego celu jednostkę PT.

Informację o wykonanej naprawie, zjeździe awaryjnym lub holowaniu pojazdu mechanicy PT przekazują do Centrali ruchu i odnotowują podjęte działania w Zleceniu naprawy. Autobus, który został naprawiony przez jednostkę pogotowia technicznego PT oczekuje na ponowne przydzielenie zadania przewozowego zgodnie z rozkładem jazdy autobusów.

W sytuacji, gdy naprawa uszkodzonego na trasie środka transportu może doprowadzić do zakłócenia terminowości realizowanych przewozów pasażerskich, wówczas Centrala ruchu podejmuje decyzję o skierowaniu na trasę pojazdu rezerwowego, który zastępuje pojazd uszkodzony.

Jeżeli uszkodzenie nie kwalifikuje się do naprawy przez jednostkę PT, co kierowca jest w stanie zidentyfikować na podstawie wytypowanych, wyróżniających się objawów uszkodzeń, wówczas Centrala ruchu może podjąć decyzję o samodzielnym zjeździe awaryjnym autobusu do stacji obsługi. Samodzielny zjazd awaryjny może odbyć się pod warunkiem spełnienia wymogów bezpieczeństwa oraz pewności, że nie wystąpiło uszkodzenie głównych układów (kierowniczego, hamulcowego, napędowego) lub wyciek płynów eksploatacyjnych.

3.3.3. Obsługa w dniu użytkowania (obsługa codzienna OC)

Obsługa w dniu użytkowania (obsługa codzienna OC) autobusu odbywa się na wyznaczonych stanowiskach przeznaczonych wyłącznie do obsługi pojazdów w dniu ich użytkowania. Obsługę wykonują wykwalifikowani pracownicy – mechanicy pod nadzorem mistrza zmiany. Na stanowiska obsługi codziennej kierowane są środki transportu, które zakończyły w danym dniu realizację przydzielonych zadań przewozowych i kolejno przybyły do miejsca wykonania

OC. Największa liczba obsług codziennych realizowana jest późnym wieczorem oraz w godzinach nocnych (20:00-24:00), co wynika z zakończenia dużej liczby kursów w tym przedziale dobowym, zgodnie z obowiązującym rozkładem jazdy autobusów miejskich.

W zakresie wykonywanych czynności na stanowiskach obsługi codziennej pojazdów realizowane są:

- kontrola głównych układów pojazdu tj. kierowniczego, hamulcowego, napędowego;
- sprawdzenie szczelności układów: chłodzenia, zasilania i hydraulicznego;
- sprawdzenie stanu ogólnego pojazdu (czystości pojazdu, oględziny nadwozia, kontrola stanu ogumienia, obudowy reflektorów i lamp zespolonych oraz lusterek);
- kontrola poziomu płynów eksploatacyjnych wraz z ich uzupełnieniem (w zbiorniczkach w komorze silnika oraz stanowiących zapas, olej w misce olejowej, płyn hamulcowy, płyn chłodniczy, płyn do spryskiwaczy);
- kontrola nadajników identyfikacyjnych i kasowników;
- kontrola oświetlenia zewnętrznego i wewnętrznego;
- czyszczenie wnętrza i mycie autobusów;
- odnotowanie zrealizowanej obsługi codziennej w Karcie drogowej.

Wykonywane czynności w ramach OC realizowane są najczęściej metodą organoleptyczną. Umożliwia to dostosowanie czasu przebywania jednego autobusu na stanowisku obsługi codziennej do wydajności stanowisk. Czas obsługi jednego autobusu wynosi od 6 do 14 minut. Jeżeli w trakcie realizacji OC zostanie wykryte uszkodzenie autobusu, które nie jest możliwe do usunięcia w ramach wykonywanej obsługi, to pojazd kierowany jest na stanowisko naprawy w stacji obsługi. W celu realizacji naprawy wystawiane jest Zlecenie naprawy, natomiast w Karcie drogowej nie odnotowuje się wykonania OC. Dopiero po przywróceniu autobusowi stanu zdatności do realizacji zadania jest on ponownie kierowany na stanowisko obsługi codziennej.

Po wykonanej obsłudze codziennej, w trakcie której nie wykryto uszkodzeń, autobus zostaje skierowany na plac postojowy i oczekuje na przydzielenie zadania przewozowego w dniu następnym.

3.3.4. Okresowa obsługa techniczna OT

W ramach realizowanej strategii eksploatacyjnej w badanym systemie eksploatacji autobusów miejskich wykonuje się okresowe obsługi techniczne środków transportu (OT). Zgodnie z ustalonym normatywem w obiekcie badań wyróżnia się trzy rodzaje obsług technicznych: OT-1, OT-2 i OT-3. Zakres czynności realizowanych w każdej z wymienionych rodzajów OT oraz częstość ich wykonywania określone są przez producenta danego typu taboru i wykonywane według przyjętych harmonogramów. Przykładowy harmonogram

obsług technicznych dla autobusów marki Mercedes-Benz zamieszczono w tabeli 3.6.

Tab. 3.6. Harmonogram obsług technicznych wybranych typów autobusów marki Mercedes-Benz eksploatowanych w badanym systemie eksploatacji środków transportu

Marka i typ autobusu	Rodzaj obsługi technicznej	Przebieg [km]
Mercedes Benz 628 Conecto G,	OT-1	30 000
	OT-2	60 000
Mercedes Benz 628 O530 G Citaro	OT-1	90 000
	OT-3	120 000

W zakres obsługi technicznej wchodzi zadania obsługowe i kontrolne obejmujące czynności z zakresu obsługi codziennej oraz działania będące jej uzupełnieniem i rozszerzeniem w szczególności:

- kontrola stanu akumulatora i poziomu elektrolitu;
- oczyszczanie filtrów: paliwa, powietrza, oleju;
- dokręcanie śrub i nakrętek;
- czynności smarownicze m.in.: łożysk, wałków, sworzni, połączeń elementów oraz części ruchomych pojazdu;
- czynności kontrolno-przeładowe, w szczególności sprawdzenie: stanu osi i kół jezdnych, luzów w układzie kierowniczym, stanu elementów układu zawieszenia, szczelności i stanu przewodów i pompy hamulcowej, luzu pedału sprzęgła i hamulca, pracy silnika, działania rozrusznika i prądnicy, szczelności przewodów układu paliwowego, stanu i działania sygnałów, świateł wewnętrznych i zewnętrznych, zamocowania siedzeń, stanu drzwi i okien, poręczy i stopni schodów, ustawienia zbieżności kół.

Dla każdej z wyżej wymienionych czynności obsługowych producent określa pracochłonność mierzoną w roboczogodzinach z podziałem na autobusy „długie” i autobusy „krótkie”.

Najważniejsze czynności wykonywane podczas obsługi technicznej zostają odnotowane w Karcie obsług technicznych danego autobusu. W sytuacji, gdy uszkodzenia wykryte podczas realizacji obsługi technicznej wykraczają poza zakres tej obsługi, autobus kierowany jest na stanowisko naprawy, a informacja o uszkodzeniu zostaje zamieszczona w Karcie kontrolnej.

Po zakończonej obsłudze technicznej, podczas której usunięto wykryte uszkodzenia i doprowadzono autobus do stanu umożliwiającego realizację zadań transportowych, autobus kierowany jest na plac postoju i tam oczekuje na przydzielenie kursu przewozowego.

3.3.5. Naprawa realizowana na stanowiskach w stacji obsługi

Uszkodzone środki transportu podlegają naprawom bieżącym na stanowiskach w stacji obsługi znajdujących się w zajezdni autobusowej.

Autobusy mogą zostać skierowane do naprawy po wystąpieniu na trasie zdarzenia niepożądanego, w wyniku którego autobus wykonał zjazd awaryjny lub był holowany a także po wykryciu uszkodzenia, podczas realizacji obsługi codziennej lub okresowej, którego nie można było usunąć w trakcie tej obsługi ze względu na zakres uszkodzenia.

Jeżeli autobus został uszkodzony na trasie i zjechał do zajezdni autobusowej, dyspozytor ruchu odnotowuje w Karcie zjazdów awaryjnych następujące informacje:

- datę i godzinę zjazdu,
- numer kierowcy,
- numer ewidencyjny autobusu,
- numer linii,
- numer Zlecenia naprawy,
- numer kierowcy autobusu zastępczego,
- numer ewidencyjny autobusu zastępczego,
- czas trwania podmiany autobusów na trasie.

Wszystkie uszkodzone autobusy skierowane do naprawy oczekują na wyznaczenie stanowiska naprawczego w warsztacie naprawczym przez mistrza zmiany. Po przydzieleniu stanowiska odnotowuje się następujące informacje w Rejestrze napraw:

- numer ewidencyjny autobusu,
- rodzaj uszkodzenia,
- opis uszkodzenia,
- godzinę przyjęcia autobusu do naprawy,
- godzinę zakończenia naprawy,
- nazwisko mechanika wykonującego naprawę.

Na stanowiskach naprawczych w stacji obsługi wykonywane są naprawy bieżące i specjalistyczne uszkodzonych układów autobusów. Jeżeli konieczna jest wymiana uszkodzonego elementu na nowy, to element ten najczęściej pobierany jest z magazynu. W przypadku konieczności przeprowadzenia specjalistycznych napraw głównych zespołów autobusu, np. silnika, skrzyni biegów, mostu napędowego, elementy te zostają wymontowane z pojazdu i przekazane do wyznaczonych specjalistycznych stanowisk naprawczych celem wykonania ich naprawy lub regeneracji. Na podstawie wykonanej naprawy specjalistycznej sporządzana jest informacja, wpisana w Zlecenie naprawy, zawierająca następujące dane:

- godzina rozpoczęcia naprawy,
- godzina zakończenia naprawy,
- rodzaje i opis wykonywanych czynności naprawczych,
- nazwisko mechanika wykonującego naprawę.

W szczególnych przypadkach uszkodzone elementy wysyłane są także do zewnętrznych zakładów naprawczych.

Po zakończonej naprawie autobusu dyspozytor ruchu otrzymuje informację o wykonaniu naprawy. W zależności od chwili zakończenia naprawy pojazd

kierowany jest przez dyspozytora na określoną trasę komunikacyjną w celu realizacji nowego kursu przewozowego lub na plac postojowy, gdzie oczekuje na przydzielenie nowych zadań przewozowych.

3.3.6. Diagnostowanie

Jeżeli naprawie w stacji obsługi podlegały elementy głównych układów środka transportu, tj.: napędowego, hamulcowego lub kierowniczego, to obowiązkowo autobus zostaje skierowany na stanowisko diagnostyczne celem oceny jego stanu technicznego i poprawności wykonanej naprawy.

W procesie diagnostowania stanu autobusów zespół diagnostów wykonuje czynności kontrolne i pomiarowe naprawionych zespołów, które umożliwiają weryfikację ewentualnych przekroczeń dopuszczalnych norm, ocenę stanu technicznego pojazdu i wykrycie błędów wykonanej naprawy.

W wyniku diagnostowania po wykonanej naprawie uszkodzenia wykrytego podczas realizacji OC lub OT diagnosta podejmuje decyzję o skierowaniu pojazdu na plac postojowy w celu oczekiwania na realizację zadania przewozowego lub skierowaniu pojazdu na stanowisko naprawcze do stacji obsługi w celu wykonania ponownej naprawy. Jeżeli natomiast diagnostowanie autobusu odbyło się po wykonanej naprawie wynikającej z uszkodzenia w wyniku wystąpienia zdarzenia niepożądanego na trasie autobus zostaje skierowany na stanowisko uzupełnia paliwa i kolejno na OC lub OT lub wraca na stanowisko naprawcze w przypadku konieczności wykonania ponownej naprawy.

3.4. GRAF STANÓW MODELU PROCESU EKSPLOATACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU

W wyniku identyfikacji systemu eksploatacji autobusów miejskich i realizowanego w nim procesu eksploatacji wyszczególniono istotne stany eksploatacyjne tego procesu, w których może przebywać badany obiekt techniczny (autobus miejski). Na podstawie analizy przestrzeni stanów eksploatacyjnych oraz zdarzeń eksploatacyjnych dotyczących autobusów komunikacji miejskiej eksploatowanych w rzeczywistym, badanym systemie transportu miejskiego opracowano graf stanów modelu procesu eksploatacji, będącego wielostanowym procesem stochastycznym. W omawianym modelu wyróżniono 21 stanów eksploatacyjnych.

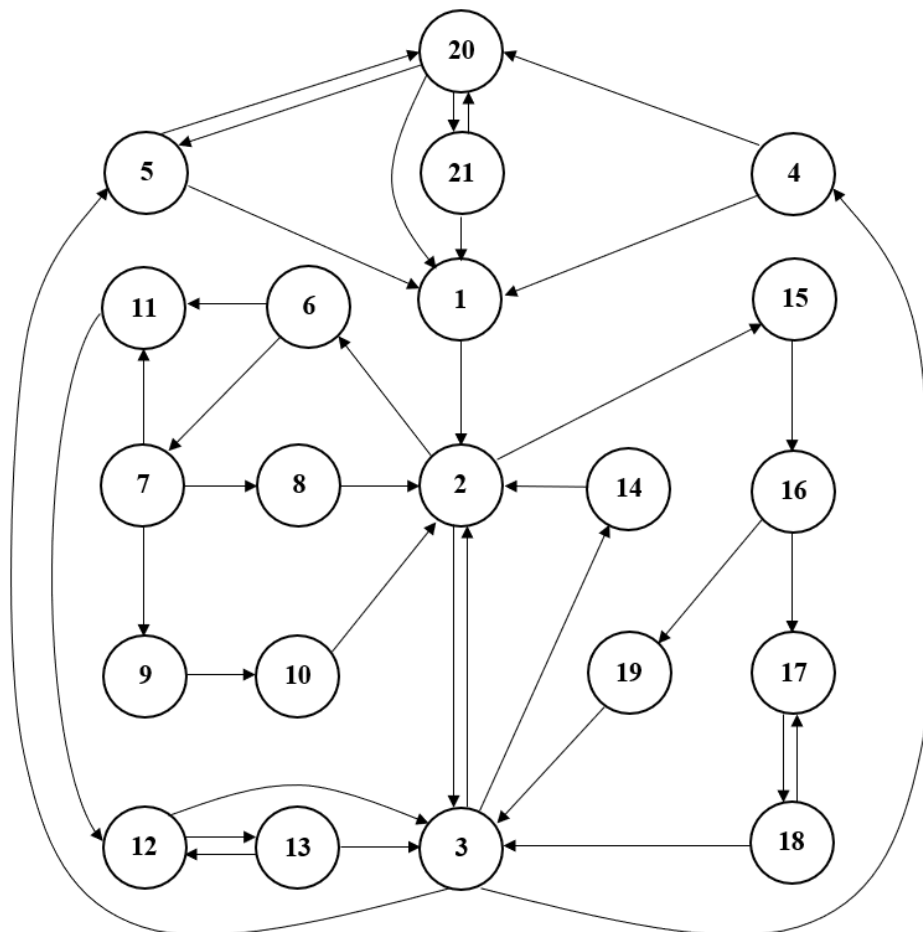
Model procesu eksploatacji został opracowany wieloetapowo. W pierwszym etapie, na podstawie kryteriów istotności stanów (kryterium ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych i kryterium gotowości) wyróżniono 10 stanów eksploatacyjnych. Do opracowania tego modelu zastosowano dane dotyczące 30 losowo wybranych autobusów miejskich. Założeniem do budowy modelu w pierwszym etapie badań było przedstawienie analizowanego procesu eksploatacji w sposób uproszczony, jako badania wstępne do opracowania

metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych zaproponowanej w pracy doktorskiej. Wyniki badań modelu 10-stanowego, dotyczące zarówno wyznaczania ryzyka, jego analizy i oceny jak i innych kryteriów eksploatacyjnych zostały przedstawione w publikacjach [58–60, 89, 90]. W kolejnych etapach prac podjęto próbę analizy badanego procesu eksploatacji w bardziej szczegółowy sposób i w tym celu opracowano 16- i 19-stanowe grafy stanów modelu procesu eksploatacji. Wyniki badań poświęconych problematyce ryzyka na podstawie zbudowanego 19-stanowego modelu procesu eksploatacji przedstawiono w pracy [88].

Opracowanie wyżej wymienionych wstępnych modeli procesu eksploatacji środków transportu oraz modelu wyznaczania ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych stanowiło podstawę realizacji dalszych etapów prac, w tym opracowania 21-stanowego modelu procesu eksploatacji środków transportu oraz modelu wyznaczania i oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w badanym systemie eksploatacji.

Celem budowy modelu procesu eksploatacji składającego się z 21 stanów eksploatacyjnych była potrzeba zwiększenia szczegółowości analizowanego procesu eksploatacji oraz wnikliwego zbadania występujących zależności między zdarzeniami, istotnymi z punktu widzenia analizowanych kryteriów. Dla zwiększonej liczby stanów eksploatacyjnych, w porównaniu do wyżej wymienionych modeli, zaistniała możliwość wyodrębnienia różnych rodzajów ryzyka odnoszących się do odmiennych zagrożeń. Celowość opracowania modelu 21-stanowego jest ponadto uzasadniona możliwością wskazania określonych decyzji (spośród zbioru wielu decyzji możliwych do wyboru), które należy podjąć w etapie sterowania procesem eksploatacji, w taki sposób, aby decyzje te były optymalne z punktu widzenia analizowanych kryteriów.

21-stanowy model został opracowany na podstawie danych dotyczących 149 autobusów miejskich eksploatowanych w badanym systemie w analizowanym przedziale czasu. Graf stanów omawianego modelu procesu eksploatacji przedstawiono na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Graf stanów modelu procesu eksploatacji środków transportu (1-postój na placu zajezdni autobusowej, 2-realizacja zadania przewozowego, 3-zaopatrywanie w paliwo, 4-obługa codzienna OC, 5-obługa techniczna OT, 6-przestój po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego, 7-diagnozowanie przez pogotowie techniczne po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego, 8- naprawa przez pogotowie techniczne bez utraty kursu, 9-naprawa przez pogotowie techniczne z utratą kursu, 10-oczekiwanie na realizację zadania przewozowego, 11-zjazd awaryjny, 12-naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego, 13-diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie wynikającej z uszkodzenia w trakcie realizacji zadania przewozowego, 14-oczekiwanie na przydzielenie zadania przewozowego, 15-przestój spowodowany kolizją lub wypadkiem, 16-akcja interwencyjno-ratownicza po kolizji lub wypadku, 17-naprawa po kolizji lub wypadku, 18-diagnozowanie po naprawie po kolizji lub wypadku, 19-wymiana pojazdu po kolizji lub wypadku, 20-naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu wykrytym podczas OC lub OT, 21-diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie wynikającej z uszkodzenia wykrytego podczas OC lub OT)

W przedstawionym grafie zdarzeniowym wyróżniono i scharakteryzowano następujące stany eksploatacyjne:

1 – postój na placu zajezdni autobusowej

Stan postoju na placu zajezdni autobusowej dotyczy zdatnych obiektów technicznych (autobusów) oczekujących na rozpoczęcie zadania przewozowego:

- po zaopatrzeniu w paliwo oraz zrealizowanej obsłudze codziennej na stanowiskach stacji obsługi,
- po zaopatrzeniu w paliwo oraz zrealizowanej obsłudze technicznej (okresowej lub sezonowej) na stanowiskach stacji obsługi,
- po wykonanej naprawie w stacji obsługi SO po wykryciu uszkodzenia na OC lub OT,
- po diagnozowaniu przeprowadzonym po wykonanej naprawie w SO po wykryciu uszkodzenia na OC lub OT.

2 – realizacja zadania przewozowego

Stan realizacji zadania przewozowego jest to stan, w którym obiekt techniczny (autobus) wraz z operatorem (kierowcą) realizują przydzielone zadanie przewozowe, w szczególności ten stan dotyczy:

- przydzielenia numeru trasy oraz numerów kursów, zgodnie z obowiązującym rozkładem jazdy,
- przejazdu z placu zajezdni autobusowej do miejsca postojowego na początku trasy,
- przejazdów przydzieloną trasą, zgodnie z obowiązującym rozkładem jazdy,
- postojów w trakcie przerw między kursami, wynikających z obowiązującego rozkładu jazdy,
- zjazdu do zajezdni autobusowej po zrealizowaniu przydzielonego zadania przewozowego w celu przygotowania obiektu technicznego do realizacji kolejnego zadania.

3 – zaopatrywanie w paliwo

Stan zaopatrywania w paliwo jest to stan, w którym realizowane są czynności dotyczące napełniania zbiorników paliwa w obiektach technicznych. W analizowanym systemie transportu miejskiego uzupełnianie paliwa w autobusach wykonywane jest na stanowiskach stacji paliw:

- w autobusach zdatnych (zjazd planowy) – bezpośrednio po zakończeniu realizacji dobowego zadania przewozowego,
- w autobusach zdatnych, realizujących dobowe zadanie przewozowe tylko podczas szczytów komunikacyjnych (porannego i popołudniowego), w których po wykonanym porannym zadaniu uzupełniane jest paliwo zgodnie z harmonogramem, a następnie autobusy oczekują na przydzielenie kolejnego zadania przewozowego,
- w autobusach, w których zrealizowano naprawę w stacji obsługi po wystąpieniu uszkodzenia na trasie realizacji zadania przewozowego,
- w autobusach, które zostały poddane diagnozowaniu po naprawie wynikającej z uszkodzenia w trakcie realizacji zadania przewozowego i nie było konieczności realizacji kolejnej naprawy,

- w autobusach, które zostały poddane diagnozowaniu po kolizji lub naprawie powypadkowej i nie było konieczności realizacji kolejnej naprawy,
- w autobusach nowych, zakupionych po likwidacji autobusu uszkodzonego w wyniku kolizji lub wypadku i nienadającego się do naprawy.

4 – obsługa codzienna OC

Stan obsługiwanego codziennego jest to stan, w którym na stanowiskach stacji obsługi realizowane są usługi autobusów w dniu użytkowania. W ramach obsługi codziennej sprawdzeniu podlegają główne układy pojazdu (kierowniczy, hamulcowy i napędowy) oraz stan ogólny pojazdu, w szczególności: stan ogumienia, stan obudowy reflektorów i lamp, stan lusterek, uszkodzenia nadwozia oraz czystość pojazdu. Ponadto realizuje się następujące czynności:

- sprawdzenie szczelności układów: chłodzenia, zasilania i hydraulicznego;
- kontrola poziomu płynów eksploatacyjnych wraz z ich uzupełnieniem;
- kontrola nadajników identyfikacyjnych i kasowników;
- kontrola oświetlenia zewnętrznego i wewnętrznego;
- czyszczenie wnętrza i mycie autobusów;
- odnotowanie zrealizowanej obsługi codziennej w Karcie drogowej.

5 – obsługa techniczna OT

Stan obsługiwanego technicznego jest to stan, w którym na stanowiskach stacji obsługi realizowane są usługi okresowe i sezonowe obiektów technicznych, wykonywane przynajmniej raz na kwartał. W ramach obsługi technicznej wykonywane są czynności podlegające obsłudze codziennej oraz uzupełnione o następujący zakres:

- kontrola stanu akumulatora i poziomu elektrolitu;
- czyszczenie filtrów: paliwa, powietrza, oleju;
- dokręcanie śrub i nakrętek;
- czynności smarownicze m.in.: łożysk, wałków, sworzni, połączeń elementów, części ruchomych pojazdu;
- czynności kontrolno-przebiegowe, w szczególności sprawdzenie: stanu osi i kół jezdnych, luzów w układzie kierowniczym, stanu elementów układu zawieszenia, szczelności i stanu przewodów i pompy hamulcowej, luzu pedału sprzęgła i hamulca, pracy silnika, działania rozrusznika i prądnicy, szczelności przewodów układu paliwowego, stanu i działania sygnałów, świateł wewnętrznych i zewnętrznych, zamocowania siedzeń, stanu drzwi i okien, poręczy i stopni schodów, ustawienia zbieżności kół.

6 – przestój po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego

Stan przestoju spowodowany uszkodzeniem obiektu technicznego na trasie w trakcie realizacji zadania przewozowego dotyczy sekwencji następujących zdarzeń:

- przekazania przez kierowcę (drogą radiową) dyspozytorowi ruchu informacji i zaistniałym zdarzeniu,
- podjęcia decyzji przez dyspozytora ruchu o skierowaniu jednostki pogotowia technicznego celem wykonania naprawy lub holowania uszkodzonego

- autobusu do stacji obsługi lub samodzielnym zjeździe awaryjnym pojazdu do stacji obsługi,
- oczekiwania obiektu technicznego wraz z operatorem na przybycie jednostki pogotowia technicznego lub samodzielnego zjazdu obiektu do stacji obsługi.

7 – diagnozowanie przez pogotowie techniczne po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego

Stan diagnozowania przez pogotowie techniczne po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego jest to stan, gdy uszkodzony obiekt techniczny podlega procesowi diagnozowania na trasie przez jednostkę pogotowia technicznego. W wyniku diagnozowania zostaje określony rodzaj uszkodzenia i zakres naprawy.

8 – naprawa przez pogotowie techniczne bez utraty kursu

Stan naprawy obiektu technicznego bez utraty kursu po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego jest to stan, w którym realizowane są czynności mające na celu przywrócenie stanu zdatności zadaniowej uszkodzonemu obiektowi technicznemu. Naprawa obiektu technicznego realizowana jest na trasie przez jednostkę pogotowia technicznego w możliwie krótkim przedziale czasu, po którym możliwa jest kontynuacja realizowanego zadania przewozowego.

9 – naprawa przez pogotowie techniczne z utratą kursu

Stan naprawy obiektu technicznego z utratą kursu po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego jest to stan, w którym realizowane są czynności mające na celu przywrócenie stanu zdatności zadaniowej uszkodzonemu obiektowi technicznemu. Naprawa obiektu technicznego realizowana jest na trasie zadania lub na przystanku końcowym trasy (pętla autobusowa) przez jednostkę pogotowia technicznego. Uzdatnienie pojazdu wykonywane jest w możliwie krótkim przedziale czasu, jednak nieumożliwiającym kontynuacji realizowanego zadania przewozowego.

10 – oczekiwanie na realizację zadania przewozowego

Stan oczekiwania na realizację zadania przewozowego jest to stan, w którym obiekt techniczny po wykonanej naprawie na trasie lub na przystanku końcowym trasy oczekuje na przydzielenie i realizację kolejnego zadania przewozowego po utracie realizowanego kursu spowodowanej uszkodzeniem.

11 – zjazd awaryjny

Stan zjazdu awaryjnego jest to stan, w którym uszkodzenie obiektu technicznego jest na tyle poważne, że pogotowie techniczne nie ma możliwości przeprowadzenia naprawy na trasie lub na przystanku końcowym i obiekt jest kierowany do stacji obsługi wykonując samodzielny zjazd awaryjny lub w wyniku holowania przez specjalny pojazd pogotowia technicznego (holownik). Decyzję o skierowaniu pojazdu do stacji obsługi podejmuje dyspozytor ruchu w oparciu o informację od kierowcy o zaistniałym zdarzeniu i możliwych uszkodzeniach autobusu.

12 – naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego

Stan naprawy w stacji obsługi po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego jest to stan, w którym przebywa obiekt techniczny po zjeździe awaryjnym. W stanie naprawy w stacji obsługi realizowane są czynności mające na celu przywrócenie zdadności zadaniowej obiektu technicznego.

13 – diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie wynikającej z uszkodzenia w trakcie realizacji zadania przewozowego

Stan diagnozowania po naprawie wynikającej z uszkodzenia w trakcie realizacji zadania przewozowego jest to stan, w którym obiekt techniczny podlega procesowi diagnozowania na stanowisku diagnostycznym w stacji obsługi. W wyniku diagnozowania po naprawie diagnosta podejmuje decyzję o skierowaniu pojazdu na stanowisko stacji paliw w celu jego zaopatrzenia lub skierowaniu pojazdu na stanowisko naprawcze do stacji obsługi w celu wykonania ponownej naprawy.

14 – oczekiwanie na przydzielenie zadania przewozowego

Stan oczekiwania na przydzielenie zadania przewozowego jest to stan, w którym obiekt techniczny po wykonanym zadaniu przewozowym w szczycie porannym oraz zaopatrzeniu w paliwo oczekuje na przydzielenie kolejnego zadania przewozowego w szczycie popołudniowym. Stan oczekiwania na przydzielenie zadania przewozowego dotyczy wyznaczonych autobusów zgodnie z przyjętym harmonogramem.

15 – przestój spowodowany kolizją lub wypadkiem

Stan przestoju spowodowany kolizją lub wypadkiem obiektu technicznego na trasie dotyczy sekwencji następujących zdarzeń:

- przekazania przez kierowcę (drogą radiową) dyspozytorowi ruchu informacji i zaistniałym zdarzeniu,
- podjęcia decyzji przez dyspozytora ruchu - skierowanie jednostki pogotowia technicznego, powiadomienie policji oraz w razie konieczności powiadomienie służb ratunkowych (straż pożarna, pogotowie ratunkowe),
- oczekiwania obiektu technicznego po kolizji lub wypadku wraz z operatorem na przybycie dyspozytora ruchu, jednostki pogotowia technicznego, policji oraz służb ratunkowych.

16 – akcja interwencyjno-ratownicza po kolizji lub wypadku

Stan interwencji po kolizji lub wypadku jest to stan, w którym realizowane są czynności mające na celu usunięcie skutków zaistniałego zdarzenia, w szczególności dotyczy to zabezpieczenia miejsca zdarzenia, podjęcia działań przez policję i służby ratunkowe, skierowania uszkodzonego pojazdu do stacji obsługi (holowanie lub zjazd awaryjny) oraz w razie konieczności zastąpienia uszkodzonego pojazdu pojazdem rezerwowym.

17 – naprawa po kolizji lub wypadku

Stan naprawy po kolizji lub wypadku jest to stan, w którym w stacji obsługi realizowane są czynności mające na celu przywrócenie zdadności zadaniowej obiektu technicznego.

18 – diagnozowanie po naprawie po kolizji lub wypadku

Stan diagnozowania po naprawie po kolizji lub wypadku jest to stan, w którym obiekt techniczny podlega procesowi diagnozowania na stanowisku diagnostycznym w stacji obsługi. W wyniku diagnozowania po wykonanej naprawie diagnosta podejmuje decyzję o skierowaniu pojazdu na stanowisko stacji paliw w celu jego zaopatrzenia lub skierowaniu pojazdu na stanowisko naprawcze do stacji obsługi w celu wykonania ponownej naprawy.

19 – wymiana pojazdu

Stan wymiany pojazdu jest to stan, w którym ze względu na liczbę i rozmiar powstałych uszkodzeń na skutek kolizji lub wypadku nie ma możliwości naprawy obiektu technicznego i należy go wycofać z eksploatacji i wymienić na nowy, zdolny pojazd.

20 – naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu wykrytym podczas OC lub OT

Stan naprawy na stanowiskach w stacji obsługi po wykrytym uszkodzeniu podczas OC lub OT dotyczy obiektów technicznych, u których w trakcie wykonywanych obsług wykryto uszkodzenia. W stanie naprawy w stacji obsługi realizowane są czynności mające na celu przywrócenie zdolności zadaniowej obiektu technicznego.

21 – diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie wynikającej z uszkodzenia wykrytego podczas OC lub OT

Stan diagnozowania po naprawie wynikającej z uszkodzenia wykrytego podczas OC lub OT jest to stan, w którym obiekt techniczny podlega procesowi diagnozowania na stanowisku diagnostycznym w stacji obsługi. W wyniku diagnozowania po wykonanej naprawie diagnosta podejmuje decyzję o skierowaniu pojazdu na plac postojowy w celu oczekiwania na realizację zadania przewozowego lub skierowaniu pojazdu na stanowisko naprawcze do stacji obsługi w celu wykonania ponownej naprawy.

3.5. METODA BADAWCZA

Na podstawie identyfikacji systemu i procesu eksploatacji środków transportu oraz ze względu na specyfikę tematu pracy jako metodę badawczą wybrano badania eksploatacyjne. Badania tego typu rozumiane są jako zespół działań polegających na obserwacji obiektu w naturalnych warunkach eksploatacji, pozyskiwaniu i archiwizacji danych oraz ich przetwarzaniu. Badania eksploatacyjne stanowią jedno z najlepszych źródeł informacji statystycznych o zmianach stanu maszyn i uszkodzeniach ich elementów, a ich wyniki stanowią podstawę podjęcia racjonalnych decyzji do sterowania procesem eksploatacji [62].

W ramach realizowanej rozprawy badania eksploatacyjne przeprowadzono metodą eksperymentu biernego w naturalnych warunkach eksploatacji autobusów miejskich w rozpatrywanym systemie autobusowego transportu miejskiego. Pozyskane dane eksploatacyjne dotyczą przedziału czasu 12 miesięcy, od 01.10.2015 roku do 30.09.2016 roku.

Dane eksploatacyjne uzyskano z przeprowadzonych badań eksploatacyjnych, elektronicznych baz danych stosowanych w badanym systemie eksploatacji, dokumentacji ewidencyjno-rozliczeniowej oraz na podstawie informacji źródłowej zawartej w dokumentacji stosowanej w badanym systemie transportu miejskiego.

Wśród elektronicznych baz danych, z których pozyskano informacje źródłowe dotyczące pojazdów oraz realizowanych przez nie zadań przewozowych znajdują się:

- elektroniczna baza danych Działu Controllingu,
- elektroniczna baza danych pochodząca od dostawcy usług telematycznych.

Pierwsza z baz stanowi źródło informacji na temat okoliczności uszkodzeń autobusów, rodzajów tych uszkodzeń oraz czasie i okolicznościach ich naprawy. Baza tworzona jest w oparciu o informacje o zakłóceniach w realizacji zadania przewozowego zbieranych na podstawie przeprowadzanych badań diagnostycznych pojazdów i wykonywanych usług technicznych.

Elektroniczna baza danych pochodząca od dostawcy usług telematycznych zawiera dane dotyczące przydzielonych zadań przewozowych oraz ich realizacji. Ponadto za pomocą usług oferowanych od dostawcy, monitorowana jest punktualność przyjazdu autobusów na założonych przystankach komunikacyjnych przez połączenie pojazdów do internetu (connected vehicles). Dane pobierane są przy użyciu informatycznych systemów pomiarowych znajdujących się w pojazdach oraz na trasie przejazdu autobusów miejskich (na wybranych przystankach i pomiędzy wybranymi przystankami) i przekazywane przez system informatyczny do serwera bazy danych.

Informacje zawarte w dokumentacji ewidencyjno-rozliczeniowej są źródłem danych na temat uzyskanych przychodów wynikających z przewozu pasażerów środkami transportu publicznego, a także generowanych kosztów związanych z funkcjonowaniem systemu eksploatacji środków transportu, np. opłatami za grunty, amortyzacją środków transportu czy wynagrodzeniem pracowników. Ponadto w dokumentacji ewidencyjno-rozliczeniowej znajdują się informacje dotyczące kosztów przestoju pojazdów spowodowanych wystąpieniem zdarzeń niepożądanych oraz kosztów usunięcia skutków tych zdarzeń.

Wśród dokumentów źródłowych znajdują się Karty drogowe, Karty obsługi technicznej, Karty zjazdów awaryjnych, Karty przestojów, Zlecenia naprawy oraz Karty stanu gotowości, na podstawie których w badanym systemie generowano raporty miesięczne. Raporty zawierają informacje o autobusach realizujących przewozy w założonym okresie badawczym, w szczególności: liczbę środków transportu, przebiegi, zużycie paliwa. Powyższe dokumenty stanowią ponadto wiarygodne źródło ewidencji uszkodzeń autobusów miejskich.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksploatacyjnych oraz informacji z baz danych stosowanych w badanym systemie i dokumentacji źródłowej uzyskano dane niezbędne do wyznaczenia wartości analizowanych charakterystyk i estymacji wartości parametrów opracowanych modeli procesu eksploatacji środków transportu oraz oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń

niepożądanych w badanym systemie eksploatacji. W wyniku realizacji badań eksploatacyjnych zebrano i opracowano dane dotyczące:

- eksploataowanych w badanym systemie autobusów miejskich (numer ewidencyjny pojazdu, marka i typ pojazdu, rok produkcji, data przyjęcia do eksploatacji),
- realizacji zadania przewozowego (numer dobowego zadania, numer ewidencyjny pojazdu, data i godzina rozpoczęcia i zakończenia zadania, stan kilometrowy licznika, przychody generowane w wyniku realizacji zadań przewozowych),
- uszkodzeń autobusów miejskich eksploataowanych w badanym systemie (numer ewidencyjny pojazdu, data i godzina wystąpienia uszkodzenia, stan kilometrowy licznika, opis uszkodzeń, czasy i koszty przestoju pojazdu),
- kolizji i wypadków badanych autobusów miejskich (numer ewidencyjny pojazdu, data i godzina wystąpienia kolizji lub wypadku, stan kilometrowy licznika, opis uszkodzeń i skutków powstałych w wyniku wystąpienia kolizji lub wypadku, czasy i koszty przestoju pojazdu),
- interwencji jednostek pogotowia technicznego (numer zlecenia, numer ewidencyjny pojazdu, daty i godziny rozpoczęcia i zakończenia interwencji, stan kilometrowy licznika, rodzaj interwencji, opis podjętych działań, liczbę roboczogodzin, koszty realizowanych interwencji),
- napraw (numer zlecenia, numer ewidencyjny pojazdu, daty i godziny rozpoczęcia i zakończenia naprawy, rodzaj zjazdu, stan kilometrowy licznika, rodzaj naprawy, liczbę napraw, liczbę roboczogodzin, koszty realizowanych napraw),
- obsług codziennych i technicznych (numer zlecenia, numer ewidencyjny pojazdu, daty i godziny rozpoczęcia i zakończenia obsługi, stan kilometrowy licznika, liczbę obsług, liczbę roboczogodzin, koszty realizowanych obsług),
- diagnozowania stanu środków transportu (numer zlecenia, numer ewidencyjny pojazdu, daty i godziny rozpoczęcia i zakończenia diagnozowania, stan kilometrowy licznika, liczbę diagnozowań, liczbę roboczogodzin, koszty realizowanych diagnozowań).

3.6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

Przetworzenie uzyskanych danych źródłowych dotyczących badanego systemu eksploatacji środków transportu umożliwiło przeprowadzenie analizy statystycznej zbioru danych źródłowych i wyznaczenie wartości parametrów charakteryzujących realizowany proces eksploatacji autobusów miejskich, tzn.:

- liczb przejść między stanami procesu eksploatacji,
- wartości średnich czasów pozostawania w stanach procesu eksploatacji,
- prawdopodobieństw zmian stanów procesu,

- typów i parametrów rozkładów czasów pozostawania w stanach procesu eksploatacji (testowanie przeprowadzono dla rozkładów wykładniczego, gamma, normalnego, logarytmiczno-normalnego i Weibulla),
- wartości średnich jednostkowych dochodów (dodatnich lub ujemnych) generowanych w stanach procesu eksploatacji.

Dla danych pozyskanych z materiałów źródłowych i opracowanych danych eksploatacyjnych dotyczących 149 badanych autobusów miejskich w rocznym przedziale czasu przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań. Ze względu na cel badań wyznaczono 21 stanów eksploatacyjnych i poddano analizie zmienne losowe oznaczające czasy trwania wyróżnionych stanów. Wyróżnione stany zestawiono w tabeli 3.7.

Tab. 3.7. Stany eksploatacyjne modelu procesu eksploatacji

Nr stanu	Nazwa stanu
1	postój na placu zajezdni autobusowej
2	realizacja zadania przewozowego
3	zaopatrywanie w paliwo
4	obsługa codzienna OC
5	obsługa techniczna OT
6	przestój po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego
7	diagnozowanie przez pogotowie techniczne po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego
8	naprawa przez pogotowie techniczne bez utraty kursu
9	naprawa przez pogotowie techniczne z utratą kursu
10	oczekiwanie na realizację zadania przewozowego
11	zjazd awaryjny
12	naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego
13	diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie wynikającej z uszkodzenia w trakcie realizacji zadania przewozowego
14	oczekiwanie na przydzielenie zadania przewozowego
15	przestój spowodowany kolizją lub wypadkiem
16	akcja interwencyjno-ratownicza po kolizji lub wypadku
17	naprawa po kolizji lub wypadku
18	diagnozowanie po naprawie po kolizji lub wypadku
19	wymiana pojazdu po kolizji lub wypadku
20	naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu wykrytym podczas OC lub OT
21	diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie wynikającej z uszkodzenia wykrytego podczas OC lub OT

Dla zmiennych losowych oznaczających czasy trwania poszczególnych stanów rozpatrywanego modelu procesu eksploatacji wyznaczono wartości wybranych parametrów statystycznych (na podstawie danych z badań) i przedstawiono je w tabeli 3.8.

Tab. 3.8. Wartości wybranych parametrów statystycznych czasu trwania wyróżnionych stanów eksploatacyjnych

Nr stanu	Parametry statystyczne						
	$\bar{\theta}_i$ [h]	σ_i	n	$min. \theta_i$	$max. \theta_i$	v	R
1	5,4530	1,5396	5910	0,9540	10,3808	0,27	9,4269
2	3,9017	1,2849	6742	0,4280	7,4406	0,15	7,0127
3	0,4255	0,3594	1144	0,0167	1,9333	0,84	1,9167
4	0,2108	0,0530	788	0,1707	0,3978	0,25	0,2271
5	4,4039	1,2860	83	2,8045	7,4787	0,29	4,6742
6	0,0516	0,0757	1203	0,0167	0,7000	1,47	0,6833
7	0,1200	0,1241	1202	0,0333	1,0000	1,03	0,9667
8	0,1709	0,1554	1027	0,0313	0,9713	0,91	0,9399
9	0,5879	0,4611	73	0,0167	2,2500	0,78	2,2333
10	0,5876	0,4846	71	0,0167	2,1000	0,82	2,0833
11	0,8317	0,6917	97	0,0457	3,4301	0,83	3,3843
12	2,8682	1,7246	147	0,2656	9,8262	0,60	9,5607
13	0,5525	0,4569	31	0,1408	2,2289	0,83	2,0881
14	1,7308	0,8715	4073	0,1445	5,6828	0,50	5,5383
15	0,5213	0,2881	24	0,0662	1,2577	0,55	1,1915
16	2,4264	2,2297	24	0,1206	9,6453	0,92	9,5248
17	44,3819	25,6874	21	7,5320	98,0936	0,58	90,5616
18	0,8333	0,3012	424	0,1691	2,0296	0,36	1,8605
19	2880	---	1	---	---	---	---
20	3,6224	1,6073	1206	0,5587	13,4092	0,44	12,8505
21	0,5483	0,2048	357	0,2131	1,1704	0,37	0,9572

oznaczenia:

$\bar{\theta}_i$ – wartość średnia,

σ_i – odchylenie standardowe,

n – licznosc,

v – współczynnik zmienności,

R – rozstęp danych.

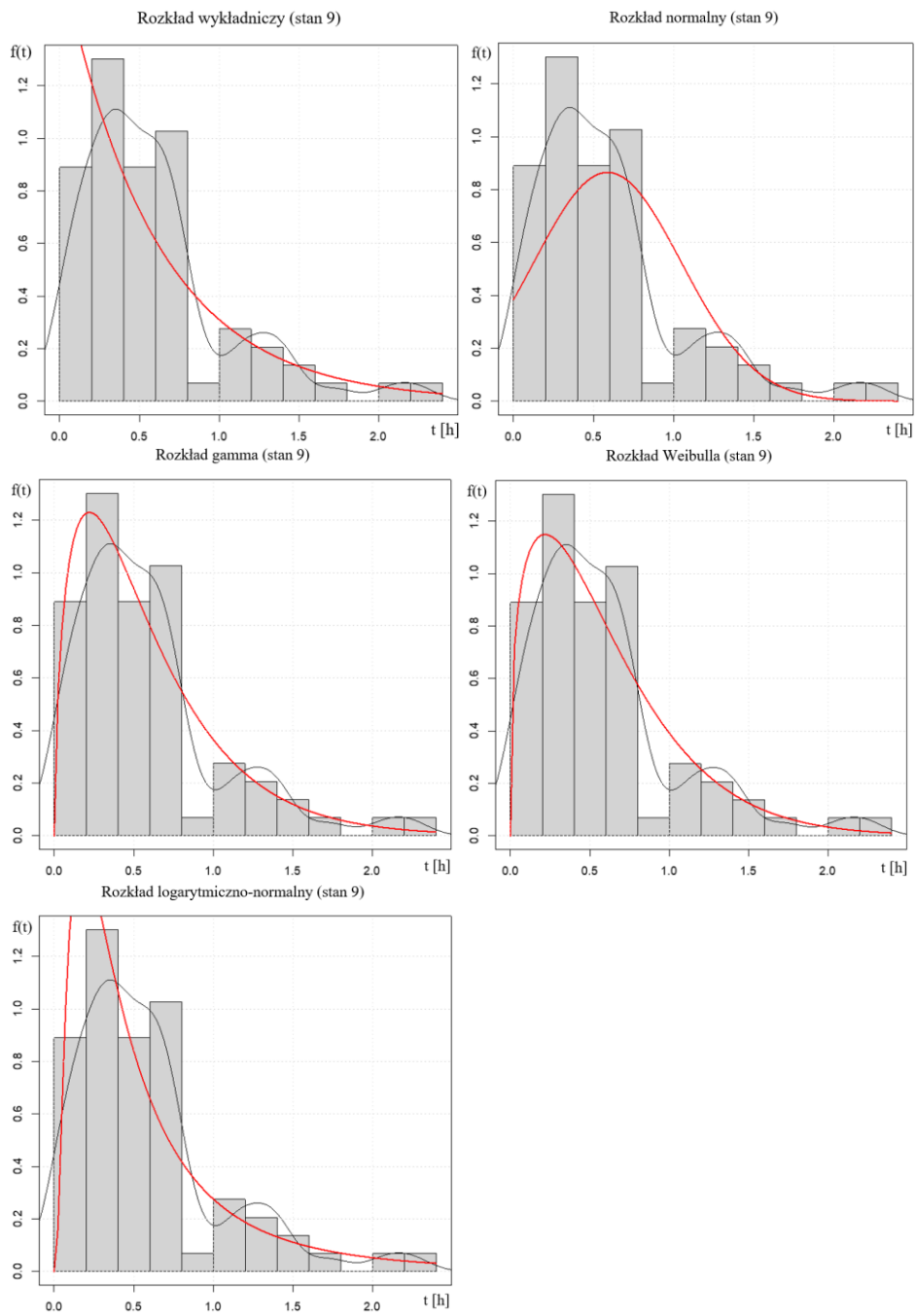
Następnie dane dotyczące czasów trwania poszczególnych stanów procesu eksploatacji zostały zweryfikowane z punktu widzenia typów i parametrów rozkładów tych czasów. Dla każdego z wyróżnionych stanów S_i , $i=1,2,\dots,21$,

zweryfikowano hipotezę zerową H_0 , że empiryczny rozkład zmiennej losowej T_i , $i=1,2,\dots,21$, oznaczającej czas trwania i -tego stanu procesu jest zgodny z następującymi rozkładami hipotetycznymi (teoretycznymi):

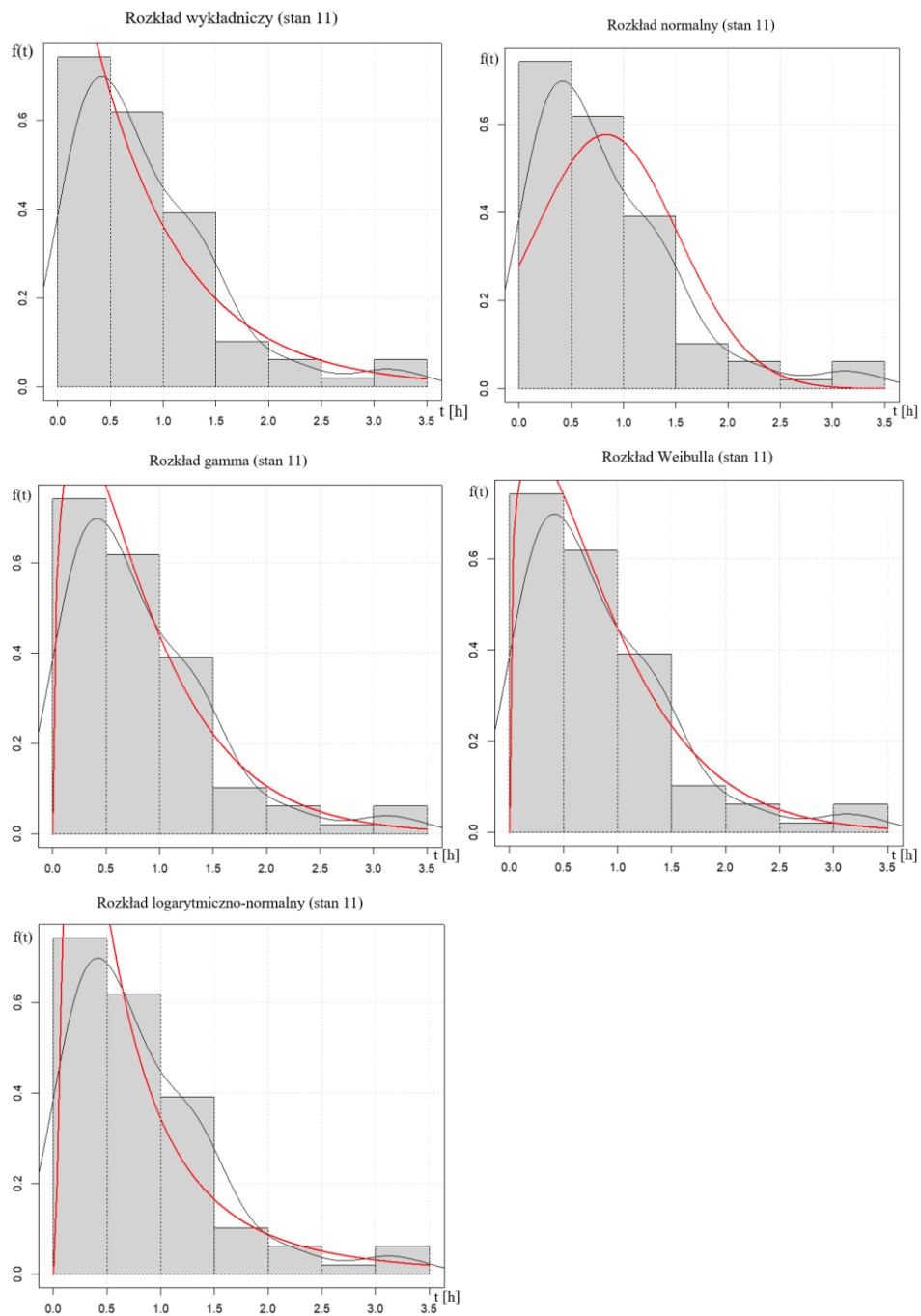
- wykładniczym,
- normalnym,
- gamma,
- Weibulla,
- logarytmiczno-normalnym.

Do weryfikacji hipotezy zerowej H_0 zastosowano test Kołmogorowa-Smirnowa.

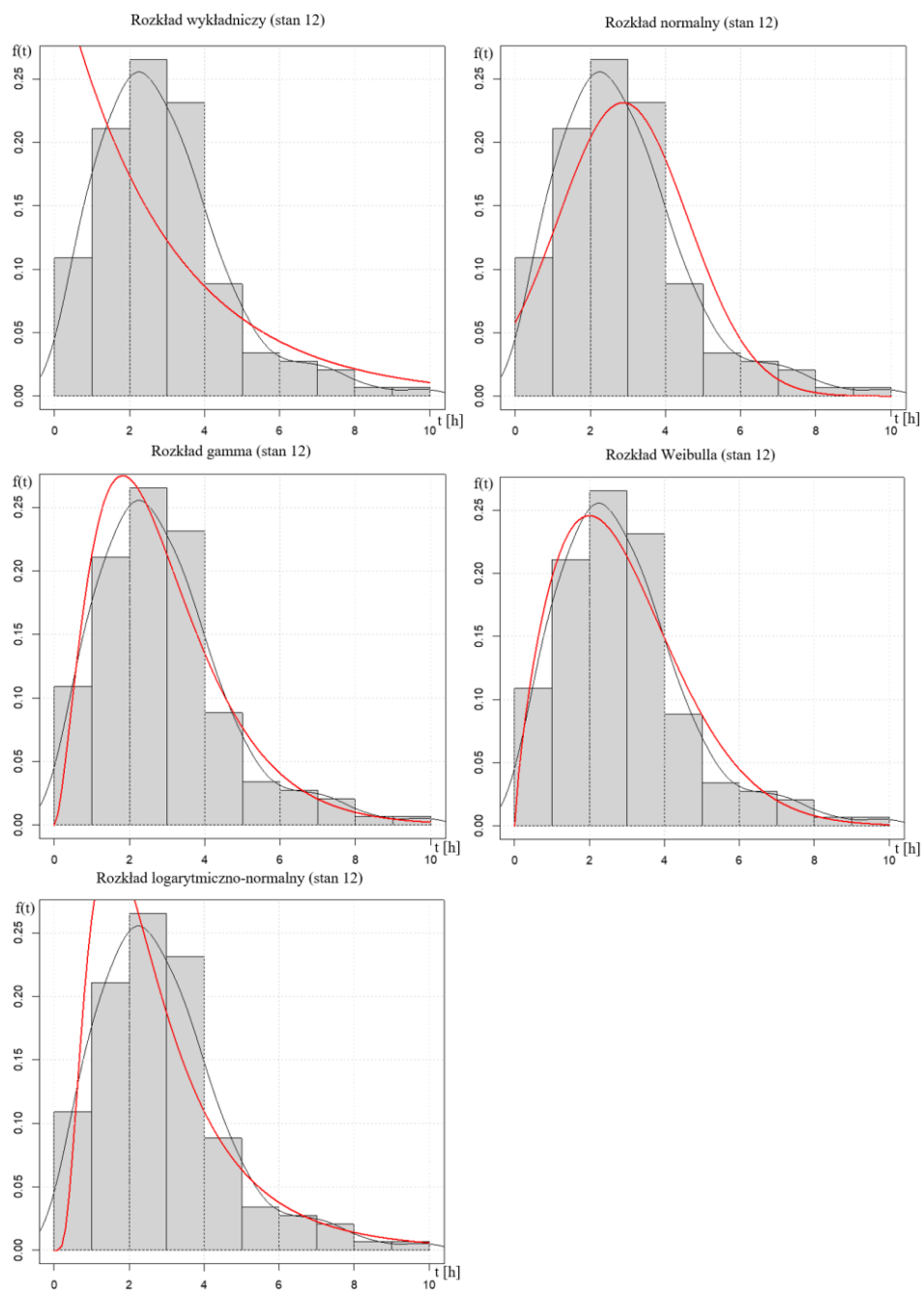
Weryfikację typów i parametrów rozkładu zmiennych losowych przeprowadzono w programie Statistica oraz w programie *R Development Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.* Wyniki analizy dopasowania rozkładów empirycznych do rozkładów teoretycznych wykonanej w programie *R Development Core Team (2022)* oraz wyniki weryfikacji parametrów tych rozkładów i postawionej hipotezy H_0 dla wybranych stanów eksploatacyjnych rozpatrywanego procesu eksploatacji środków transportu (autobusów miejskich) przedstawiono na rysunkach od 3.5 do 3.7 oraz w tabelach od 3.9 do 3.11. Badania przeprowadzono dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$. W tabelach od 3.9 do 3.11 $H_0 = 1$ oznacza brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności rozkładu empirycznego rozpatrywanej zmiennej losowej θ_i , $i=1,2,\dots,21$, z wybranymi rozkładami teoretycznymi, natomiast $H_0 = 0$ oznacza odrzucenie hipotezy zerowej (brak zgodności rozkładu empirycznego rozpatrywanej zmiennej losowej θ_i , $i=1,2,\dots,21$, z wybranymi rozkładami teoretycznymi).



Rys. 3.5. Histogram oraz wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu empirycznego (linia czarna) i rozkładów teoretycznych (linia czerwona) czasu naprawy przez pogotowie techniczne z utratą kursu θ_9



Rys. 3.6. Histogram oraz wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu empirycznego (linia czarna) i rozkładów teoretycznych (linia czerwona) czasu zjazdu awaryjnego θ_{11}



Rys. 3.7. Histogram oraz wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu empirycznego (linia czarna) i rozkładów teoretycznych (linia czerwona) czasu naprawy w stacji obsługi po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego θ_{12}

Tab. 3.9. Wyniki weryfikacji hipotezy H_0 przy zastosowaniu testu Kołmogorowa-Smirnowa dla czasu naprawy przez pogotowie techniczne z utratą kursu θ_9

Parametr	Rozkład				
	wykładniczy	normalny	gamma	Weibulla	log.-norm.
λ	1,701	-	-	-	-
$\bar{\theta}$	-	0,588	-	-	-
σ	-	0,461	-	-	-
k	-	-	1,6	1,318	0,933
s	-	-	2,721	0,639	-0,875
α	0,05				
p-value	0,061	0,028	0,564	0,426	0,41
D	0,155	0,171	0,092	0,130	0,104
H_0	1	0	1	1	1

Tab. 3.10. Wyniki weryfikacji hipotezy H_0 przy zastosowaniu testu Kołmogorowa-Smirnowa dla czasu zjazdu awaryjnego θ_{11}

Parametr	Rozkład				
	wykładniczy	normalny	gamma	Weibulla	log.-norm.
λ	1,202	-	-	-	-
$\bar{\theta}$	-	0,832	-	-	-
σ	-	0,692	-	-	-
k	-	-	1,425	1,231	0,978
s	-	-	1,714	0,891	-0,574
α	0,05				
p-value	0,34	0,076	0,97	0,993	0,515
D	0,095	0,13	0,05	0,044	0,083
H_0	1	1	1	1	1

Tab. 3.11. Wyniki weryfikacji hipotezy H_0 przy zastosowaniu testu Kołmogorowa-Smirnowa dla czasu naprawy w stacji obsługi po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego θ_{12}

Parametr	Rozkład				
	wykładniczy	normalny	gamma	Weibulla	log.-norm.
λ	0,349	-	-	-	-
$\bar{\theta}$	-	2,868	-	-	-
σ	-	1,725	-	-	-
k	-	-	2,723	1,753	0,667
s	-	-	0,95	3,23	0,859
α	0,05				
p-value	0	0,105	0,477	0,775	0,054
D	0,221	0,1	0,069	0,055	0,111
H_0	0	1	1	1	1

oznaczenia:

λ – parametr rozkładu wykładniczego,

$\bar{\theta}$ – wartość średnia,
 σ – odchylenie standardowe,
 k – parametr kształtu,
 s – parametr skali,
 α – poziom istotności,
 p -value – p-wartość,
 D – statystyka testu K-S,
 H_0 – hipoteza zerowa.

Na podstawie wyników przeprowadzonych testów zgodności rozkładu empirycznego z wybranymi rozkładami teoretycznymi, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ dla powyższych stanów eksploatacyjnych zaobserwowano:

- 1) brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności rozkładu empirycznego rozpatrywanej zmiennej losowej θ_9 z rozkładami teoretycznymi:
 - wykładniczym (p -value = 0,061),
 - gamma (p -value = 0,564),
 - Weibulla (p -value = 0,426),
 - logarytmiczno-normalnym (p -value = 0,41).Dla zmiennej losowej θ_9 zaobserwowano brak zgodności rozkładu empirycznego z rozkładem normalnym (wartość p -value = 0,028 jest mniejsza niż przyjęty poziom istotności $\alpha = 0,05$).
- 2) brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności rozkładu empirycznego rozpatrywanej zmiennej losowej θ_{11} z rozkładami teoretycznymi:
 - wykładniczym (p -value = 0,34),
 - normalnym (p -value = 0,076),
 - gamma (p -value = 0,97),
 - Weibulla (p -value = 0,993),
 - logarytmiczno-normalnym (p -value = 0,515).
- 3) brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności rozkładu empirycznego rozpatrywanej zmiennej losowej θ_{12} z rozkładami teoretycznymi:
 - normalnym (p -value = 0,105),
 - gamma (p -value = 0,477),
 - Weibulla (p -value = 0,775),
 - logarytmiczno-normalnym (p -value = 0,054).

Dla zmiennej losowej θ_{12} zaobserwowano brak zgodności rozkładu empirycznego z rozkładem wykładniczym (wartość p -value = 0 jest mniejsza niż przyjęty poziom istotności $\alpha = 0,05$).

Na podstawie wyników analizy statystycznej danych eksploatacyjnych oraz przeprowadzonych testów zgodności sformułowano następujące wnioski:

- 1) odrzucenie hipotezy H_0 o zgodności rozkładu empirycznego zmiennej losowej θ_i , $i=1,2,\dots,21$, z rozkładem wykładniczym istotnie ogranicza możliwość zastosowania jednorodnego procesu Markowa jako matematycznego modelu procesu eksploatacji realizowanego w obiekcie badań,
- 2) matematyczny model procesu eksploatacji powinien umożliwić zastosowanie zmiennych losowych θ_i , $i=1,2,\dots,21$, (czasów trwania stanów modelu procesu) opisanych za pomocą różnych typów rozkładów teoretycznych, w tym rozkładu: normalnego, gamma, Weibulla i logarytmicznie-normalnego.

Na podstawie powyższych wniosków do budowy matematycznego modelu badanego procesu eksploatacji środków transportu miejskiego zastosowano jednorodny proces semi-Markowa.

Wykonane badania eksploatacyjne i pozyskane dane umożliwiły opracowanie danych wejściowych dla 21-stanowego modelu procesu eksploatacji środków transportu, co posłuży do wyznaczenia wartości analizowanych charakterystyk i estymacji wartości parametrów badanego procesu eksploatacji niezbędnych do opracowania wyników badań metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz decyzyjnego modelu sterowania procesem eksploatacji.

4. METODA OCENY RYZYKA W WYBRANYM SYSTEMIE EKSPLOATACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU

Analiza literatury oraz przeprowadzone badania eksploatacyjne w analizowanym systemie eksploatacji środków transportu umożliwiły opracowanie metody analizy i oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych, przy zastosowaniu modeli matematycznych, przeznaczonej dla systemów eksploatacji środków transportu ze szczególnym uwzględnieniem autobusowego transportu zbiorowego w aglomeracjach miejskich.

Opracowana metoda oceny ryzyka powinna spełniać następujące kryteria:

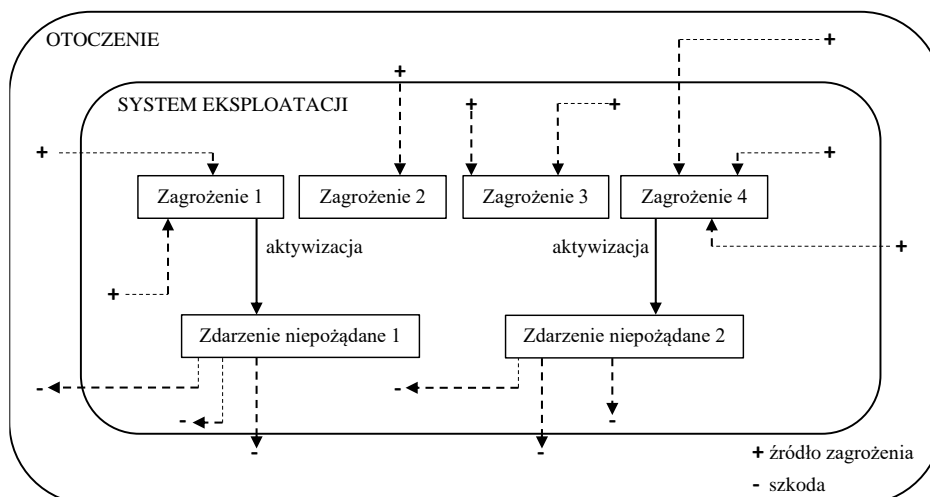
- odzwierciedlenie badanego systemu i procesu eksploatacji obiektów technicznych,
- kompleksowe podejście do analizowanego problemu: analiza i ocena ryzyka z uwzględnieniem aspektów eksploatacyjno-technicznych badanych obiektów,
- uwzględnienie ograniczeń czasowych, organizacyjnych i technicznych,
- zapewnienie oczekiwanego poziomu dokładności,
- powtarzalność i weryfikowalność metody,
- możliwość interpretacji wyników w sposób czytelny i zrozumiały,
- możliwość zastosowania metody dla różnych modeli procesów eksploatacji opracowanych z zastosowaniem teorii procesów semi-Markowa,
- możliwość wdrożenia metody w rzeczywistych systemach eksploatacji obiektów technicznych, w szczególności w systemach eksploatacji środków transportu miejskiego (autobusów miejskich).

Analiza zagadnień dotyczących zarządzania ryzykiem, przedstawiona w rozdziale 2, ze szczególnym uwzględnieniem oceny ryzyka w szeroko pojętych systemach technicznych umożliwiła wyodrębnienie wspólnych obszarów tj. ocena ryzyka (analiza ryzyka i jego ewaluacja) oraz sterowanie ryzykiem (reagowanie na ryzyko). Cechą wspólną omawianych metod oceny ryzyka jest istnienie oraz kolejność realizowanych etapów stanowiących elementy tej oceny i koncentrujących się wokół pojęć: źródło zagrożenia, zagrożenie, zdarzenie niepożądane, szkoda. Na potrzeby opracowanej metody oceny ryzyka w ramach rozprawy doktorskiej ujednolicono pojęcia omówione w literaturze, które używane są w dalszej części pracy. Pojęcia te brzmią następująco:

- źródło zagrożenia – obiekt, zdarzenie lub stan systemu, którego obecność w obszarze analizy może być powodem powstania zagrożenia i w znaczący sposób obniżyć bezpieczeństwo;
- zagrożenie – potencjalna zdolność do wyrządzenia szkody będąca przyczyną powstania zdarzenia niepożądanego;
- zdarzenie niepożądane – zdarzenie losowe, trudno przewidywalne, powstałe w wyniku aktywizacji zagrożenia powodujące wystąpienie szkody; w pracy za zdarzenia niepożądane przyjmuje się zdarzenia powodujące zakłócenie realizacji zadania przewozowego;

- uszkodzenie obiektu technicznego zaistniałe w trakcie realizacji zadania (zadań) przewozowego oraz możliwość poniesienia strat w wyniku naprawy,
 - kolizję lub wypadek obiektu technicznego zaistniałe w trakcie realizacji zadania (zadań) przewozowego oraz możliwość poniesienia strat w wyniku interwencji pogotowia technicznego oraz naprawy obiektu lub w wyniku konieczności wymiany obiektu na nowy;
- szkoda – strata rozpatrywana wyłącznie w aspekcie technicznym, związana z uszkodzeniem obiektu technicznego i koniecznością usunięcia skutków tego uszkodzenia wyrażona w postaci kosztowej w [PLN].

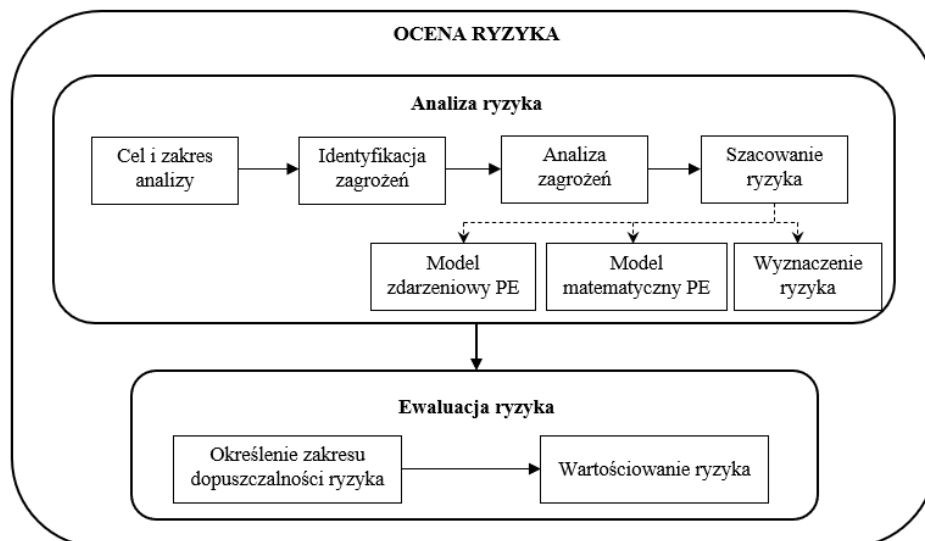
Uwzględniając związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy powyższymi pojęciami opracowano schemat powstawania zdarzeń niepożądanych w odniesieniu do badanego systemu eksploatacji i przedstawiono go na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Schemat powstawania zdarzeń niepożądanych [opracowanie własne]

Źródła zagrożeń, które w znaczący sposób mogą wpłynąć na działania systemu prowadzą do formułowania zagrożeń, przy czym kilka źródeł może być powodem powstania jednego rodzaju zagrożenia. Zagrożenie może istnieć, ale niekoniecznie musi przerodzić się w zdarzenie niepożądane. W wyniku zdarzenia inicjującego, czyli pewnej niekorzystnej sytuacji, może dojść do aktywizacji zagrożenia, co prowadzi do powstania zdarzenia niepożądanego.

W ramach zaproponowanej w pracy metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych opracowano procedurę postępowania prowadzącą do wyznaczenia wartości ryzyka dla każdego zdefiniowanego zagrożenia i przypisania jej do odpowiedniej kategorii, czyli jego ewaluacji. Podstawowe elementy procedury postępowania w ocenie ryzyka w badanym systemie eksploatacji środków transportu przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Procedura postępowania w ocenie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w badanym systemie [opracowanie własne]

4.1. ANALIZA RYZYKA

Analiza ryzyka dla rozpatrywanego systemu eksploatacji środków transportu w badanej aglomeracji miejskiej obejmuje następujące etapy:

- określenie celu i zakresu analizy,
- identyfikację zagrożeń,
- analizę zagrożeń,
- szacowanie ryzyka, w tym: opracowanie modelu matematycznego analizowanego procesu eksploatacji środków transportu, wyznaczenie ryzyka.

4.1.1. Cel i zakres analizy ryzyka

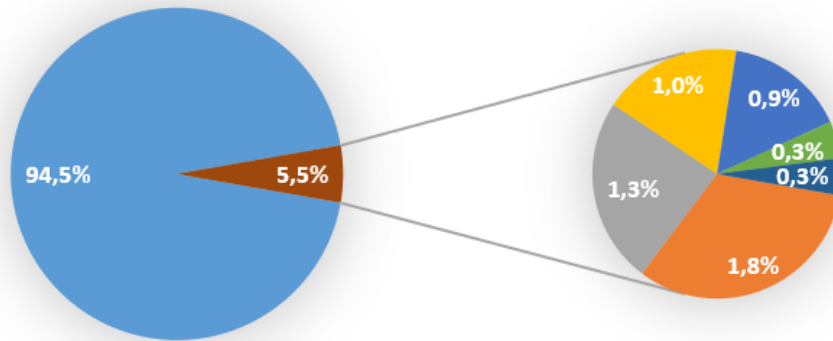
Celem prowadzonej analizy ryzyka jest wyodrębnienie zagrożeń i ich źródeł w obszarze badanego systemu eksploatacji środków transportu oraz w jego otoczeniu, które mogą mieć wpływ na powstanie zdarzeń niepożądanych w systemie. Rezultatem wykonanej analizy będzie wyznaczenie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych dla każdego rozpatrywanego zagrożenia. Przeprowadzona analiza i wyznaczone ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych zostaną zastosowane do przeprowadzenia ewaluacji ryzyka.

4.1.2. Identyfikacja i analiza zagrożeń

Przyczyn występowania zdarzeń niepożądanych w systemach transportowych należy upatrywać wśród trzech zbiorów elementów składowych ruchu drogowego tj. [77]:

- pojazdów, np. samochodów osobowych, pojazdów ciężarowych, autobusów, tramwajów, pojazdów jednośladowych, innych m.in. wózków inwalidzkich;
- użytkowników drogi (uczestników ruchu), np. kierujących pojazdami, pasażerów pojazdów, rowerzystów (w tym motorowerzystów), pieszych;
- środowiska drogi, np. drogi wraz z jej wyposażeniem i urządzeniami, otoczeniem drogi (przyległy do drogi pas terenu), warunków ruchu (natężenia ruchu, struktury uczestników ruchu, struktury kierunkowej ruchu itd.), warunków atmosferycznych.

Analiza procesów zachodzących w badanym systemie eksploatacji, przeprowadzone badania eksploatacyjne, pozyskana dokumentacja źródłowa (karty drogowe, karty obsługi technicznej, karty zjazdów awaryjnych, karty przestojów, zlecenia naprawy, karty stanu gotowości) oraz dane zaczerpnięte z bazy danych dotyczące zdarzeń z udziałem autobusów miejskich powodujących zakłócenia w realizacji procesu przewozowego umożliwiły zidentyfikowanie obszarów stanowiących przyczyny powstawania tych zdarzeń. Wśród nich znalazły się zdarzenia spowodowane przez kierujących pojazdami obcymi, zdarzenia spowodowane przez kierowców autobusów badanego systemu, stany ograniczonej zdolności pojazdów powodujące uszkodzenia wykryte w trakcie realizacji zadania przewozowego, zakłócenia realizacji przewozu spowodowane niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi, interwencje policji lub pogotowia ratunkowego związane z zachowaniem pasażerów oraz inne jednostkowe zdarzenia np. kontrola policji. Poszczególne przyczyny powstawania zdarzeń niepożądanych w analizowanym systemie w podziale procentowym przedstawiono na rysunku 4.3.



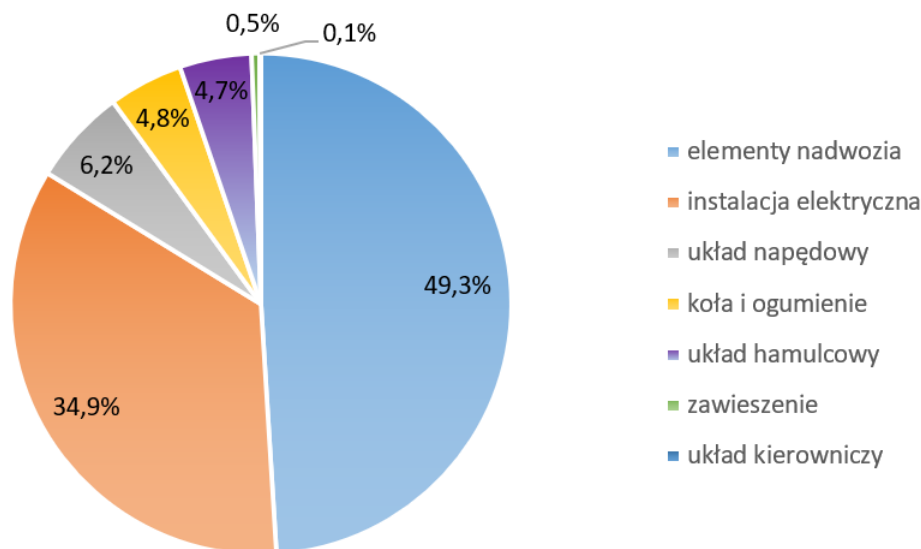
- uszkodzenie pojazdu na trasie
- interwencje policji lub pogotowia ratunkowego związane z zachowaniem pasażerów
- niekorzystne warunki atmosferyczne (śnieg, błoto, deszcz, ujemna temperatura)
- błędy kierowców pojazdów obcych
- błędy kierowców autobusów w systemie
- inne np. kontrola policji, ITD.
- zmienne warunki ruchu drogowego np. brak przejazdu

Rys. 4.3. Przyczyny powstawania zdarzeń niepożądanych powodujących zakłócenie realizacji zadania przewozowego w badanym systemie [opracowanie własne]

Najczęstszą przyczyną powstawania zdarzeń niepożądanych w badanym systemie eksploatacji środków transportu jest jego uszkodzenie wykryte w trakcie realizacji zadania przewozowego, co często powoduje przerwanie realizacji tego zadania. Uszkodzenie pojazdu jest to taki stan pojazdu, w którym występuje przekroczenie dopuszczalnej wartości przez dowolną cechę elementu pojazdu. Stan ten jest konsekwencją uszkodzeń powstających w podsystemach autobusu miejskiego i może wynikać z:

- błędów naprawy,
- błędów użytkowania,
- nieprawidłowej oceny stanu pojazdu,
- oddziaływania otoczenia,
- zużycia współpracujących elementów,
- starzenia się elementów.

Dla badanego systemu eksploatacji autobusów miejskich przeprowadzono analizę najczęściej występujących uszkodzeń w poszczególnych podsystemach autobusu. Wyniki tej analizy przedstawiono na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Procentowy udział uszkodzeń poszczególnych układów i podsystemów badanych autobusów miejskich [opracowanie własne]

W zdecydowanej większości przyczyną zakłócenia realizacji zadania przewozowego są uszkodzenia elementów nadwozia, z uwzględnieniem wyposażenia autobusów miejskich, w szczególności:

- drzwi – brak możliwości zamknięcia lub ich otwarcia,
- lusterek,
- siedzisk pasażerów,
- poręczy,
- kasowników,
- wyświetlacza (ekranu informacyjnego),
- nawiewów,
- wycieraczek szyb przednich.

Zakłócenia w realizacji zadań przewozowych w dużej mierze powodowane są również przez uszkodzenia układu elektrycznego pojazdu. Średnio co trzecie zarejestrowane uszkodzenie wynika z nieprawidłowego działania instalacji elektrycznej w autobusie miejskim. Pozostała grupa uszkodzeń, w tym związana z układami napędowym, kierowniczym, hamulcowym, zawieszeniem, ogumieniem stanowi około 16% wszystkich przyczyn powstawania nieplanowanych przerw w realizacji zadań przewozowych.

Na podstawie powyższej analizy zidentyfikowano zagrożenia i ich źródła pochodzące z systemu eksploatacji lub z jego otoczenia. Do identyfikacji zagrożeń zastosowano metodę BHIP – identyfikacji zagrożeń wstecz (backward

hazard identification proces), polegającą na poszukiwaniu i rozpoznawaniu źródeł zagrożeń dla znanych zdarzeń niepożądanych [21].

Źródła zagrożeń zidentyfikowane w badanym procesie eksploatacji koncentrują się wokół zdarzeń niepożądanych: uszkodzenia obiektu technicznego i możliwości poniesienia strat w wyniku naprawy oraz kolizji lub wypadku obiektu technicznego i możliwości poniesienia strat w wyniku interwencji pogotowia technicznego oraz naprawy obiektu lub w wyniku konieczności wymiany obiektu na nowy. W ramach procedury identyfikacji zagrożeń na podstawie wymienionych zdarzeń rozpoznano i sformułowano źródła zagrożeń oraz połączono je w grupy przyporządkowane określonym zdarzeniom niepożądanym, a następnie zdefiniowano zagrożenie.

Listy zdarzeń niepożądanych, źródeł zagrożeń oraz zagrożeń przedstawiono w tabeli 4.1. W badanym systemie eksploatacji wyodrębniono:

- zdarzenia niepożądane $z = A, B, C, D, E$;
- zagrożenia $Z_z, z = A, B, C, D, E$;
- źródła zagrożeń $Q_z, z = A, B, C, D, E$.

Tab. 4.1. Listy zdarzeń niepożądanych, zagrożeń i ich źródeł w badanym systemie eksploatacji środków transportu [opracowanie własne]

LISTY ZDARZEŃ NIEPOŻĄDANYCH		
Zdarzenia niepożądane	Zagrożenia	Źródła zagrożeń (grupy)
A. Uszkodzenie autobusu miejskiego w trakcie realizacji zadania oraz możliwość poniesienia strat w wyniku jego naprawy bez utraty kursu	Z_A - Zagrożenie stratą powstałą w wyniku uszkodzenia autobusu miejskiego na trasie i jego naprawy przez jednostkę pogotowia technicznego bez utraty kursu	Q_{A1} – niedokładność i pośpiech wykonania obsługi codziennej, Q_{A2} – błędy regulacji elementów pojazdu, Q_{A3} – niekorzystne warunki atmosferyczne, m.in. błoto pośniegowe na drodze
B. Uszkodzenie autobusu miejskiego w trakcie realizacji zadania oraz możliwość poniesienia strat w wyniku jego naprawy z utratą kursu	Z_B - Zagrożenie stratą powstałą w wyniku uszkodzenia autobusu miejskiego na trasie i jego naprawy przez jednostkę pogotowia technicznego z utratą kursu	Q_{B1} – zanieczyszczenia elementów po naprawie, Q_{B2} – błędy montażu elementów podczas naprawy, Q_{B3} – błędy kontroli instalacji elektrycznej

cd. tab. 4.1. Listy zdarzeń niepożądanych, zagrożeń i ich źródeł w badanym systemie eksploatacji środków transportu [opracowanie własne]

<p>C. Uszkodzenie autobusu miejskiego w trakcie realizacji zadania oraz możliwość poniesienia strat w wyniku jego naprawy w stacji obsługi po zjeździe awaryjnym lub holowaniu</p>	<p>Z_C - Zagrożenie stratą powstałą w wyniku uszkodzenia autobusu miejskiego na trasie i jego naprawy w stacji obsługi po zjeździe awaryjnym lub holowaniu</p>	<p>Q_{C1} – zastosowanie podczas naprawy: niewłaściwej części zamiennej, części z ukrytą wadą technologiczną, Q_{C2} – błędy technologii naprawy, Q_{C3} – brak doświadczenia kierowcy w rozpoznawaniu symptomów uszkodzeń</p>
<p>D. Kolidacja lub wypadek autobusu miejskiego oraz możliwość poniesienia strat w wyniku przeprowadzenia akcji interwencyjno-ratowniczej oraz naprawy obiektu w stacji obsługi</p>	<p>Z_D - Zagrożenie stratą powstałą w wyniku kolidacji lub wypadku autobusu miejskiego, przeprowadzenia akcji interwencyjno-ratowniczej i naprawy autobusu w stacji obsługi po interwencji pogotowia technicznego</p>	<p>Q_{D1} – zmęczenie i ograniczona koncentracja kierowcy autobusu, Q_{D2} – błędny odczyt znaków drogowych i sygnalizacji świetlnej przez kierowcę pojazdu obcego, Q_{D3} – niezachowanie bezpiecznej odległości między pojazdami</p>
<p>E. Kolidacja lub wypadek autobusu miejskiego oraz możliwość poniesienia strat w wyniku przeprowadzenia akcji interwencyjno-ratowniczej oraz konieczności wymiany autobusu na nowy obiekt</p>	<p>Z_E - Zagrożenie stratą powstałą w wyniku kolidacji lub wypadku autobusu miejskiego, przeprowadzenia akcji interwencyjno-ratowniczej i likwidacji autobusu wraz z wymianą na nowy obiekt</p>	<p>Q_{E1} – błędna ocena sytuacji drogowej przez kierowcę pojazdu obcego, Q_{E2} – nieprawidłowe zachowanie pieszego, Q_{E3} – słaba widoczność w okresie zimowym na niewystarczająco oświetlonych odcinkach drogi</p>

4.1.3. Semimarkowski model szacowania ryzyka

Jakość modeli stosowanych do opisu procesu eksploatacji obiektów technicznych jest cechą zbiorczą decydującą o racjonalności sterowania tym procesem [106]. W praktyce jako modele rzeczywistych procesów eksploatacji obiektów technicznych, często stosowane są modele zdarzeniowe, matematyczne oraz symulacyjne. W modelach tych zakłada się, że obiekty techniczne mogą przebywać w skończonym zbiorze stanów modelowanego procesu eksploatacji

[24, 56, 76, 106]. Liczba analizowanych stanów oraz ich rodzaj zależy od przyjętego celu badań i ustalonej w badaniach szczegółowości. W wielu przypadkach, na podstawie analizy rzeczywistego procesu eksploatacji obiektów technicznych, można stwierdzić, że badany proces jest wielostanowym procesem stochastycznym. Wówczas zastosowany model procesu eksploatacji opisuje zmiany stanów eksploatacyjnych, zachodzące w rozpatrywanym przedziale czasu w sposób losowy, zgodnie z określonymi rozkładami prawdopodobieństwa.

Teoria procesów losowych zawiera pojęcia i twierdzenia, na podstawie których możliwe jest opracowanie modeli stochastycznych dotyczących zdarzeń niepożądanych takich jak wypadki, kolizje oraz uszkodzenia środków transportu [25]. Losowy charakter czynników wpływających na przebieg i efektywność procesu eksploatacji realizowanego w rzeczywistym systemie, determinuje wybór typu matematycznego modelu i uzasadnia celowość rozpatrywania stochastycznych modeli procesu eksploatacji. Podstawę do wyboru i budowy matematycznego modelu procesu eksploatacji stanowią wyniki analizy wyznaczonych wartości parametrów oraz typów rozkładów czasów przebywania w stanach procesu eksploatacji.

Według wielu autorów spośród procesów losowych szerokie zastosowanie w modelowaniu procesu eksploatacji obiektów technicznych znalazły procesy Markowa oraz semi-Markowa [5, 9, 22, 25, 41, 43, 45, 56, 81, 117]. Procesy Markowa stosowane są w przypadkach, jeśli z wystarczającą dokładnością w odniesieniu do rozpatrywanego problemu, można przyjąć założenie, że czasy pozostawania w stanach procesu mają rozkład wykładniczy. Procesy semi-Markowa stosowane są wówczas, gdy takie założenie, ze względu na ograniczenia, nie może być przyjęte. Realizacja badań modelowych przy zastosowaniu opisywanych modeli procesu eksploatacji umożliwia z jednej strony analizę szczegółowych problemów związanych z eksploatacją obiektów technicznych, a z drugiej strony umożliwia analizę relacji zachodzących między rozpatrywanym zbiorem parametrów modelu [5, 22, 43, 78].

W tej części rozprawy przedstawiono założenia do budowy modeli procesu eksploatacji obiektów technicznych realizowanego w rozpatrywanym systemie eksploatacji. Modele zbudowano na podstawie analizy przestrzeni stanów oraz zdarzeń eksploatacyjnych dotyczących autobusów komunikacji miejskiej eksploatowanych w rzeczywistym systemie transportowym.

W pracy przyjęto, że modelem procesu eksploatacji jest proces losowy $X(t)$ o skończonym zbiorze stanów S . Obiekt techniczny w danej chwili t może znajdować się w jednym z wyróżnionych stanów eksploatacyjnych zbioru stanów modelu procesu eksploatacji $S = \{1, 2, 3, \dots, m\}$. Jeżeli $X(t) = i$, oznacza to, że rozpatrywany proces w chwili t znajduje się w i -tym stanie modelu ($i \in S$). Realizacja procesu to sekwencja następujących po sobie wyróżnionych stanów oraz czasów trwania tych stanów. Kolejność następstw stanów, czasy trwania poszczególnych stanów i częstości ich występowania zależą przede wszystkim

od cech obiektów technicznych oraz cech procesów, jakim te obiekty podlegają [56, 106].

W wyniku identyfikacji systemu eksploatacji autobusów miejskich i realizowanego w nim procesu eksploatacji opracowano 21-stanowy model procesu eksploatacji środków transportu. Graf stanów modelu przedstawiono w podrozdziale 3.4. Następnie na podstawie opracowanego grafu stanów modelu procesu eksploatacji zbudowano model matematyczny, przy założeniu, że modelem procesu eksploatacji środków transportu jest jednorodny proces semi-Markowa $X(t)$.

4.1.3.1. Model matematyczny procesu eksploatacji

W pracy przyjęto, że modelem matematycznym procesu eksploatacji środków transportu jest proces losowy $X(t)$. Do opisu badanego procesu wybrano aparat matematyczny na podstawie następujących przesłanek:

- celu realizowanej rozprawy,
- dokładności odwzorowania rzeczywistego procesu eksploatacji,
- stopnia złożoności stosowanego aparatu matematycznego,
- możliwości pozyskania danych dotyczących procesu eksploatacji realizowanego w obiekcie badań.

W wyniku przeprowadzonej analizy założeń i ograniczeń przyjęto, że proces semi-Markowa oraz teoria dotycząca modelowania tego procesu stanowią najlepsze narzędzia do matematycznego modelowania rzeczywistego procesu eksploatacji realizowanego w obiekcie badań z punktu widzenia celu pracy.

Na podstawie opracowanego grafu stanów modelu procesu eksploatacji środków transportu użytkowanych w obiekcie badań, zbudowano model matematyczny tego procesu zakładając, że modelem rozpatrywanego procesu eksploatacji jest jednorodny proces semi-Markowa $X(t)$.

Stosując do matematycznego modelowania procesu eksploatacji środków transportu procesy semi-Markowa, przyjęto następujące założenia:

- modelowany proces eksploatacji posiada skończoną liczbę stanów $i = 1, 2, \dots, 21$;
- jeśli obiekt techniczny w chwili t znajduje się w stanie i , to $X(t) = i$, gdzie $i = 1, 2, \dots, 21$;
- proces losowy $X(t)$ będący matematycznym modelem procesu eksploatacji jest procesem jednorodnym,
- w chwili początkowej $t = 0$ proces znajduje się w stanie 1, tzn. $P\{X(0)=1\}=1$.

Proces stochastyczny $X(t)$ będący procesem semi-Markowa o skończonym zbiorze stanów S można w pełni określić za pomocą [56]:

- rozkładu początkowego $p_i(0)$ procesu $X(t)$;
- macierzy P prawdopodobieństw zmian stanów włożonego w proces $X(t)$ łańcucha Markowa;
- macierzy $Q(t)$ jądra procesu semi-Markowa $X(t)$.

W kolejnych etapach budowy matematycznego modelu procesu eksploatacji środków transportu opracowano:

- 1) rozkład początkowy $p_i(0)$ procesu $X(t)$,
- 2) rozkład stacjonarny włożonego w proces $X(t)$ łańcucha Markowa,
- 3) rozkład graniczny procesu semi-Markowa $X(t)$.

1) Rozkład początkowy $p_i(0)$ procesu $X(t)$

Z przyjętych założeń rozkład początkowy $p_i(0)$, $i = 1, 2, \dots, 21$ ma postać:

$$p_i(0) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } i = 1 \\ 0 & \text{gdy } i \neq 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

gdzie:

$$p_i(0) = P\{X(0) = i\}, \quad i = 1, 2, \dots, 21 \quad (4.2)$$

2) Rozkład stacjonarny włożonego w proces $X(t)$ łańcucha Markowa

W wyniku identyfikacji procesu eksploatacji środków transportu wyznaczono możliwe przejścia między wyróżnionymi stanami eksploatacyjnymi. Przyjęto, że łańcuch utworzony z kodów kolejnych stanów eksploatacyjnych jest jednorodnym łańcuchem Markowa. Prawdopodobieństwa zmiany stanów eksploatacyjnych wyznaczono zakładając, że każdemu łukowi grafu stanów modelu procesu eksploatacji (rys. 3.4) odpowiada prawdopodobieństwo p_{ij} zmiany stanu procesu $X(t)$ ze stanu S_i na stan S_j w czasie T , według wzorów:

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 21, \quad i \neq j \quad (4.3)$$

$$p_{ii} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 21 \quad (4.4)$$

gdzie:

n_{ij} – liczba zmian stanu procesu $X(t)$ ze stanu S_i na stan S_j w czasie T ,
 n_i – liczba wyjść ze stanu S_i w czasie T .

W celu wyznaczenia prawdopodobieństw granicznych π_i łańcucha Markowa, na podstawie grafu stanów modelu procesu eksploatacji środków transportu, zbudowano macierz P prawdopodobieństw zmian stanów włożonego w proces $X(t)$ łańcucha Markowa, przedstawioną wzorami 4.5 oraz 4.8:

$$P = [p_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, 21, \quad i \neq j \quad (4.5)$$

gdzie:

p_{ij} – prawdopodobieństwo zmiany stanu procesu $X(t)$ ze stanu $i \in S$ na stan $j \in S$.

oraz:

$$p_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} p_{ij}(t) \quad (4.6)$$

$$p_{ij}(t) = P\{X(t) = j | X(0) = i\} \quad (4.7)$$

W celu wyznaczenia prawdopodobieństw granicznych π_i , $i = 1, 2, \dots, 21$, włożonego w proces $X(t)$ łańcucha Markowa został zbudowany macierzowy układ równań według poniższego zapisu:

$$P^T \cdot \Pi = \Pi \quad (4.9)$$

Następnie utworzony układ równań został zastąpiony układem równań liniowych 4.10, w którym jedno z równań zostało zastąpione warunkiem normalizacyjnym 4.11 w celu jego rozwiązania zgodnie z poniższym:

$$\sum_{i=1}^{21} p_{ij} \cdot \pi_i = \pi_j, \quad j = 1, 2, \dots, 21 \quad (4.10)$$

$$\sum_{i=1}^{21} \pi_i = 1 \quad (4.11)$$

Wyznaczony układ równań liniowych przedstawia się następująco:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_1 + \pi_2 + \dots + \pi_{21} = 1 \\ p_{1,2} \cdot \pi_1 + p_{3,2} \cdot \pi_3 + p_{8,2} \cdot \pi_8 + p_{10,2} \cdot \pi_{10} + p_{14,2} \cdot \pi_{14} = \pi_2 \\ p_{2,3} \cdot \pi_2 + p_{12,3} \cdot \pi_{12} + p_{13,3} \cdot \pi_{13} + p_{18,3} \cdot \pi_{18} + p_{19,3} \cdot \pi_{19} = \pi_3 \\ p_{3,4} \cdot \pi_3 = \pi_4 \\ p_{3,5} \cdot \pi_3 + p_{20,5} \cdot \pi_{20} = \pi_5 \\ p_{2,6} \cdot \pi_2 = \pi_6 \\ p_{6,7} \cdot \pi_6 = \pi_7 \\ p_{7,8} \cdot \pi_7 = \pi_8 \\ p_{7,9} \cdot \pi_7 = \pi_9 \\ p_{9,10} \cdot \pi_9 = \pi_{10} \\ p_{6,11} \cdot \pi_6 + p_{7,11} \cdot \pi_7 = \pi_{11} \\ p_{11,12} \cdot \pi_{11} + p_{13,12} \cdot \pi_{13} = \pi_{12} \\ p_{12,13} \cdot \pi_{12} = \pi_{13} \\ p_{3,14} \cdot \pi_3 = \pi_{14} \\ p_{2,15} \cdot \pi_2 = \pi_{15} \\ p_{15,16} \cdot \pi_{15} = \pi_{16} \\ p_{16,17} \cdot \pi_{16} + p_{18,17} \cdot \pi_{18} = \pi_{17} \\ p_{17,18} \cdot \pi_{17} = \pi_{18} \\ p_{16,19} \cdot \pi_{16} = \pi_{19} \\ p_{4,20} \cdot \pi_4 + p_{5,20} \cdot \pi_5 + p_{21,20} \cdot \pi_{21} = \pi_{20} \\ p_{20,21} \cdot \pi_{20} = \pi_{21} \end{array} \right. \quad (4.12)$$

W wyniku rozwiązania układu równań liniowych 4.12 wyznaczono wzór opisujący prawdopodobieństwo graniczne π_2 (dla stanu 2) badanego procesu losowego:

$$\pi_2 = \frac{1}{\left\{ \begin{array}{l} \frac{1 - p_{3,2} \cdot A - p_{6,7} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{8,2} \cdot p_{7,8} + p_{10,2} \cdot p_{9,10} \cdot p_{7,9}) - p_{14,2} \cdot p_{3,14} \cdot A}{p_{1,2}} + \\ + 1 + A \cdot [1 + p_{3,4} + p_{3,5} + B \cdot (p_{20,21} + p_{20,5} + 1)] + \\ + \frac{p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7})}{1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}} \cdot (1 + p_{12,13}) + \\ \frac{p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15}}{1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}} \cdot (1 + p_{17,18}) + p_{3,14} \cdot A + p_{2,15} \cdot [1 + p_{15,16} \cdot (1 + p_{16,19})] \\ + p_{2,6} \cdot [1 + p_{6,11} + p_{6,7} \cdot (1 + p_{7,8} + p_{7,11} + p_{7,9} \cdot (1 + p_{9,10}))] \end{array} \right\}} \quad (4.13)$$

oraz wzory opisujące prawdopodobieństwa graniczne π_i (dla pozostałych stanów badanego procesu losowego), wyznaczone w zależności od prawdopodobieństwa granicznego π_2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = \pi_2 \cdot \frac{1 - p_{3,2} \cdot A - p_{6,7} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{8,2} \cdot p_{7,8} + p_{10,2} \cdot p_{9,10} \cdot p_{7,9}) - p_{14,2} \cdot p_{3,14} \cdot A}{p_{1,2}} \\ \pi_3 = \pi_2 \cdot A \\ \pi_4 = \pi_2 \cdot A \cdot p_{3,4} \\ \pi_5 = \pi_2 \cdot A \cdot (B \cdot p_{20,5} + p_{3,5}) \\ \pi_6 = \pi_2 \cdot p_{2,6} \\ \pi_7 = \pi_2 \cdot p_{2,6} \cdot p_{6,7} \\ \pi_8 = \pi_2 \cdot p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,8} \\ \pi_9 = \pi_2 \cdot p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,9} \\ \pi_{10} = \pi_2 \cdot p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,9} \cdot p_{9,10} \\ \pi_{11} = \pi_2 \cdot [p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7})] \\ \pi_{12} = \pi_2 \cdot \frac{p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7})}{1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}} \\ \pi_{13} = \pi_2 \cdot \frac{p_{12,13} \cdot p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7})}{1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}} \\ \pi_{14} = \pi_2 \cdot A \cdot p_{3,14} \\ \pi_{15} = \pi_2 \cdot p_{2,15} \\ \pi_{16} = \pi_2 \cdot p_{2,15} \cdot p_{15,16} \\ \pi_{17} = \pi_2 \cdot \frac{p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15}}{1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}} \\ \pi_{18} = \pi_2 \cdot \frac{p_{17,18} \cdot p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15}}{1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}} \\ \pi_{19} = \pi_2 \cdot p_{16,19} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15} \\ \pi_{20} = \pi_2 \cdot A \cdot B \\ \pi_{21} = \pi_2 \cdot A \cdot B \cdot p_{20,21} \end{array} \right. \quad (4.14)$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
A = & p_{2,3} + p_{19,3} \cdot p_{16,19} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15} + \frac{p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7})}{1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}} \cdot \\
& \cdot (p_{12,3} + p_{13,3} \cdot p_{12,13}) + \\
& + \frac{p_{17,18} \cdot p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15} \cdot p_{18,3}}{1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

$$B = \frac{p_{4,20} \cdot p_{3,4} + p_{5,20} \cdot p_{3,5}}{1 - p_{5,20} \cdot p_{20,5} - p_{20,21} \cdot p_{21,20}} \tag{4.16}$$

3) Rozkład graniczny procesu semi-Markowa $X(t)$

W celu wyznaczenia prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach procesu semi-Markowa na podstawie opracowanego grafu stanów modelu procesu eksploatacji środków transportu, zbudowano macierz jądra procesu przedstawioną poniżej:

gdzie:

$$Q_{ij}(t) = P\{X(t_{n+1}) = j, t_{n+1} - t_n \leq t | X(t_n) = i\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 21 \quad (4.18)$$

$$Q_{ij}(t) = p_{ij} \cdot F_{ij}(t) \quad (4.19)$$

oraz:

$$F_{ij}(t) = P\{t_{n+1} - t_n \leq t | X(t_n) = i, X(t_{n+1}) = j\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 21 \quad (4.20)$$

jest dystrybuantą rozkładu zmiennej losowej θ_{ij} oznaczającej czas trwania stanu $i \in S$, pod warunkiem, że następnym stanem będzie stan $j \in S$.

Następnie, na podstawie twierdzenia granicznego dla procesów semimarkowskich, wyznaczono prawdopodobieństwa graniczne $p_i^* = \lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t)$ przebywania w stanach rozpatrywanego procesu $X(t)$.

Twierdzenie graniczne dla procesów semimarkowskich

Jeżeli łańcuch Markowa włożony w proces semimarkowski o skończonym zbiorze stanów S i jądrze typu ciągłego zawiera jedną klasę stanów powracających dodatnich dla każdego stanu $i \in S$ oraz dodatnie wartości średnich czasów $\bar{\theta}_i$ są skończone, to istnieją prawdopodobieństwa graniczne [22]:

$$p_i^* = \lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t) = \frac{\pi_i \cdot \bar{\theta}_i}{\sum_{i \in S} \pi_i \cdot \bar{\theta}_i} \quad (4.21)$$

gdzie:

$\bar{\theta}_i$ - wartości średnie bezwarunkowych czasów trwania stanów procesu.

W celu wyznaczenia wzorów opisujących bezwarunkowe czasy trwania stanów procesu θ_i , na podstawie grafu stanów modelu procesu eksploatacji przedstawionego na rysunku 3.4, zbudowano macierz warunkowych czasów trwania stanów procesu $X(t)$:

$$\theta = [\bar{\theta}_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, 21 \quad (4.22)$$

Na podstawie macierzy prawdopodobieństw przejść $P = [p_{ij}]$ oraz macierzy wartości średnich warunkowych czasów trwania stanów procesu $\theta = [\bar{\theta}_{ij}]$ zmiennych losowych θ_{ij} wyznaczono wzory opisujące wartości średnie $\bar{\theta}_i$ bezwarunkowych czasów trwania stanów procesu zgodnie z zależnością:

$$\bar{\theta}_i = \sum_{j=1}^{21} p_{ij} \cdot \bar{\theta}_{ij}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 21 \quad (4.24)$$

Wartości średnich bezwarunkowych czasów trwania stanów procesu $X(t)$ opisane są następującymi wzorami:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\theta}_1 = p_{1,2} \cdot \bar{\theta}_{1,2} \\ \bar{\theta}_2 = p_{2,3} \cdot \bar{\theta}_{2,3} + p_{2,6} \cdot \bar{\theta}_{2,6} + p_{2,15} \cdot \bar{\theta}_{2,15} \\ \bar{\theta}_3 = p_{3,2} \cdot \bar{\theta}_{3,2} + p_{3,4} \cdot \bar{\theta}_{3,4} + p_{3,5} \cdot \bar{\theta}_{3,5} + p_{3,14} \cdot \bar{\theta}_{3,14} \\ \bar{\theta}_4 = p_{4,1} \cdot \bar{\theta}_{4,1} + p_{4,20} \cdot \bar{\theta}_{4,20} \\ \bar{\theta}_5 = p_{5,1} \cdot \bar{\theta}_{5,1} + p_{5,20} \cdot \bar{\theta}_{5,20} \\ \bar{\theta}_6 = p_{6,7} \cdot \bar{\theta}_{6,7} + p_{6,11} \cdot \bar{\theta}_{6,11} \\ \bar{\theta}_7 = p_{7,8} \cdot \bar{\theta}_{7,8} + p_{7,9} \cdot \bar{\theta}_{7,9} + p_{7,11} \cdot \bar{\theta}_{7,11} \\ \bar{\theta}_8 = p_{8,2} \cdot \bar{\theta}_{8,2} \\ \bar{\theta}_9 = p_{9,10} \cdot \bar{\theta}_{9,10} \\ \bar{\theta}_{10} = p_{10,2} \cdot \bar{\theta}_{10,2} \\ \bar{\theta}_{11} = p_{11,12} \cdot \bar{\theta}_{11,12} \\ \bar{\theta}_{12} = p_{12,3} \cdot \bar{\theta}_{12,3} + p_{12,13} \cdot \bar{\theta}_{12,13} \\ \bar{\theta}_{13} = p_{13,3} \cdot \bar{\theta}_{13,3} + p_{13,12} \cdot \bar{\theta}_{13,12} \\ \bar{\theta}_{14} = p_{14,2} \cdot \bar{\theta}_{14,2} \\ \bar{\theta}_{15} = p_{15,16} \cdot \bar{\theta}_{15,16} \\ \bar{\theta}_{16} = p_{16,17} \cdot \bar{\theta}_{16,17} + p_{16,19} \cdot \bar{\theta}_{16,19} \\ \bar{\theta}_{17} = p_{17,18} \cdot \bar{\theta}_{17,18} \\ \bar{\theta}_{18} = p_{18,3} \cdot \bar{\theta}_{18,3} + p_{18,17} \cdot \bar{\theta}_{18,17} \\ \bar{\theta}_{19} = p_{19,3} \cdot \bar{\theta}_{19,3} \\ \bar{\theta}_{20} = p_{20,1} \cdot \bar{\theta}_{20,1} + p_{20,5} \cdot \bar{\theta}_{20,5} + p_{20,21} \cdot \bar{\theta}_{20,21} \\ \bar{\theta}_{21} = p_{21,1} \cdot \bar{\theta}_{21,1} + p_{21,20} \cdot \bar{\theta}_{21,20} \end{array} \right. \quad (4.25)$$

W następnym etapie wyznaczono wzory opisujące prawdopodobieństwa p_i^* dla rozkładu granicznego procesu semi-Markowa, które przedstawiają się następująco:

$$\left. \begin{aligned}
p_1^* &= \frac{[1 - A \cdot (p_{3,2} + p_{14,2} \cdot p_{3,14}) - p_{6,7} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{8,2} \cdot p_{7,8} + p_{10,2} \cdot p_{9,10} \cdot p_{7,9})] \cdot \bar{\theta}_1}{p_{1,2} \cdot M} \\
p_2^* &= \frac{\bar{\theta}_2}{M} \\
p_3^* &= \frac{A \cdot \bar{\theta}_3}{M} \\
p_4^* &= \frac{A \cdot p_{3,4} \cdot \bar{\theta}_4}{M} \\
p_5^* &= \frac{A \cdot (B \cdot p_{20,5} + p_{3,5}) \cdot \bar{\theta}_5}{M} \\
p_6^* &= \frac{p_{2,6} \cdot \bar{\theta}_6}{M} \\
p_7^* &= \frac{p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot \bar{\theta}_7}{M} \\
p_8^* &= \frac{p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,8} \cdot \bar{\theta}_8}{M} \\
p_9^* &= \frac{p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,9} \cdot \bar{\theta}_9}{M} \\
p_{10}^* &= \frac{p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,9} \cdot p_{9,10} \cdot \bar{\theta}_{10}}{M} \\
p_{11}^* &= \frac{p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7}) \cdot \bar{\theta}_{11}}{M} \\
p_{12}^* &= \frac{p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7}) \cdot \bar{\theta}_{12}}{(1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}) \cdot M} \\
p_{13}^* &= \frac{p_{12,13} \cdot p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7}) \cdot \bar{\theta}_{13}}{(1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}) \cdot M} \\
p_{14}^* &= \frac{A \cdot p_{3,14} \cdot \bar{\theta}_{14}}{M} \\
p_{15}^* &= \frac{p_{2,15} \cdot \bar{\theta}_{15}}{M} \\
p_{16}^* &= \frac{p_{2,15} \cdot p_{15,16} \cdot \bar{\theta}_{16}}{M} \\
p_{17}^* &= \frac{p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15} \cdot \bar{\theta}_{17}}{(1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}) \cdot M} \\
p_{18}^* &= \frac{p_{17,18} \cdot p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15} \cdot \bar{\theta}_{18}}{(1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}) \cdot M} \\
p_{19}^* &= \frac{p_{16,19} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15} \cdot \bar{\theta}_{19}}{M} \\
p_{20}^* &= \frac{A \cdot B \cdot \bar{\theta}_{20}}{M} \\
p_{21}^* &= \frac{A \cdot B \cdot p_{20,21} \cdot \bar{\theta}_{21}}{M}
\end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
M = & \frac{[1 - A \cdot (p_{3,2} + p_{1,4,2} \cdot p_{3,14}) - p_{6,7} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{8,2} \cdot p_{7,8} + p_{10,2} \cdot p_{9,10} \cdot p_{7,9})] \cdot \bar{\theta}_1}{p_{1,2}} + \bar{\theta}_2 + \\
& + A \cdot [\bar{\theta}_3 + p_{3,4} \cdot \bar{\theta}_4 + p_{3,5} \cdot \bar{\theta}_5 + B \cdot (\bar{\theta}_5 \cdot p_{20,5} + \bar{\theta}_{20} + p_{20,21} \cdot \bar{\theta}_{21})] + \\
& + \frac{p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7})}{1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}} \cdot (\bar{\theta}_{12} + \bar{\theta}_{13} \cdot p_{12,13}) + \\
& + \frac{p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15}}{1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}} \cdot (\bar{\theta}_{17} + \bar{\theta}_{18} \cdot p_{17,18}) + A \cdot p_{3,14} \cdot \bar{\theta}_{14} + \\
& + p_{2,15} \cdot [\bar{\theta}_{15} + p_{15,16} \cdot (\bar{\theta}_{16} + p_{16,19} \cdot \bar{\theta}_{19})] + p_{2,6} \cdot \\
& \cdot [\bar{\theta}_6 + p_{6,11} \cdot \bar{\theta}_{11} + p_{6,7} \cdot (\bar{\theta}_7 + \bar{\theta}_8 \cdot p_{7,8} + p_{7,11} \cdot \bar{\theta}_{11} + p_{7,9} \cdot (\bar{\theta}_9 + p_{9,10} \cdot \bar{\theta}_{10}))]
\end{aligned} \tag{4.27}$$

4.1.3.2. Szacowanie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych

W celu wyznaczenia ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w trakcie realizacji procesu eksploatacji środków transportu, wytypowano zbiór stanów eksploatacyjnych, które wpływają na wartość tego ryzyka. Są to stany, w których dochodzi do zakłócenia prawidłowego funkcjonowania środków transportu (zakłócenie realizacji przydzielonych zadań przewozowych) oraz stany, w których generowane są straty będące konsekwencją zakłócenia prawidłowego funkcjonowania środków transportu. Jako zakłócenie prawidłowego funkcjonowania środka transportu rozumie się czasową utratę zdolności pojazdu (autobusu miejskiego) spowodowaną jego uszkodzeniem, kolizją lub wypadkiem zaistniałymi w trakcie realizacji zadania przewozowego. W rezultacie dochodzi do braku możliwości kontynuacji realizowanego zadania przewozowego zgodnie z przyjętym harmonogramem kursów lub wznowienia rozpoczętego zadania po przeprowadzeniu naprawy pojazdu na trasie przez pogotowie techniczne. W obu przypadkach powstaje szkoda oraz związane z nią straty materialne.

W pracy stany modelu procesu eksploatacji, od których zależy wartość ryzyka zaliczono do podzbioru stanów niepożądanych $S_N \in S$. W rozpatrywanym podzbiorze znajdują się stany związane z uszkodzeniem, kolizją lub wypadkiem autobusu miejskiego zaistniałymi w trakcie realizacji zadania przewozowego oraz stany, w których wykonywane są czynności i działania mające na celu usunięcie skutków uszkodzeń, kolizji lub wypadków, czyli np.: interwencje jednostek pogotowia technicznego oraz naprawy pojazdów.

W podzbiorze stanów niepożądanych S_N analizowanego matematycznego modelu procesu eksploatacji znajdują się następujące stany:

- 6 – przestój po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego,
- 7 – diagnozowanie przez pogotowie techniczne po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego,
- 8 – naprawa przez pogotowie techniczne bez utraty kursu,
- 9 – naprawa przez pogotowie techniczne z utratą kursu,
- 10 – oczekiwanie na realizację zadania przewozowego,
- 11 – zjazd awaryjny,

- 12 – naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego,
- 13 – diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie wynikającej z uszkodzenia w trakcie realizacji zadania przewozowego,
- 15 – przestój spowodowany kolizją lub wypadkiem,
- 16 – akcja interwencyjno-ratownicza po kolizji lub wypadku,
- 17 – naprawa po kolizji lub wypadku,
- 18 – diagnozowanie po naprawie po kolizji lub wypadku,
- 19 – wymiana pojazdu po kolizji lub wypadku.

Na podstawie definicji ryzyka przyjętej w realizowanej rozprawie doktorskiej, zgodnie z którą **ryzyko stanowi iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia niepożądanego zdarzenia i miar jego skutków** oraz opracowanych grafu stanów modelu procesu eksploatacji i modelu matematycznego tego procesu, wartość ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w analizowanym procesie $X(t)$ wyznaczono jako sumę iloczynów prawdopodobieństw granicznych przebywania w stanach niepożądanych rozpatrywanego semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji i strat ponoszonych w związku z przebywaniem obiektów technicznych w tych stanach wyrażonych w postaci kosztowej. Wzór opisujący ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych, wyznaczone w odniesieniu do pojedynczego (uśrednionego) obiektu technicznego (autobusu miejskiego) w przeliczeniu na jednostkę czasu w [PLN/h], przedstawiono poniżej:

$$r = \sum_{i \in S_N} p_i^* \cdot c_i \left[\frac{PLN}{h} \right] \quad (4.28)$$

gdzie:

- c_i – jednostkowy koszt ponoszony w związku z przebywaniem w i -tym stanie modelu procesu $X(t)$, przypadający na jeden obiekt techniczny w [PLN/h],
- $S_N \subset S$ – podzbiór stanów modelu procesu eksploatacji będących stanami niepożądanymi.

W rozdziale 5 jednostkowe koszty c_i ponoszone w stanach niepożądanych modelu procesu $X(t)$, wyznaczone są jako wartości ujemne, wówczas wyznaczone na podstawie wzoru 4.28 ryzyko stanowi również wartość ujemną. Na potrzeby opracowanej metody oceny ryzyka oraz zaprezentowania wyników rozprawy doktorskiej w sposób czytelny, w tym zastosowania oceny ryzyka do wyznaczania strategii sterowania procesem eksploatacji, w dalszej części rozprawy ryzyko przedstawiono w postaci wartości bezwzględnej.

Identyfikacja i przeprowadzona analiza zagrożeń oraz zgromadzona wiedza w zakresie badań nad ryzykiem na podstawie literatury, np. [3, 20, 97], uzasadnia podział ryzyka ze względu na wyodrębnione zagrożenia. W pracy wytypowano

pięć rodzajów zagrożeń, które mogą wystąpić w badanym systemie eksploatacji środków transportu:

- Z_A - zagrożenie stratą powstałą w wyniku uszkodzenia autobusu miejskiego w trakcie realizacji zadania przewozowego i jego naprawy przez jednostkę pogotowia technicznego bez utraty kursu – dotyczy stanów 6,7,8;
- Z_B - zagrożenie stratą powstałą w wyniku uszkodzenia autobusu miejskiego w trakcie realizacji zadania przewozowego i jego naprawy przez jednostkę pogotowia technicznego z utratą kursu – dotyczy stanów 6,7,9,10;
- Z_C - zagrożenie stratą powstałą w wyniku uszkodzenia autobusu miejskiego w trakcie realizacji zadania przewozowego i jego naprawy w stacji obsługi po zjeździe awaryjnym lub holowaniu – dotyczy stanów 6,7,11,12,13;
- Z_D - zagrożenie stratą powstałą w wyniku kolizji lub wypadku autobusu miejskiego, przeprowadzenia akcji interwencyjno-ratowniczej i naprawy autobusu w stacji obsługi – dotyczy stanów 15,16,17,18;
- Z_E - zagrożenie stratą powstałą w wyniku kolizji lub wypadku autobusu miejskiego, przeprowadzenia akcji interwencyjno-ratowniczej i likwidacji autobusu wraz z wymianą na nowy obiekt – dotyczy stanów 15,16,19.

Na podstawie powyższego, w odniesieniu do pięciu wytypowanych zagrożeń, w pracy rozpatrywanych jest pięć rodzajów ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych:

- r_A – ryzyko uszkodzenia autobusu w trakcie realizacji zadania przewozowego oraz możliwości poniesienia strat w wyniku naprawy autobusu przez jednostkę pogotowia technicznego bez utraty kursu,
- r_B – ryzyko uszkodzenia autobusu w trakcie realizacji zadania przewozowego oraz możliwości poniesienia strat w wyniku naprawy autobusu przez jednostkę pogotowia technicznego z utratą kursu,
- r_C – ryzyko uszkodzenia autobusu w trakcie realizacji zadania przewozowego oraz możliwości poniesienia strat w wyniku naprawy autobusu w stacji obsługi po zjeździe awaryjnym lub holowaniu,
- r_D – ryzyko kolizji lub wypadku autobusu oraz możliwości poniesienia strat w wyniku akcji interwencyjno-ratowniczej oraz naprawy obiektu w stacji obsługi,
- r_E – ryzyko kolizji lub wypadku autobusu oraz możliwości poniesienia strat w wyniku akcji interwencyjno-ratowniczej oraz wymiany autobusu na nowy obiekt.

Na podstawie zbudowanego matematycznego modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich oraz grafu stanów tego modelu, wyznaczono wzór ogólny opisujący ryzyko rozpatrywanych zdarzeń niepożądanych, przedstawiony poniżej:

$$r_z = \left| \sum_{i \in S_{Nz}} p_i^* \cdot c_i \cdot \alpha_{iz} \right|, \quad z \in \{A, B, C, D, E\} \quad (4.29)$$

gdzie:

S_{Nz} – podzbiór stanów niepożądanych modelu procesu eksploatacji dotyczących ryzyka $r_z, z \in \{A, B, C, D, E\}$,
 α_{iz} – współczynnik oznaczający udział iloczynu $p_i^* \cdot c_i$ w rozpatrywanym rodzaju ryzyka $r_z, z \in \{A, B, C, D, E\}$.

Poniżej przedstawiono wzory opisujące rozpatrywane w pracy rodzaje ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych:

1) ryzyko r_A :

$$r_A = \left| \sum_{i \in S_{NA}} p_i^* \cdot c_i \cdot \alpha_{iA} \right|, \quad S_{NA} = \{6, 7, 8\} \quad (4.30)$$

$$r_A = |p_6^* \cdot c_6 \cdot \alpha_{6A} + p_7^* \cdot c_7 \cdot \alpha_{7A} + p_8^* \cdot c_8 \cdot \alpha_{8A}| \quad (4.31)$$

gdzie:

$$\alpha_{6A} = p_{6,7} \cdot p_{7,8}; \alpha_{7A} = p_{7,8}; \alpha_{8A} = 1$$

2) ryzyko r_B :

$$r_B = \left| \sum_{i \in S_{NB}} p_i^* \cdot c_i \cdot \alpha_{iB} \right|, \quad S_{NB} = \{6, 7, 9, 10\} \quad (4.32)$$

$$r_B = \left| p_6^* \cdot c_6 \cdot \alpha_{6B} + p_7^* \cdot c_7 \cdot \alpha_{7B} + p_9^* \cdot c_9 \cdot \alpha_{9B} + \right. \\ \left. + p_{10}^* \cdot c_{10} \cdot \alpha_{10B} \right| \quad (4.33)$$

gdzie:

$$\alpha_{6B} = p_{6,7} \cdot p_{7,9}; \alpha_{7B} = p_{7,9}; \alpha_{9B} = 1; \alpha_{10B} = 1$$

3) ryzyko r_C :

$$r_C = \left| \sum_{i \in S_{NC}} p_i^* \cdot c_i \cdot \alpha_{iC} \right|, \quad S_{NC} = \{6, 7, 11, 12, 13\} \quad (4.34)$$

$$r_C = \left| p_6^* \cdot c_6 \cdot \alpha_{6C} + p_7^* \cdot c_7 \cdot \alpha_{7C} + p_{11}^* \cdot c_{11} \cdot \alpha_{11C} + \right. \\ \left. + p_{12}^* \cdot c_{12} \cdot \alpha_{12C} + p_{13}^* \cdot c_{13} \cdot \alpha_{13C} \right| \quad (4.35)$$

gdzie:

$$\alpha_{6C} = p_{6,7} \cdot p_{7,11} + p_{6,11}; \alpha_{7C} = p_{7,11}; \alpha_{11C} = 1; \alpha_{12C} = 1; \alpha_{13C} = 1$$

4) ryzyko r_D :

$$r_D = \left| \sum_{i \in S_{ND}} p_i^* \cdot c_i \cdot \alpha_{iD} \right|, \quad S_{ND} = \{15, 16, 17, 18\} \quad (4.36)$$

$$r_D = \left| p_{15}^* \cdot c_{15} \cdot \alpha_{15D} + p_{16}^* \cdot c_{16} \cdot \alpha_{16D} + p_{17}^* \cdot c_{17} \cdot \alpha_{17D} + \right. \\ \left. + p_{18}^* \cdot c_{18} \cdot \alpha_{18D} \right| \quad (4.37)$$

gdzie:

$$\alpha_{15D} = p_{16,17}; \alpha_{16D} = p_{16,17}; \alpha_{17D} = 1; \alpha_{18D} = 1$$

5) ryzyko r_E :

$$r_E = \left| \sum_{i \in S_{NE}} p_i^* \cdot c_i \cdot \alpha_{iE} \right|, \quad S_{NE} = \{15, 16, 19\} \quad (4.38)$$

$$r_E = |p_{15}^* \cdot c_{15} \cdot \alpha_{15E} + p_{16}^* \cdot c_{16} \cdot \alpha_{16E} + p_{19}^* \cdot c_{19} \cdot \alpha_{19E}| \quad (4.39)$$

gdzie:

$$\alpha_{15E} = p_{16,19}; \alpha_{16E} = p_{16,19}; \alpha_{19E} = 1$$

Wobec powyższego wzory opisujące ryzyko wystąpienia poszczególnych zdarzeń niepożądanych rozpatrywanych w badanym systemie eksploatacji autobusów miejskich, przedstawiają się następująco:

$$\begin{cases} r_A = |p_{7,8} \cdot (p_{6,7} \cdot p_6^* \cdot c_6 + p_7^* \cdot c_7) + p_8^* \cdot c_8| \\ r_B = |p_{7,9} \cdot (p_{6,7} \cdot p_6^* \cdot c_6 + p_7^* \cdot c_7) + p_9^* \cdot c_9 + p_{10}^* \cdot c_{10}| \\ r_C = |p_6^* \cdot c_6 \cdot (p_{6,11} + p_{6,7} \cdot p_{7,11}) + p_{7,11} \cdot p_7^* \cdot c_7 + \\ + p_{11}^* \cdot c_{11} + p_{12}^* \cdot c_{12} + p_{13}^* \cdot c_{13}| \\ r_D = |p_{16,17} \cdot (p_{15}^* \cdot c_{15} + p_{16}^* \cdot c_{16}) + p_{17}^* \cdot c_{17} + p_{18}^* \cdot c_{18}| \\ r_E = |p_{16,19} \cdot (p_{15}^* \cdot c_{15} + p_{16}^* \cdot c_{16}) + p_{19}^* \cdot c_{19}| \end{cases} \quad (4.40)$$

Dla każdego ze stanów niepożądanych analizowanego procesu eksploatacji, na podstawie danych uzyskanych z badań eksploatacyjnych, wyliczono koszty jednostkowe przebywania pojedynczego obiektu technicznego (autobusu) w tym stanie w [PLN/h]. Koszty te stanowią miernik strat wynikających z przestojów uszkodzonych pojazdów, w tym np.: konieczności zastąpienia pojazdu uszkodzonego pojazdem rezerwowym, napraw pojazdów oraz interwencji jednostek pogotowia technicznego.

W zaproponowanej metodzie wyznaczania ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych, opracowanej z zastosowaniem stochastycznego modelu procesu eksploatacji (model semi-Markowa), ryzyko wyznaczone jest na podstawie

wartości granicznych (stacjonarnych) prawdopodobieństw przebywania w stanach matematycznego modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich p_i^* i jego wartość odnoszona jest do pojedynczego (uśrednionego) obiektu technicznego (autobusu miejskiego) w przeliczeniu na jednostkę czasu w [PLN/h]. Rozpatrując ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych jako wartość stacjonarną, wyznaczaną w dostatecznie długim przedziale czasu, możliwe jest wyznaczenie i analiza ryzyka łącznego r_Σ (wyznaczanego łącznie dla rozpatrywanych w pracy pięciu rodzajów ryzyka wystąpienia poszczególnych zdarzeń niepożądanych A, B, C, D oraz E). Wzór na podstawie, którego wyznaczone jest łączne ryzyko wystąpienia rozpatrywanych w pracy zdarzeń niepożądanych, w odniesieniu do pojedynczego (uśrednionego) obiektu technicznego (autobusu miejskiego) i w przeliczeniu na jednostkę czasu w [PLN/h], przedstawiono poniżej:

$$r_\Sigma = \left| \sum_{i \in S_N} p_i^* \cdot c_i \right| \quad (4.41)$$

gdzie:

$$S_N = \{6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19\}$$

4.2. EWALUACJA RYZYKA

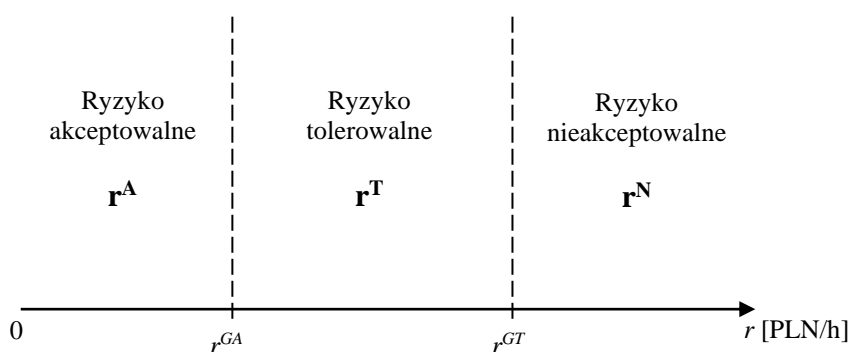
Etap ewaluacji ryzyka obejmuje wartościowanie wyznaczonego ryzyka polegające na przypisaniu otrzymanego wyniku ryzyka dla każdego z analizowanych zdarzeń niepożądanych do odpowiedniej kategorii ryzyka. W prezentowanej metodzie oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych wytypowano trzy przedziały, którym na podstawie literatury przedmiotu, przypisano odpowiednie kategorie ryzyka: akceptowalne, tolerowalne i nieakceptowalne. Decyzja o przypisaniu wyznaczonych wartości ryzyka związanego z poszczególnymi zagrożeniami do odpowiednich kategorii determinowana jest wyznaczeniem wartości górnych granic przedziałów: ryzyka akceptowalnego (górnej granicy r^{GA}) oraz ryzyka tolerowalnego (górnej granicy r^{GT}). Kryteria oceny ryzyka przedstawiono poniżej:

$$r_z \in \begin{cases} r^A, & \text{gdy } r_z \leq r^{GA} \\ r^T, & \text{gdy } r^{GA} < r_z \leq r^{GT} \\ r^N, & \text{gdy } r_z > r^{GT} \end{cases} \quad (4.42)$$

gdzie:

- r^A – przedział ryzyka akceptowalnego,
- r^T – przedział ryzyka tolerowalnego,
- r^N – przedział ryzyka nieakceptowalnego.

Na podstawie powyższych rozważań sporządzono wykres przedstawiający przedziały akceptowalności, tolerowalności i nieakceptowalności ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w badanym systemie eksploatacji środków transportu, przedstawiony na rysunku 4.5.



Rys. 4.5. Przedziały ryzyka w systemach eksploatacji środków transportu, gdzie: r^A - przedział ryzyka akceptowalnego, r^T - przedział ryzyka tolerowalnego, r^N - przedział ryzyka nieakceptowalnego, r^{GA} - górna granica przedziału ryzyka akceptowalnego, r^{GT} - górna granica przedziału ryzyka tolerowalnego

Na rysunku 4.5 oś pozioma jest osią ryzyka, na której zaznacza się wartość ryzyka wyznaczoną w ramach przeprowadzonej analizy ryzyka. Podział osi poziomej na przedziały kategorii ryzyka wytypowane w procesie ewaluacji ryzyka umożliwia przypisanie wyznaczonej wartości ryzyka do odpowiedniej kategorii ryzyka w sposób graficzny. Wyznaczona wartość ryzyka, będąca wielkością mniejszą lub równą od górnej granicy przedziału ryzyka akceptowalnego r^{GA} stanowi ryzyko akceptowalne. Wartość ryzyka mieszcząca się w przedziale między górną granicą ryzyka akceptowalnego a górną granicą ryzyka tolerowalnego ($r^{GA} < r \leq r^{GT}$) jest ryzykiem tolerowalnym. Natomiast ryzyko, którego wartość przewyższa wyznaczoną górną granicę ryzyka tolerowalnego r^{GT} jest ryzykiem nieakceptowalnym.

W rzeczywistych systemach eksploatacji obiektów technicznych decyzje dotycząca określenia wartości progów stanowiących górną granicę przedziału ryzyka akceptowalnego r^{GA} oraz górną granicę przedziału ryzyka tolerowalnego r^{GT} podejmuje decydent systemu biorąc pod uwagę aktualną sytuację i strategię działania przedsiębiorstwa oraz dodatkowe przesłanki (np.: tendencje w zakresie produkcji dóbr i usług, inflacji czy rynku finansowego).

Z uwagi na to, że wartość ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych mierzona jest w [PLN/h], w celu wyznaczenia górnych granic przedziałów ryzyka akceptowalnego r^{GA} oraz ryzyka tolerowalnego r^{GT} , wyznaczone wartości ryzyka odniesiono do dochodów uzyskiwanych w analizowanym systemie eksploatacji środków transportu. Dochody jednostkowe (wyznaczone dla pojedynczego obiektu technicznego w przeliczeniu na jednostkę czasu)

generowane w badanym systemie eksploatacji wyznaczone w ramach przeprowadzonych badań eksploatacyjnych również wyrażone są w [PLN/h]. Dochody z działalności przedsiębiorstwa stanowią różnicę przychodów uzyskiwanych przez przedsiębiorstwo i kosztów ponoszonych w związku z jego funkcjonowaniem. Dla analizowanego systemu eksploatacji środków transportu jako przychody rozumiane są wpływy z realizacji zadań przewozowych. Analiza otrzymanych wyników badań oraz identyfikacja realizowanego w systemie procesu eksploatacji umożliwiła wytypowanie dwóch rodzajów kosztów generowanych w rozpatrywanym systemie:

- kosztów generowanych w związku z funkcjonowaniem przedsiębiorstwa,
- kosztów wynikających z występowania zdarzeń niepożądanych w badanych systemie eksploatacji środków transportu.

Pierwszy z rodzajów kosztów obejmuje koszty działalności przedsiębiorstwa takie jak: wynagrodzenia kierowców, wynagrodzenia pracowników zaplecza technicznego, wynagrodzenia pracowników administracji, amortyzacja obiektów technicznych, ubezpieczenia, czynsz za najem i użytkowanie pomieszczeń, koszty związane z użytkowaniem, obsługiwaniem i zaopatrywaniem obiektów technicznych (środków transportu) oraz niepowodujące zakłóceń realizacji zadań przewozowych. W drugim przypadku powstawanie kosztów związane jest z występowaniem zdarzeń niepożądanych wynikających z istniejących zagrożeń w systemie eksploatacji środków transportu. Na podstawie opracowanego grafu stanów modelu procesu eksploatacji oraz na podstawie informacji pozyskanych z bazy danych i dokumentacji ewidencyjno-rozliczeniowej będących własnością Miejskich Zakładów Komunikacyjnych w wybranej aglomeracji miejskiej wyodrębniono koszty generowane w systemie dla stanów niepożądanych oraz dla pozostałych stanów modelu procesu eksploatacji.

Wymienione koszty wpływają na wynik działalności przedsiębiorstwa. Jeżeli są one większe niż uzyskany przychód z działalności to przedsiębiorstwo odnotowuje stratę (w pracy nazywaną dochodem ujemnym). Równowaga między przychodami a kosztami oznacza, że dochód przedsiębiorstwa jest równy zero, czyli badany system jest w stanie funkcjonować w sposób umożliwiający bieżącą działalność bez możliwości jej rozszerzenia spowodowanej brakiem funduszy na inwestycje. Najkorzystniej jest wówczas, gdy przychody znacznie przekraczają generowane koszty i przedsiębiorstwo, oprócz prawidłowej realizacji celów prowadzonej działalności, osiąga założony poziom zysku i może pozwolić sobie na zakup kolejnych środków transportu i w perspektywie długofalowej planować rozszerzenie zakresu działalności.

W złożonych systemach eksploatacji obiektów technicznych, których celem funkcjonowania jest prawidłowa i racjonalna realizacja przydzielonych im zadań oraz zapewnienie bezpieczeństwa przy jednoczesnym zapewnieniu efektywności ekonomicznej przedsiębiorstwa, zazwyczaj zakłada się, że wartość uzyskiwanych dochodów z funkcjonowania przedsiębiorstwa powinna być większa od zera. Wynika z tego, że ponoszone ryzyko nie powinno przekraczać

wartości dochodów uzyskiwanych w badanym systemie, gdyż w przeciwnym razie działalność realizowana w systemie będzie generowała straty. Dochód stanowi zatem determinantę wartościowania ryzyka oraz podstawę do wytypowania górnych granic przedziałów ryzyka akceptowalnego i tolerowalnego.

Poniżej przedstawiono sposób wyznaczania wartości górnych granic przedziałów akceptowalności i tolerowalności ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w badanym systemie eksploatacji autobusów miejskich. Wyznaczone wartości graniczne kategorii ryzyka akceptowalnego oraz kategorii ryzyka tolerowalnego odniesiono do dochodów uzyskiwanych w analizowanym systemie eksploatacji środków transportu.

Dochód jednostkowy generowany w badanym systemie eksploatacji w ciągu jednej godziny w przeliczeniu na jeden obiekt techniczny (autobus miejski), wyznaczany na podstawie semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji, stanowi sumę iloczynów prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach modelu procesu eksploatacji oraz kosztów (przychodów) c_i [PLN/h] generowanych w tych stanach:

$$D^{OT} = \sum_{i \in S} p_i^* \cdot c_i \quad (4.43)$$

gdzie:

S – zbiór stanów modelu procesu eksploatacji.

Wzór 4.43 można zapisać uwzględniając podział stanów modelu procesu eksploatacji na podzbiór stanów, które dotyczą zdarzeń niepożądanych oraz podzbiór pozostałych stanów, wówczas:

$$D^{OT} = \sum_{i \in (S-S_N)} p_i^* \cdot c_i + \sum_{i \in S_N} p_i^* \cdot c_i \quad (4.44)$$

gdzie:

$S_N \subset S$ – podzbiór stanów modelu procesu eksploatacji będących stanami niepożądanymi.

Uwzględniając wzór 4.28, wówczas:

$$D^{OT} = \sum_{i \in (S-S_N)} p_i^* \cdot c_i + r \quad (4.45)$$

natomiast ryzyko wyznaczone w jednostce czasu w odniesieniu do pojedynczego obiektu technicznego i przy uwzględnieniu, że w pracy ryzyko wyznaczone jest jako wartość bezwzględna wynosi:

$$r = \left| D^{OT} - \sum_{i \in (S-S_N)} p_i^* \cdot c_i \right| \quad (4.46)$$

W systemach eksploatacji autobusów miejskich, będących przedsiębiorstwami podlegającymi organom samorządowym, a tym samym będących własnością mieszkańców miasta, zakłada się, że wartość uzyskiwanych dochodów z funkcjonowania przedsiębiorstwa powinna być równa lub „nieco” większa od zera. Uwzględniając powyższe, w pracy wyznaczono wartości górnych granic przedziałów kategorii ryzyka akceptowalnego oraz kategorii ryzyka tolerowalnego, zakładając dwie kwoty rocznego dochodu uzyskiwanego w badanym systemie eksploatacji autobusów miejskich:

1. w przypadku górnej granicy przedziału kategorii ryzyka tolerowalnego r^{GT} założono, że roczny dochód generowany w badanym systemie eksploatacji dla wszystkich użytkowanych autobusów miejskich ($N = 149$ autobusów), wynosi $D^{ST} = 0$ [PLN/rok], wówczas dochód jednostkowy w przeliczeniu na jedną godzinę eksploatacji jednego obiektu technicznego wynosi $D^{OT} = 0$ [PLN/h];
2. w przypadku górnej granicy przedziału kategorii ryzyka akceptowalnego r^{GA} założono, że roczny dochód generowany w badanym systemie eksploatacji dla wszystkich użytkowanych autobusów miejskich ($N = 149$ autobusów), wynosi $D^{ST} = 500.000,00$ [PLN/rok], wówczas dochód jednostkowy w przeliczeniu na jedną godzinę eksploatacji jednego obiektu technicznego wynosi $D^{OT} = 0,38$ [PLN/h]

Uwzględniając powyższe założenia:

1. górna granica przedziału kategorii ryzyka tolerowalnego r^{GT} wyznaczana jest na podstawie wzoru:

$$r^{GT} = \left| - \sum_{i \in (S-S_N)} p_i^* \cdot c_i \right| \quad (4.47)$$

2. górna granica przedziału kategorii ryzyka akceptowalnego r^{GA} wyznaczana jest na podstawie wzoru:

$$r^{GA} = \left| 0,38 - \sum_{i \in (S-S_N)} p_i^* \cdot c_i \right| \quad (4.48)$$

4.3. WNIOSKI DO METODY OCENY RYZYKA

Zaproponowana metoda oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych została opracowana zgodnie z dotychczas przyjętym w literaturze standardem opierającym się na sformułowaniu celu analizy, identyfikacji i analizie zagrożeń oraz szacowaniu i ewaluacji ryzyka. Oryginalnym rozwiązaniem

zapropnowanym w pracy jest zbudowanie modelu matematycznego z zastosowaniem teorii procesów semi-Markowa do oszacowania wartości ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz ewaluacji tego ryzyka z uwzględnieniem kryterium dochodu generowanego przez system transportowy.

Istotne dla zaproponowanej metody są: bardzo dobra znajomość badanego systemu eksploatacji oraz możliwość pozyskania szczegółowych informacji na temat realizowanego w nim procesu tj. liczby wejść i wyjść z poszczególnych stanów procesu, czasów przebywania w tych stanach, rozkładów empirycznych tych czasów, kosztów związanych z wykonywanymi czynnościami w stanach oraz kosztów działalności i przychodów przedsiębiorstwa. W ramach przeprowadzonych badań eksploatacyjnych, zgodnie z określonym celem i przyjętą metodyką, pozyskano tego typu dane, co umożliwiło przetworzenie ich i zastosowanie na potrzeby opracowania powyższej metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych.

Ryzyko wyznaczone według powyższej metody wyrażone jest w postaci kosztowej [PLN/h]. Wyliczona jednostkowa wartość ryzyka stanowi informację o tym jak duże koszty ponoszone są w wyniku wystąpienia zdarzeń niepożądanych w danym systemie w ciągu jednej godziny funkcjonowania tego systemu w przeliczeniu na jeden obiekt techniczny. Przeliczenie tej wartości na liczbę eksploatowanych obiektów w systemie w ciągu roku może pokazać realny obraz strat finansowych związanych z niepożądanymi zdarzeniami, które przy wdrożeniu odpowiednich metod sterowania procesem eksploatacji można by minimalizować.

W procesie ewaluacji ryzyka wytypowano trzy kategorie ryzyka: akceptowalne, tolerowalne i nieakceptowalne. Przypisanie wyznaczonej wartości ryzyka do odpowiedniej kategorii uwarunkowano wyznaczeniem górnych granic przedziałów ryzyka akceptowalnego i ryzyka tolerowalnego, przedstawionych na rysunku 4.5 i za pomocą wzorów 4.47 i 4.48. Należy jednak pamiętać, że wyznaczenie wartości granic przedziałów ryzyka oraz podjęcie decyzji o akceptowalności ryzyka bądź jej braku jest działaniem subiektywnym, zależnym od indywidualnego wyboru osoby zarządzającej badanym systemem.

Przedstawiona metoda analizy i oceny ryzyka może stanowić narzędzie do badań dotyczących zagadnień związanych z bezpieczeństwem w systemach transportowych oraz innych złożonych systemach eksploatacji obiektów technicznych. Ponadto może być zastosowana zarówno jako samodzielne narzędzie do badań ryzyka, jak i element złożonych analiz dotyczących funkcjonowania systemów eksploatacji obiektów technicznych. Przykład zastosowania powyższej metody oceny ryzyka zdarzeń niepożądanych w aspekcie sterowania procesem eksploatacji środków transportu przedstawiono w rozdziale 5.

5. DECYZYJNY MODEL STEROWANIA PROCESEM EKSPLOATACJI Z UWZGLĘDNIENIEM KRYTERIUM RYZYKA

Opracowana i zaprezentowana w rozdziale 4 metoda oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych może być zastosowana w procesie podejmowania racjonalnych decyzji w trakcie realizacji procesu eksploatacji. Decyzje tego typu mają na celu zwiększenie efektywności funkcjonowania oraz bezpieczeństwa systemu i są realizowane często przez minimalizację kosztów czy minimalizację ryzyka, ale również poprawę wartości charakterystyk eksploatacyjno-technicznych użytkowanych obiektów. Niniejszy rozdział poświęcono wskazaniu możliwości zastosowania opracowanej metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemach eksploatacji środków transportu do sterowania procesem eksploatacji.

Utylitarność opracowanej metody polega na możliwości jej zastosowania w procesie podejmowania decyzji dotyczących funkcjonowania systemu eksploatacji i ustalenia strategii sterowania procesem realizowanym w tym systemie. Dla badanego systemu eksploatacji środków transportu, na potrzeby wykazania przydatności opracowanej metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych do sterowania procesem eksploatacji, przyjęto, że wybór odpowiednich decyzji na każdym etapie procesu eksploatacji realizowany jest z uwzględnieniem dwóch rodzajów charakterystyk opisujących funkcjonowanie tego systemu:

- bezpieczeństwa funkcjonowania rozpatrywanego za pomocą kryterium ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych,
- efektywności eksploatacyjno-technicznej rozpatrywanej za pomocą kryterium gotowości środków transportu do realizacji przydzielonego zadania przewozowego.

Wyżej wymienione charakterystyki stanowią zarówno kryteria oceny funkcjonowania systemu i jednocześnie kryteria decyzyjne sterowania procesem eksploatacji.

Wyniki badań opracowanego decyzyjnego modelu sterowania procesem eksploatacji umożliwiają wytypowanie optymalnych (suboptymalnych) strategii sterowania tym procesem przy minimalizacji ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz maksymalizacji poziomu gotowości obiektów technicznych do realizacji zadań przewozowych.

5.1. ANALIZA ZAGADNIENIA GOTOWOŚCI OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

Wymagania stawiane projektowanym oraz istniejącym systemom eksploatacji obiektów technicznych koncentrują się wokół zaspokajania potrzeb społecznych przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego poziomu

bezpieczeństwa. Prawidłowa realizacja przydzielonych zadań w określonym przedziale czasu możliwa jest dzięki zapewnieniu wymaganego poziomu gotowości obiektów technicznych. W odniesieniu do środków transportu (autobusów miejskich) realizujących zadania przewozowe na terenie miasta zapewnienie odpowiedniego poziomu gotowości umożliwia przewóz pasażerów zgodnie z przyjętym planem i harmonogramem realizowanych zadań przewozowych. Oznacza to konieczność przystąpienia do realizacji zadania w wyznaczonych chwilach, z zachowaniem przyjętej tolerancji czasowej, bez możliwości zmiany chwili rozpoczęcia realizacji zadania oraz konieczność zrealizowania przydzielonych zadań przewozowych w określonych przedziałach czasu [56].

Pojęcie gotowości w literaturze definiowane i interpretowane jest w różny sposób. Najogólniej przyjmuje się, że gotowość obiektu technicznego jest prawdopodobieństwem tego, że obiekt techniczny będzie zdolny do pełnienia swych funkcji, gdy użytkownik tego oczekuje (w chwili t) [2, 50, 54, 91]. Polska Norma [71] uzupełnia tą definicję o następujące wymagania dotyczące realizacji funkcji przez obiekt:

- w wybranej chwili lub przedziale czasowym,
- w określonych warunkach,
- przy założeniu, że dostarczane są wymagane środki zewnętrzne.

Na podstawie analizy definicji gotowości przedstawionych w literaturze przez różnych autorów w pracy [56] gotowość obiektu technicznego określono w następujący sposób: „Przez gotowość należy rozumieć właściwość obiektu technicznego (systemu lub elementu), która charakteryzuje go pod względem możliwości terminowego osiągnięcia lub utrzymania stanu zdatności (umożliwiającego realizację zadania) w chwili t lub w przedziale czasu $(t, t+\tau)$ ”.

W literaturze stosowane jest również pojęcie dyspozycyjności, które traktowane jest równorzędnie z pojęciem gotowości (w j. angielskim oba pojęcia tłumaczone są jako *availability*) [6, 87].

Gotowość obiektów technicznych jest ściśle związana z pojęciem niezawodności tych obiektów. Niezawodność jest jedną z najważniejszych cech użytkowych obiektu decydującą o bezawaryjnej pracy obiektu w danym przedziale czasu τ z założonym prawdopodobieństwem [50]. Definicja niezawodności systemu technicznego przedstawiona w pracy [76] oznacza: „prawdopodobieństwo zrealizowania zadania przez system w określonym przedziale czasu τ , $\tau \subset (t_0, t_k)$ i przy ustalonych poziomach oddziaływania czynników wymuszających”. W literaturze dotyczącej niezawodności obiektów technicznych wyróżnia się dwa stany obiektów [76]:

- stan zdatności,
- stan niezdatności.

Zdarza się, że istnieje problem z jednoznacznym przypisaniem stanu obiektu do jednego z powyższych stanów ze względu na różnorodne i subiektywne podejście do definicji uszkodzenia i jego oceny. Z tego powodu w pracach

autorzy wprowadzają pojęcie stanu pośredniego nazwanego stanem ograniczonej podatności [76].

W niektórych pracach pojęcie gotowości traktowane jest jako jedna z miar niezawodności [94, 98]. Analizując jednak inne prace [50, 52, 87] oraz posługując się terminologią zawartą w normie [71] z definicji niezawodności wynika, iż stanowi ona zespół właściwości opisujący gotowość obiektu. Oznacza to, że gotowość stanowi pojęcie nadrzędne w odniesieniu do niezawodności [87].

Gotowość obiektu technicznego (systemu lub elementu) jest pojęciem statystycznym, co oznacza, że może przyjmować określoną wartość [6]. Gotowość do realizacji zadania w sensie ilościowym można wyznaczyć za pomocą odpowiednich miar. Ilościowa ocena gotowości dokonywana jest za pomocą różnych wskaźników oraz kryteriów tej oceny i w dużej mierze zależy od specyfiki elementu, obiektu czy systemu. Największy wpływ na gotowość obiektu technicznego mają takie cechy obiektu jak: nieuszkodzalność, trwałość oraz podatność naprawcza i obsługowa [56, 71]. W związku z tym miary gotowości stanowią charakterystyki określające wpływ uszkodzeń, napraw, obsług profilaktycznych oraz kontroli stanu obiektu technicznego na terminowość, bezpieczeństwo i niezawodność realizacji zadań jemu przypisanych [56].

Wśród najczęściej stosowanych miar gotowości obiektu technicznego wyróżnia się [56]:

- prawdopodobieństwa chwilowe przebywania w poszczególnych stanach gotowości,
- prawdopodobieństwa asymptotyczne (stacjonarne) przebywania w poszczególnych stanach gotowości,
- wartości średnie oraz wariancje czasów przebywania w poszczególnych stanach gotowości,
- statystyczne szeregi rozdzielcze lub rozkłady prawdopodobieństwa czasów przejść pomiędzy poszczególnymi stanami eksploatacyjnymi a wyróżnionymi stanami gotowości,
- częstości lub intensywności przejść pomiędzy poszczególnymi stanami eksploatacyjnymi a wyróżnionymi stanami gotowości.

W wielu pracach zdefiniowano gotowość i wyznaczono jej wartości na za pomocą indywidualnych metod i miar oceny odwołując się do różnych rodzajów obiektów technicznych czy systemów eksploatacji, np. dla wojskowego statku powietrznego z zastosowaniem współczynnika gotowości jako miary wysiłku służb technicznych w utrzymaniu statków powietrznych [101], dla elementów jednostki rybackiej tworzącej szeregową strukturę niezawodnościową [55], dla autobusów miejskich z wyróżnieniem podsystemu utrzymania ruchu i podsystemu interwencyjnego [56], dla pojedynczych stanowisk podsystemu utrzymania ruchu lub systemu utrzymania ruchu jako całości [57], dla kopalnianych systemów telekomunikacyjnych na podstawie intensywności uszkodzeń i intensywności naprawy [61].

Podstawową charakterystyką stosowaną do opisu gotowości jest gotowość funkcjonalna [6, 56, 91, 107]:

$$K_g(t) = R(t) + \int_0^t R(t-x) \cdot h(x) dx \quad (5.1)$$

gdzie:

$R(t)$ – funkcja niezawodności określona jako prawdopodobieństwo tego, że w przedziale czasu $(0, t)$ obiekt był zdatny (nie uszkodził się),
 $\int_0^t R(t-x) \cdot h(x) dx$ – prawdopodobieństwo tego, że w przedziale czasu $(0, t)$ obiekt uszkodził się n razy i n razy został odnowiony, a ostatnia odnowa została zrealizowana w chwili $t' < t$ i w przedziale czasu (t', t) obiekt nie uszkodził się,
 $h(x)$ – gęstość odnowy.

Wartością stacjonarną funkcji $K_g(t)$ jest asymptotyczny współczynnik gotowości K_g opisany następująco [56]:

$$K_g = \lim_{t \rightarrow \infty} K_g(t) = \frac{ET}{ET + E\theta} \quad (5.2)$$

gdzie:

ET – wartość oczekiwana czasu gotowości (zdatności) obiektu technicznego,
 $E\theta$ – wartość oczekiwana czasu niegotowości (niezdatności) obiektu technicznego.

Prawidłowa realizacja zadań przydzielonych obiektowi technicznemu możliwa jest wówczas, gdy obiekt ten przebywa w pewnym, wyróżnionym względem danego zadania, zbiorze stanów eksploatacyjnych oraz jeżeli nie wystąpią zdarzenia powodujące przestój lub uniemożliwiające wykonanie tego zadania. Zbiór tych stanów nazywa się zbiorem stanów gotowości. Pozostałe stany eksploatacyjne, czyli takie, w których obiekt techniczny nie ma możliwości realizacji przydzielonego zadania w określonym czasie, nazywane są zbiorem stanów niegotowości [56].

Wyodrębnienie poszczególnych stanów eksploatacyjnych w procesie eksploatacji oraz pogrupowanie ich odpowiednio w zbiory stanów gotowości i niegotowości do realizacji danego zadania umożliwia wyznaczenie miar gotowości obiektu technicznego [56].

W literaturze przedmiotowej wyróżnia się różne rodzaje gotowości do realizacji przydzielonego zadania. Klasyfikację rodzajów gotowości przedstawiono w tabeli 5.1.

Tab. 5.1. Klasyfikacja rodzajów gotowości [50, 56]

L.p.	Rodzaj gotowości	Opis
1	Funkcjonalna	Prawdopodobieństwo tego, że obiekt techniczny rozpocznie realizację zadania w dowolnej chwili t .
2	Początkowa	Prawdopodobieństwo tego, że obiekt techniczny rozpocznie realizację zadania przed upływem ustalonego czasu rezerwy czasowej τ_g potrzebnej na uruchomienie obiektu technicznego i mobilizację ludzi.
3	Zadaniowa	Prawdopodobieństwo tego, że obiekt techniczny wykona zadanie lub będzie je realizował w określonym przedziale czasu o długości τ .
4	Operacyjna	Prawdopodobieństwo tego, że obiekt techniczny rozpocznie realizację zadania w dowolnej chwili t oraz wykona zadanie lub będzie je realizował w określonym przedziale czasu o długości τ .
5	Potencjalna	Prawdopodobieństwo tego, że obiekt techniczny rozpocznie realizację zadania przed upływem ustalonego czasu rezerwy czasowej τ_g potrzebnej na uruchomienie obiektu technicznego i mobilizację ludzi oraz wykona zadanie lub będzie je realizował w określonym przedziale czasu o długości τ .

W praktyce eksploatacyjnej najczęściej stosuje się pojęcia gotowości funkcjonalnej i operacyjnej w odniesieniu do identyfikacji procesów eksploatacji obiektów technicznych [50, 55, 56].

5.1.1. Wyznaczenie rzeczywistych gotowości obiektu technicznego i systemu eksploatacji

W pracy rzeczywista gotowość obiektu technicznego (środka transportu) wyznaczana jest jako suma prawdopodobieństw granicznych przebywania w stanach gotowości semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji, na podstawie danych uzyskanych z badań eksploatacyjnych. Zbiorem stanów gotowości do realizacji zadania przewozowego S_G jest zbiór stanów eksploatacyjnych, w których obiekt techniczny może terminowo i prawidłowo realizować przydzielone zadanie przewozowe oraz nie występują wewnętrzne lub zewnętrzne zakłócenia uniemożliwiające wykonanie tego zadania. Do zbioru stanów gotowości należą stany, w których obiekt wraz z operatorem przebywa w systemie eksploatacji, jest zdalny i zaopatrzony lub zostanie uzdatniony i/lub zaopatrzony w czasie krótszym niż czas rezerwy czasowej, przeznaczonej na ten cel [56]. Wówczas rzeczywista gotowość obiektu technicznego przedstawiona jest wzorem:

$$G^{OT} = \sum_{i \in S_G} p_i^* \quad (5.3)$$

gdzie:

$S_G \subset S$ – podzbiór stanów modelu procesu eksploatacji będących stanami gotowości.

Pozostałe stany eksploatacyjne są stanami niegotowości do realizacji zadania przewozowego, co oznacza, że w tych stanach obiekt techniczny nie ma możliwości rozpoczęcia realizacji zadania przed upływem ustalonego limitu czasowego.

W celu wyznaczenia rzeczywistej gotowości obiektów technicznych w badanym systemie eksploatacji środków transportu na podstawie semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji, spośród stanów eksploatacyjnych wyznaczono podzbiór stanów gotowości $S_G \subset S$. W prezentowanym modelu wyróżniono następujące stany gotowości obiektu technicznego:

- 1 - postój na placu zajezdni autobusowej,
- 2 - realizacja zadania przewozowego,
- 10 - oczekiwanie na realizację zadania przewozowego,
- 14 - oczekiwanie na przydzielenie zadania przewozowego.

Na podstawie powyższych rozważań gotowość pojedynczego obiektu technicznego (środka transportu), wyznaczana na podstawie semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji przedstawionego w rozdziale 4 została określona następująco:

$$G^{OT} = \frac{1}{M} \cdot \left\{ \frac{[1 - A \cdot (p_{3,2} + p_{14,2} \cdot p_{3,14}) - p_{6,7} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{8,2} \cdot p_{7,8} + p_{10,2} \cdot p_{9,10} \cdot p_{7,9})] \cdot \bar{\theta}_1}{p_{1,2}} + \bar{\theta}_2 + p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,9} \cdot p_{9,10} \cdot \bar{\theta}_{10} + A \cdot p_{3,14} \cdot \bar{\theta}_{14} \right\} \quad (5.4)$$

W złożonych systemach eksploatacji środków transportu wymaga się, aby pewna liczba obiektów technicznych (środków transportu) była zawsze gotowa do prawidłowej realizacji przydzielonych zadań przewozowych. Liczba ta stanowi określoną grupę wszystkich obiektów eksploatowanych w systemie. Obok obiektów podstawowych przeznaczonych do realizacji zadania znajduje się grupa obiektów rezerwowych, czyli środków transportu, które zastępują obiekty podstawowe w przypadku braku możliwości kontynuacji przydzielonych im zadań. Struktura, którą są sprzężone obiekty techniczne w takim systemie eksploatacji jest strukturą progową typu „ k z N ”. Cechą systemów o strukturze progowej jest możliwość prawidłowej realizacji zadania, nawet wówczas, gdy pewna liczba obiektów technicznych jest niegotowa do jego realizacji. Dla tego typu systemu na podstawie wyznaczonej wartości gotowości rzeczywistej pojedynczego obiektu technicznego wyznacza się gotowość rzeczywistą systemu eksploatacji zgodnie ze wzorem [56]:

$$G^{ST} = \sum_{i=k}^N \binom{N}{i} \cdot [G^{OT}]^i \cdot [1 - G^{OT}]^{N-i} \quad (5.5)$$

gdzie:

N – liczba wszystkich obiektów technicznych eksploatowanych w systemie,

k – wymagana minimalna liczba obiektów gotowych do realizacji zadania,

G^{OT} – rzeczywista gotowość pojedynczego obiektu technicznego wyznaczona na podstawie semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji.

5.1.2. Wyznaczenie wymaganych gotowości systemu eksploatacji i pojedynczego obiektu technicznego

Podobnie jak w przypadku metody oceny ryzyka przedstawionej w rozdziale 4, rzeczywistą gotowość systemu eksploatacji do realizacji przydzielonych zadań przewozowych ocenia się z punktu widzenia osiągnięcia wartości granicznej, wymaganej do prawidłowego funkcjonowania systemu transportowego. Punktem odniesienia do przeprowadzenia oceny rzeczywistej gotowości systemu eksploatacji do realizacji przypisanych zadań transportowych jest wyznaczenie gotowości wymaganej G_w^{ST} systemu eksploatacji.

Wymagana gotowość systemu transportowego do realizacji przydzielonych zadań przewozowych wyznaczana jest na podstawie wartości parametrów charakteryzujących przydzielone zadanie przewozowe oraz badany system eksploatacji, tj.[56]:

- wymaganej liczby obiektów technicznych (autobusów miejskich) niezbędnych do prawidłowej realizacji przydzielonego zadania przewozowego – k ,
- długości przedziału czasu, w którym przydzielone zadanie przewozowe ma zostać zrealizowane – τ ,
- liczby obiektów technicznych (autobusów miejskich) eksploatowanych w systemie – N .

Oznaczając $\overline{T_w^{OT}}$ jako średni wymagany czas gotowości oraz $\overline{U_w^{OT}}$ jako średni wymagany czas niegotowości pojedynczego obiektu technicznego (autobusu miejskiego), wyznaczone w przedziale czasu τ przeznaczonym na realizację zadania przewozowego na podstawie zależności [56]:

$$\overline{T_w^{OT}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_w^{OT(i)}}{N} \quad (5.6)$$

$$\overline{U_w^{OT}} = \frac{\sum_{i=1}^N U_w^{OT(i)}}{N} \quad (5.7)$$

gdzie:

$T_w^{OT(i)}$ - wymagany czas gotowości i -tego obiektu technicznego (autobusu miejskiego),
 $U_w^{OT(i)}$ - wymagany czas niegotowości i -tego obiektu technicznego (autobusu miejskiego),

oraz:

sumaryczny wymagany czas gotowości systemu eksploatacji:

$$T_w^{ST(N)} = \sum_{i=1}^N T_w^{OT(i)} = N \cdot \overline{T_w^{OT}} \quad (5.8)$$

sumaryczny wymagany czas niegotowości systemu eksploatacji:

$$U_w^{ST(N)} = \sum_{i=1}^N U_w^{OT(i)} = N \cdot \overline{U_w^{OT}} \quad (5.9)$$

wówczas można wyznaczyć gotowość wymaganą systemowi do realizacji zadania przewozowego jako iloraz sumarycznego wymaganego czasu gotowości $T_w^{ST(N)}$ i sumy sumarycznego wymaganego czasu gotowości $T_w^{ST(N)}$ oraz sumarycznego wymaganego czasu niegotowości $U_w^{ST(N)}$ wszystkich autobusów miejskich użytkowanych w systemie eksploatacji, w przedziale czasu τ przeznaczonym na realizację zadania transportowego w następujący sposób [56]:

$$G_w^{ST} = \frac{T_w^{ST(N)}}{T_w^{ST(N)} + U_w^{ST(N)}} = \frac{\overline{T_w^{OT}}}{\overline{T_w^{OT}} + \overline{U_w^{OT}}} \quad (5.10)$$

Biorąc pod uwagę, że dla dowolnego zadania przewozowego realizowanego w przedziale czasu τ suma średnich wymaganych czasów gotowości i niegotowości pojedynczego obiektu technicznego jest równa przedziałowi czasu τ przeznaczonego na jego realizację zgodnie ze wzorem [56]:

$$\overline{T_w^{OT}} + \overline{U_w^{OT}} = \tau \quad (5.11)$$

wówczas wzór opisujący gotowość wymaganą systemowi eksploatacji przedstawia się następująco [56]:

$$G_w^{ST} = \frac{\overline{T_w^{OT}}}{\tau} \quad (5.12)$$

Dla zmiennych $T_w^{ST(N)}$ i $U_w^{ST(N)}$ istnieją zależności [56]:

$$T_w^{ST(N)} = k \cdot \tau \quad (5.13)$$

$$U_w^{ST(N)} = (N - k) \cdot \tau \quad (5.14)$$

gdzie:

k - wymagana (minimalna) liczba obiektów technicznych (środków transportu) gotowych do prawidłowej realizacji przydzielonego zadania przewozowego,

$N - k$ - wymagana (maksymalna) liczba obiektów technicznych (środków transportu) niegotowych do prawidłowej realizacji przydzielonego zadania przewozowego.

Biorąc pod uwagę opisane wyżej zależności gotowość wymaganą systemu eksploatacji do realizacji przydzielonego zadania przewozowego można przedstawić następująco [56]:

$$G_w^{ST} = \frac{T_w^{ST(N)}}{T_w^{ST(N)} + U_w^{ST(N)}} = \frac{k \cdot \tau}{k \cdot \tau + (N - k) \cdot \tau} = \frac{k \cdot \tau}{(k + (N - k)) \cdot \tau} = \frac{k \cdot \tau}{N \cdot \tau} = \frac{k}{N} \quad (5.15)$$

W celu zapewnienia prawidłowej realizacji przydzielonych zadań przewozowych w systemie eksploatacji autobusów miejskich wyznaczona gotowość rzeczywista systemu technicznego musi być co najmniej równa wymaganej gotowości systemu do realizacji przydzielonych zadań przewozowych. Oznacza to, że musi zostać spełniony następujący warunek:

$$G^{ST}(k, N) \geq G_w^{ST}(k, N) \quad (5.16)$$

zatem:

$$\sum_{i=k}^N \binom{N}{i} \cdot [G^{OT}]^i \cdot [1 - G^{OT}]^{N-i} \geq \frac{k}{N} \quad (5.17)$$

W rozpatrywanym systemie eksploatacji autobusów miejskich dla konkretnego zadania przewozowego zarówno liczba autobusów użytkowanych w systemie oraz wymagana liczba autobusów niezbędnych do prawidłowej realizacji tego zadania mają wartości stałe ($N = const$, $k = const$). Wówczas możliwość prawidłowej realizacji przydzielonych zadań przewozowych zależy (zgodnie z warunkiem 5.17) od gotowości rzeczywistej pojedynczego obiektu technicznego G^{OT} . Na tej podstawie, w celu wyznaczenia wymaganej gotowości pojedynczego obiektu technicznego do prawidłowej realizacji przydzielonego zadania przewozowego sformułowano warunek 5.18:

$$\text{jeżeli } G^{ST}(k, N) \geq G_W^{ST}(k, N), \text{ to } G^{OT}(k, N) \geq G_W^{OT}(k, N) \quad (5.18)$$

czyli:

$$\text{jeżeli } \sum_{i=k}^N \binom{N}{i} \cdot [G^{OT}]^i \cdot [1 - G^{OT}]^{N-i} \geq \frac{k}{N}, \text{ to } G^{OT}(k, N) \geq G_W^{OT}(k, N) \quad (5.19)$$

Jeżeli zatem gotowość rzeczywista systemu technicznego jest większa lub równa gotowości wymaganej systemu do prawidłowej realizacji przydzielonego zadania przewozowego, czyli zgodnie z powyższym warunkiem zachodzi nierówność $G^{ST}(k, N) \geq G_W^{ST}(k, N)$, to również rzeczywista gotowość obiektu technicznego $G^{OT}(k, N)$ jest co najmniej równa gotowości wymaganej tego obiektu $G_W^{OT}(k, N)$ do prawidłowej realizacji przydzielonego zadania przewozowego.

W badanym systemie eksploatacji autobusów miejskich proces eksploatacji realizowany jest w cyklu dobowym. Każda doba podzielona jest na pięć przedziałów czasowych, w trakcie których realizowane są poszczególne zadania przewozowe różniące się wymaganą liczbą obiektów technicznych k niezbędnych do prawidłowej realizacji zadań przewozowych oraz długością przedziału czasu trwania zadania τ . Prawidłowe funkcjonowanie systemu eksploatacji autobusów miejskich możliwe jest wówczas, gdy zostaną zrealizowane poszczególne zadania przewozowe realizowane w trakcie trwania doby. Uwzględniając fakt, że w badanym systemie autobusy miejskie sprzężone są strukturą progową, można przyjąć, że dobowe zadania przewozowe zostaną prawidłowo zrealizowane wówczas, gdy zostaną prawidłowo zrealizowane tzw. maksymalne zadania przewozowe. Maksymalnym zadaniem przewozowym jest to zadanie (spośród zadań realizowanych w systemie eksploatacji), dla którego wymagana liczba gotowych (zdatnych i zaopatrzonych) obiektów jest najwyższa. W badanym systemie eksploatacji środków transportu, zgodnie z danymi przedstawionymi w rozdziale 3, maksymalne zadanie przewozowe realizowane jest w porannym szczycie komunikacyjnym (w przedziale czasu od godz. 5:00 do godz. 9:00) w trakcie każdej rozpatrywanej doby w dni powszednie.

Biorąc pod uwagę maksymalne zadanie przewozowe realizowane w badanym systemie eksploatacji środków transportu oraz liczbę obiektów eksploatowanych w tym systemie, wówczas: $k=126$, $N=149$. Uzyskane wyniki gotowości rzeczywistej oraz wymaganej dla pojedynczego obiektu technicznego oraz badanego systemu eksploatacji przedstawiono w rozdziale 6.

5.2. WYZNACZENIE STRATEGII STEROWANIA PROCESEM EKSPLOATACJI W SYSTEMIE AUTOBUSOWEGO TRANSPORTU MIEJSKIEGO

Wśród wielu rozwiązań stosowanych do wspomagania procesu podejmowania decyzji, szerokie zastosowanie mają rozwiązania informatyczne, których zadaniem jest dostarczanie przetworzonych informacji do osób podejmujących decyzje na poszczególnych szczeblach organizacji oraz przygotowanie wariantów decyzji i wspomaganie w wyborze optymalnego wariantu. Wybór wariantu decyzyjnego w szczególności dotyczy decyzji taktycznych i strategicznych, które obarczone są dużym ryzykiem popełnienia błędu i poniesienia znacznie większych kosztów w porównaniu do decyzji operacyjnych. Wykorzystując dostępne dane i modele można rozwiązywać problemy decyzyjne o różnym poziomie ich złożoności. Decyzje w tego typu systemach podejmowane są przy zastosowaniu algorytmu, w którym różnym końcowym operacjom odpowiadają zróżnicowane decyzje (zdarzenia) ze zbioru wcześniej zaplanowanych wariantów wyboru. W zbiorze znajdują się zarówno warianty jak i przesłanki (zdarzenia oraz towarzyszące im stany) do wyboru najlepszego z nich, zebrane w oparciu o pozytywne doświadczenia operatorów (osób decyzyjnych, ekspertów). Decyzje i przesłanki modelowane są w postaci sieci zdarzeń i odpowiadających im formuł zdarzeń [8].

W procesie sterowania systemem eksploatacji obiektów technicznych istotny jest wybór właściwych decyzji podejmowanych w poszczególnych stanach eksploatacyjnych. Umożliwia on wyznaczenie racjonalnej (optymalnej, suboptymalnej) strategii sterowania procesem eksploatacji z punktu widzenia wartości rozpatrywanych charakterystyk. W realizowanej rozprawie doktorskiej charakterystykami, które determinują wybór strategii sterowania procesem eksploatacji autobusów miejskich są ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych i gotowość autobusów do realizacji przydzielonego zadania transportowego.

W rozpatrywanym procesie eksploatacji środków transportu wytypowano stany, w których podejmowane są decyzje mające wpływ na wartość ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości obiektów technicznych. Stany te nazwano w pracy stanami decyzyjnymi S_D . W stanach decyzyjnych analizowanego procesu eksploatacji dokonywany jest wybór jednego spośród dwóch wariantów realizacji działań przypisanych do danego stanu. Działania te różnią się kosztem (dochodem) oraz czasem ich realizacji. Wybór decyzji związanej z „intensywnym” przebiegiem realizacji działań w krótkim przedziale czasu zazwyczaj wiąże się z poniesieniem większych kosztów jednostkowych (w przeliczeniu na jednostkę czasu) niż w przypadku wyboru decyzji o „normalnym” przebiegu realizacji działań w dłuższym przedziale czasu, np. wykonanie „intensywnej” naprawy lub diagnozowania uszkodzonego autobusu w krótkim przedziale czasu ze względu na skierowanie większej liczby mechaników lub diagnostów generuje większe koszty jednostkowe niż w przypadku naprawy lub diagnozowania tego samego autobusu przez jednego

specjalistę (mechanika lub diagnostę) w dłuższym przedziale czasu. W pracy, na podstawie analizy przestrzeni stanów eksploatacyjnych badanego 21-stanowego procesu eksploatacji środków transportu do zbioru stanów decyzyjnych przypisano następujące stany:

- 2 – realizacja zadania przewozowego,
- 4 – obsługa codzienna OC,
- 5 – obsługa techniczna OT,
- 7 – diagnozowanie przez pogotowie techniczne po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego,
- 8 – naprawa przez pogotowie techniczne bez utraty kursu,
- 9 – naprawa przez pogotowie techniczne z utratą kursu,
- 11 – zjazd awaryjny,
- 12 – naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego,
- 13 – diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie wynikającej z uszkodzenia w trakcie realizacji zadania przewozowego,
- 16 – akcja interwencyjno-ratownicza po kolizji lub wypadku,
- 17 – naprawa po kolizji lub wypadku,
- 18 – diagnozowanie po naprawie po kolizji lub wypadku,
- 19 – wymiana pojazdu po kolizji lub wypadku,
- 20 – naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu wykrytym podczas OC lub OT,
- 21 – diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie wynikającej z uszkodzenia wykrytego podczas OC lub OT.

W celu wskazania możliwości zastosowania metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych przedstawionej w rozdziale 4 opracowano model decyzyjny sterowania procesem eksploatacji środków transportu z zastosowaniem decyzyjnych procesów semi-Markowa. Zastosowanie tego modelu umożliwia wybór optymalnej (suboptymalnej) strategii sterowania (ciągu decyzji), z punktu widzenia rozpatrywanych kryteriów oceny: ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości obiektu technicznego do realizacji przydzielonych zadań przewozowych. Zbudowany model decyzyjny został opracowany przy zastosowaniu decyzyjnych procesów semi-Markowa, a wybór racjonalnych strategii sterowania realizowany jest za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania, dla którego zbiór rozwiązań optymalnych stanowi front Pareto.

Decyzyjne procesy semi-Markowa stanowią dogodne narzędzie, którego zastosowanie ułatwia skomplikowany proces podejmowania racjonalnych decyzji w złożonych systemach eksploatacji obiektów technicznych. Zastosowanie decyzyjnych procesów semi-Markowa do sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych możliwe jest jedynie wówczas, gdy modelowany proces eksploatacji jest procesem stochastycznym, spełniającym teoretyczne wymogi dotyczące procesów semi-Markowa. W teorii decyzyjnych procesów Markowa wynik (efekt) zależy od zastosowanej strategii sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych, rozumianej jako ciąg decyzji

stosowanych (podejmowanych) w chwilach zmian stanów procesu. W takim przypadku sterowanie procesem eksploatacji polega na wyznaczeniu racjonalnej (optymalnej, suboptymalnej) strategii sterowania (ciągu decyzji podejmowanych w poszczególnych stanach modelowanego procesu), w taki sposób, aby funkcja (funkcje) stanowiąca kryterium oceny osiągała wartość minimalną lub maksymalną [25].

W początkowym etapie opracowania modelu decyzyjnego wyznaczenia strategii sterowania procesem eksploatacji badanego systemu określono:

- kryteria decyzyjne – sformułowanie postaci funkcji celu problemu decyzyjnego na podstawie modelu oceny ryzyka i gotowości obiektów technicznych,
- składowe funkcji celu – uwzględnienie w sformułowanych funkcjach kryterialnych składowych odnoszących się do poszczególnych rodzajów ryzyka wystąpienia zdarzenia niepożądanego i do gotowości obiektów technicznych,
- ograniczenia obszaru rozwiązań dopuszczalnych przez przyjęcie odpowiedniego zakresu zmienności zmiennych decyzyjnych.

Decyzyjny proces semi-markowski jest to proces stochastyczny $\{X(t): t \geq 0\}$, którego realizacja zależy od podejmowanych decyzji w chwili początkowej procesu t_0 oraz w chwilach zmian stanów procesu $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$ [25]. W pracy zakłada się, że analizowany model procesu eksploatacji obiektów technicznych jest procesem stochastycznym $\{X(t): t \geq 0\}$ o skończonej liczbie stanów $i \in S = \{1, 2, \dots, m\}$, wówczas [56]:

$$D_i = \{d_i^{(1)}(t_n), d_i^{(2)}(t_n), \dots, d_i^{(k)}(t_n)\} \quad (5.20)$$

oznacza zbiór wszystkich możliwych decyzji, które można zastosować w i -tym stanie procesu, w chwili t_n , gdzie $d_i^{(k)}(t_n)$ oznacza k -tą decyzję podejmowaną w i -tym stanie procesu, w chwili t_n .

W przypadku, gdy zadanie optymalizacyjne polega na wyborze optymalnej strategii sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych spośród strategii dopuszczalnych, wówczas jako strategię δ rozumie się ciąg, którego wyrazami są wektory, złożone z decyzji $d_i^{(k)}(t_n)$ podejmowanych w kolejnych chwilach t_n zmian stanów modelowanego procesu eksploatacji obiektów technicznych [56]:

$$\delta = \left\{ \left[d_1^{(k)}(t_n), d_2^{(k)}(t_n), \dots, d_m^{(k)}(t_n) \right] : n = 0, 1, 2, \dots \right\} \quad (5.21)$$

W przypadku stosowania decyzyjnych procesów semi-Markowa, podjęcie w chwili t_n , k -tej decyzji w i -tym stanie procesu, oznacza wybór i -tego wiersza jądra procesu, ze zbioru [56]:

$$\left\{ Q_{i,j}^{(k)}(t): t \geq 0, \quad d_i^{(k)}(t_n) \in D_i, \quad i, j \in S \right\} \quad (5.22)$$

gdzie:

$$Q_{i,j}^{(k)}(t) = p_{i,j}^{(k)} \cdot F_{i,j}^{(k)}(t) \quad (5.23)$$

Wybór i -tego wiersza jądra procesu wyznacza probabilistyczny mechanizm ewolucji procesu w przedziale czasu $\langle t_n; t_{n+1} \rangle$. Oznacza to, że dla procesu semi-markowskiego, w przypadku zmiany stanu procesu z dowolnego na i -ty (wejścia do i -tego stanu procesu) w chwili t_n , podejmowana jest decyzja $d_i^{(k)}(t_n) \in D_i$ oraz zgodnie z rozkładem $(p_{i,j}^{(k)}: j \in S)$ zostaje wygenerowany j -ty stan procesu, do którego następuje przejście w chwili t_{n+1} . Jednocześnie zgodnie z rozkładem określonym przez dystrybuantę $F_{i,j}^{(k)}(t)$, zostaje wygenerowana długość przedziału czasu $\langle t_n; t_{n+1} \rangle$ pozostawania w i -tym stanie procesu, gdy następnym stanem jest stan j -ty. [56]

Wybór właściwej strategii sterowania δ nazywanej strategią optymalną δ^* , dotyczy sytuacji, gdy funkcja (funkcje) stanowiąca kryterium wyboru strategii optymalnej przyjmuje wartość ekstremalną (minimalną lub maksymalną) [56]:

$$f_c(\delta^*) = \min_{\delta} [f_c(\delta)] \text{ lub } f_c(\delta^*) = \max_{\delta} [f_c(\delta)] \quad (5.24)$$

W pracy jako funkcje kryterialne zastosowano: ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych $r(\delta)$, wyznaczane dla pojedynczego obiektu technicznego (środka transportu) w przeliczeniu na jednostkę czasu w [PLN/h] oraz gotowość pojedynczego obiektu technicznego $G^{OT}(\delta)$ opisane odpowiednio wzorami 5.25 i 5.26. Dla analizowanego procesu eksploatacji autobusów miejskich ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych $r(\delta)$ [PLN/h] wyznaczane jest osobno dla każdego zdarzenia niepożądanego rozpatrywanego w pracy oraz jako ryzyko łączne wystąpienia poszczególnych zdarzeń niepożądanych.

$$f_{c_1}(\delta) = r(\delta) = \sum_{i \in S_N} c_i(\delta) \cdot p_i^*(\delta) = \frac{\sum_{i \in S_N} c_i(\delta) \cdot \pi_i \cdot \bar{\theta}_i(\delta)}{\sum_{i \in S} \pi_i \cdot \bar{\theta}_i(\delta)} \quad (5.25)$$

$$f_{c_2}(\delta) = G^{OT}(\delta) = \sum_{i \in S_G} p_i^*(\delta) = \frac{\sum_{i \in S_G} \pi_i \cdot \bar{\theta}_i(\delta)}{\sum_{i \in S} \pi_i \cdot \bar{\theta}_i(\delta)} \quad (5.26)$$

gdzie:

$S_N \subset S$ – zbiór stanów niepożądanych modelowanego procesu eksploatacji,

$S_G \subset S$ – zbiór stanów gotowości modelowanego procesu eksploatacji,

$c_i(\delta)$ – dochody jednostkowe generowane w stanach procesu $X(t)$, dla zastosowanej strategii δ ,

$p_i^*(\delta)$ – prawdopodobieństwa graniczne przebywania w stanach rozpatrywanego procesu $X(t)$, wyznaczone na podstawie twierdzenia granicznego dla procesów semimarkowskich, dla zastosowanej strategii δ :

$$p_i^*(\delta) = \frac{\pi_i \cdot \bar{\theta}_i(\delta)}{\sum_{i \in S} \pi_i \cdot \bar{\theta}_i(\delta)} \quad (5.27)$$

gdzie:

$\bar{\theta}_i(\delta)$ – wartości średnie bezwarunkowych czasów przebywania w stanach procesu, dla zastosowanej strategii δ ,
 π_i – prawdopodobieństwa rozkładu stacjonarnego włożonego w proces $X(t)$ łańcucha Markowa.

Wybór strategii optymalnej δ^* dokonywany jest na podstawie następujących kryteriów:

$$r(\delta^*) = \min_{\delta} [r(\delta)] \quad (5.28)$$

$$G^{OT}(\delta^*) = \max_{\delta} [G^{OT}(\delta)] \quad (5.29)$$

Dogodnym narzędziem wyboru optymalnej strategii δ^* sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych, na podstawie semi-markowskiego modelu tego procesu jest zastosowanie algorytmów wspomagających wybór optymalnego rozwiązania analizowanych problemów. W literaturze przedstawionych jest szereg metod wyznaczania optymalnych (quasi-optymalnych) strategii sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych. Dobór odpowiedniej metody optymalizacji jest zagadnieniem złożonym i trudnym. Wśród wielu metod optymalizacji zastosowanie znajdują metody niedeterministyczne, które wykorzystują w swych założeniach czynnik losowy. Do grupy tych metod należą między innymi: metody Monte Carlo, algorytmy ewolucyjne, genetyczne oraz symulowanego wyżarzania. Metody te umożliwiają rozpatrywanie (optymalizację) rzeczywistych problemów, w których funkcje celu posiadają liczne ekstrema lokalne, a znalezienie ekstremum globalnego, w przypadku stosowania metod deterministycznych jest bardzo trudne, a często wręcz niemożliwe [63].

Ze względu na bardzo dużą liczbę możliwych rozwiązań w złożonych problemach optymalizacji, najczęściej stosuje się algorytmy ewolucyjne jako narzędzie do poszukiwania rozwiązania optymalnego [63]. Wśród nich największą popularnością cieszą się algorytmy genetyczne, jako metoda rozwiązywania problemów wzorowana na naturalnej ewolucji oparta na mechanizmach doboru naturalnego, dziedziczenia i przetrwania osobników najlepiej przystosowanych. Algorytmom ewolucyjnym, w tym genetycznym poświęcono m.in. prace [8, 15, 46, 83].

Alternatywą dla grupy algorytmów ewolucyjnych w poszukiwaniu rozwiązań optymalnych jest algorytm symulowanego wyżarzania, będący narzędziem do poszukiwania rozwiązań problemów o przestrzeni rozwiązań, dla których wyznaczenie jednego dokładnego rozwiązania jest bardzo trudne lub nawet niemożliwe [85]. Algorytm ten nie wskazuje rozwiązania optymalnego, ale znajduje grupę bardzo dobrych rozwiązań w akceptowalnym czasie. Inspiracją do powstania algorytmu symulowanego wyżarzania była obserwacja zjawiska fizycznego jakim jest proces wyżarzania ciał stałych [39]. Podczas wyżarzania następuje stopniowe obniżanie temperatury, a cząsteczki ciała stałego oddając swoją energię tworzą coraz bardziej usystematyzowane struktury do chwili, gdy osiągnięte zostanie minimum energii. W kontekście optymalizacji proces ten odpowiada stopniowemu znajdowaniu dobrych rozwiązań przez algorytm, gdzie parametrem mającym wpływ na wybór rozwiązania jest temperatura. Im wyższa temperatura, tym większe jest prawdopodobieństwo wyboru gorszego rozwiązania [39, 63, 111].

Algorytm symulowanego wyżarzania obejmuje trzy kroki. Po pierwsze należy zidentyfikować funkcję celu odpowiadającą funkcji energii. Drugim krokiem jest dobór odpowiedniego schematu wyżarzania polegającego na zmniejszaniu temperatury wraz ze wzrostem iteracji. Harmonogram chłodzenia powinien składać się z temperatury początkowej, funkcji obniżania temperatury, długości łańcucha Markowa i warunków zakończenia. Jednym z najczęściej stosowanych w literaturze jest harmonogram chłodzenia opisany wzorem aktualizacji temperatury 5.30 [39, 63, 111, 112].

$$T_{k+1} = aT_k \quad (5.30)$$

gdzie:

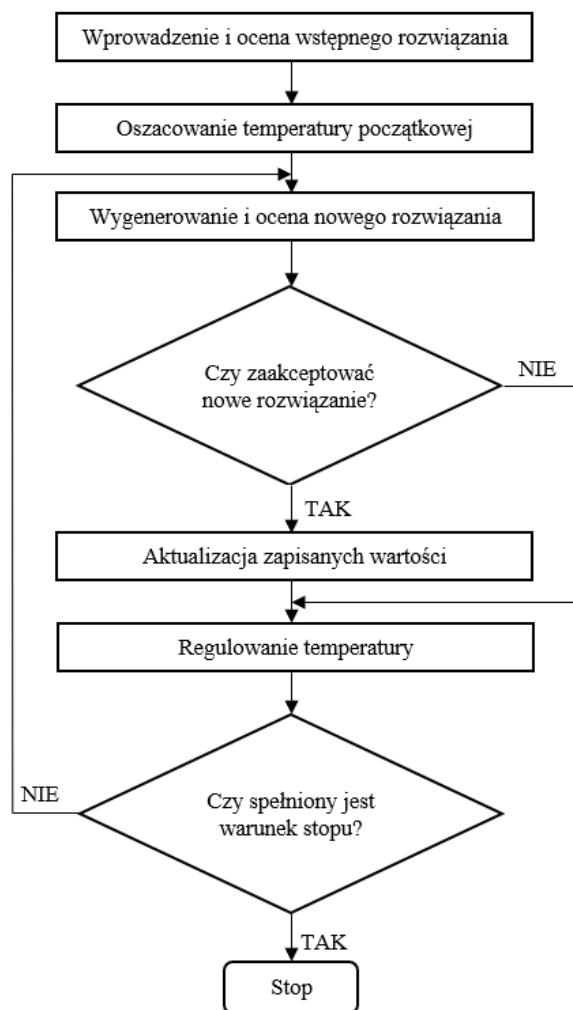
- T_k – wartość temperatury początkowej,
- T_{k+1} – zaktualizowana wartość temperatury (obniżona),
- a – współczynnik chłodzenia.

Typowe wartości współczynnika chłodzenia a dla umiarkowanie wolnych szybkości chłodzenia wynoszą od 0,8 do 0,99. Powyższe równanie stanowi podstawę do porównania z innymi bardziej rozbudowanymi harmonogramami chłodzenia [112]. Dla każdej temperatury przewiduje się określoną liczbę iteracji, czyli powtórzenia określoną liczbę razy czynności poszukiwania najlepszego rozwiązania. Liczba ta może być stała dla wszystkich temperatur [111].

W ostatnim etapie należy ustalić metodę generowania „sąsiada” czyli nowego położenia znajdującego się w pobliżu aktualnej pozycji wyszukiwania [63, 111, 112]. W literaturze istnieją trzy sposoby poszukiwania sąsiedniego rozwiązania: poprzez zastosowanie operatorów: odwrócenia, wstawienia lub zamiany (inverse, insert, swap) dla wybranych dwóch pozycji. Operatory te zdefiniowano w pracy [112].

Prawidłowe określenie funkcji celu, ustalenie harmonogramu obniżania temperatury i zasady poszukiwania sąsiedniego rozwiązania oraz poprawne

wprowadzenie danych umożliwia rozpoczęcie działania algorytmu symulowanego wyżarzania. Ogólny schemat blokowy algorytmu symulowanego wyżarzania przedstawiono na rysunku 5.1. [104]



Rys 5.1. Ogólny schemat blokowy algorytmu symulowanego wyżarzania [104]

Działanie algorytmu symulowanego wyżarzania zaczyna się od wprowadzenia rozwiązania początkowego, sprawdzenia jego wykonalności i obliczenia funkcji celu. Następnie ustalany jest harmonogram obniżania temperatury. W kolejnym etapie generowane jest rozwiązanie kandydujące (aspirujące do miana rozwiązania lepszego) z sąsiedztwa (losowo lub przy użyciu określonej z góry reguły – odwrócenia, wstawienia lub zamiany). Dla nowego rozwiązania weryfikowana jest jego akceptowalność. W przypadku

zaakceptowania nowego rozwiązania nowe wartości zostają zapisane jako aktualne. W następnym kroku następuje regulowanie temperatury. W sytuacji braku akceptacji nowego rozwiązania następuje bezpośrednie przejście do regulowania temperatury. W kolejnym etapie sprawdza się czy osiągnięto przyjęte minimum energii, czyli czy temperatura została obniżona do poziomu oznaczającego zakończenie działania algorytmu. Gdy warunek zatrzymania nie zostanie osiągnięty następuje powrót do etapu generowania i oceny nowego rozwiązania. Jeżeli osiągnięto założony minimalny poziom temperatury to następuje zatrzymanie wyszukiwania kolejnych rozwiązań. Zasadę działania algorytmu symulowanego wyżarzania oraz przykłady jego zastosowania przedstawiono w pracach [4, 63, 85, 111, 112].

Nie istnieje uniwersalna reguła działania algorytmu, która byłaby dopasowana do wszystkich problemów decyzyjnych oraz nie ma ogólnego sposobu na znalezienie zbioru optymalnych rozwiązań dla rozpatrywanego problemu [112]. Znalezienie najlepszego zbioru dobrych rozwiązań spośród rozwiązań wytypowanych w ramach procedury działania algorytmu w problemach optymalizacji wielokryterialnej może być realizowane za pomocą narzędzia jakim jest front Pareto. Front Pareto stanowi zbiór rozwiązań optymalnych w sensie Pareto, czyli zbiór niezdominowanych rozwiązań całej dopuszczalnej przestrzeni poszukiwań. Pod pojęciem rozwiązania niezdominowanego rozumie się takie rozwiązanie, dla którego przynajmniej jedna z funkcji kryterialnych osiąga wartość „lepszą” w odniesieniu do pozostałych rozwiązań w zadaniu optymalizacji (wyższą w przypadku maksymalizacji lub niższą w przypadku minimalizacji). Oznacza to, że rozwiązania z tego zbioru nie są zdominowane przez żadne inne, więc w tym sensie są one optymalnymi rozwiązaniami dla problemu optymalizacji wielokryterialnej. Zastosowanie algorytmu symulowanego wyżarzania wraz z zastosowaniem frontu Pareto umożliwia uzyskanie wysokiej precyzji znalezienia zbioru najlepszych rozwiązań z punktu widzenia analizowanych kryteriów oceny. Decyzję o wyborze tylko jednego z możliwych rozwiązań, czyli wyborze jednego spośród rozwiązań leżących na froncie Pareto podejmuje decydent na podstawie dodatkowych przesłanek. W przypadku większości problemów wielokryterialnych istnieje zestaw niezdominowanych rozwiązań, które mają wzajemny stosunek kompromisowy, a jednego z wielu kryteriów każdego rozwiązania nie można ulepszyć bez poświęcenia któregoś z pozostałych. Ta koncepcja jest znana jako zasada optymalności Pareto. [15, 63]

W pracy doktorskiej do wyznaczania racjonalnych (suboptymalnych) strategii sterowania procesem eksploatacji δ^* , zastosowano algorytm symulowanego wyżarzania oraz front Pareto. W celu wyznaczenia strategii sterowania δ^* , przyjęto następujące założenia:

- badany model procesu eksploatacji obiektów technicznych jest m -stanowym procesem stochastycznym,
- jeśli w każdym stanie modelu procesu eksploatacji rozpatrywane są dwie decyzje, oznaczone jako 0 i 1, to liczba możliwych do zastosowania strategii

- sterowania, dla m -stanowego modelu procesu eksploatacji obiektów technicznych, wynosi 2^m ,
- zbiór strategii sterowania jest zbiorem funkcji $\delta: S \rightarrow D$.

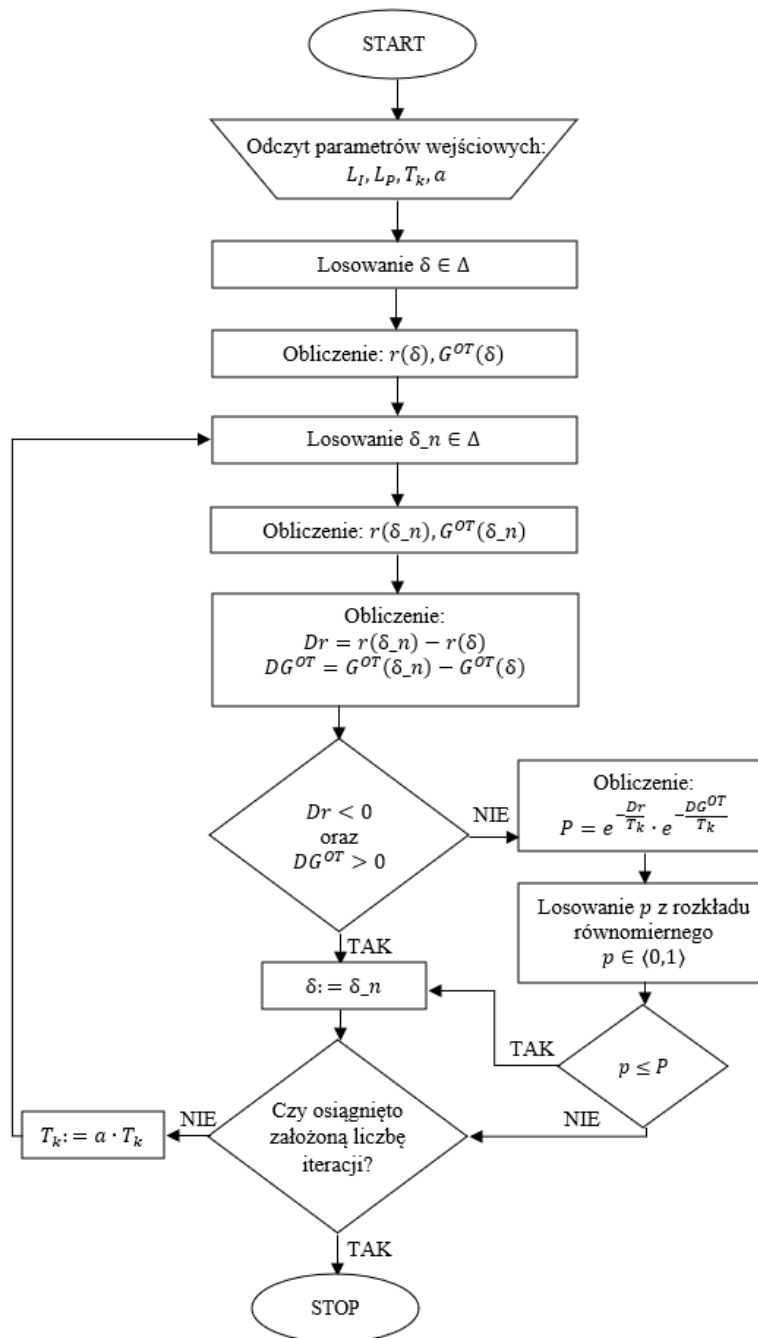
Na podstawie powyższych założeń, każdą możliwą strategię sterowania δ można przedstawić jako m -pozycyjny ciąg złożony z 0 i 1, wówczas przykładowa strategia sterowania dla $m = 21$ -stanowego modelu procesu eksploatacji, jest określona następująco: $\delta = [1,1,0,1,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0]$. Dla modelu 21-stanowego liczba możliwych strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu wynosi $2^{21} = 2\,097\,152$.

W celu wyznaczenia optymalnych (suboptymalnych) strategii sterowania δ^* określono dwie funkcje kryterialne: funkcję ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych $r(\delta)$ oraz funkcję gotowości pojedynczego obiektu technicznego $G^{OT}(\delta)$. Rozpatrywany problem decyzyjny polega na znalezieniu takich strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu, dla których punkty określone jako $(r(\delta), G^{OT}(\delta))$ nie będą zdominowane. Punkt w przestrzeni wartości funkcji ryzyka i gotowości nie jest zdominowany, jeżeli nie istnieje taki punkt, dla którego wartość funkcji ryzyka byłaby mniejsza i jednocześnie wartość funkcji gotowości byłaby większa od wartości tych funkcji dla rozpatrywanego punktu.

Model decyzyjny wyznaczania optymalnych (suboptymalnych) strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu opracowano w programie komputerowym napisanym w języku programowania Phyton z zastosowaniem algorytmu symulowanego wyżarzania. Danymi wejściowymi do modelu są:

- liczba iteracji L_I ,
- liczebność populacji L_P ,
- temperatura początkowa T_k ,
- współczynnik chłodzenia a .

Na rysunku 5.2 przedstawiono schemat blokowy algorytmu symulowanego wyżarzania wyznaczania strategii sterowania δ dla zastosowanych dwóch funkcji kryterialnych: ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych i gotowości pojedynczego obiektu technicznego.



Rys 5.2. Schemat blokowy algorytmu symulowanego wyżarzania wyznaczania strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu δ , dla zastosowanych dwóch funkcji kryterialnych: ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych i gotowości pojedynczego obiektu technicznego

Schemat blokowy algorytmu symulowanego wyżarzania wyznaczania strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu, przedstawiony na rysunku 5.2, opisano poniżej w następujących krokach:

1. Ustalenie wartości parametrów wejściowych:
 - liczby iteracji L_I ,
 - liczebności populacji L_P ,
 - temperatury początkowej T_k ,
 - współczynnika chłodzenia a .
2. Wybór losowy strategii początkowej δ .
3. Obliczenie wartości funkcji kryterialnych dla strategii początkowej $r(\delta)$ oraz $G^{OT}(\delta)$.
4. Wybór następnej strategii δ_n z sąsiedztwa strategii δ .
5. Obliczenie wartości funkcji kryterialnych dla strategii δ_n : $r(\delta_n)$ oraz $G^{OT}(\delta_n)$.
6. Obliczenie różnicy wartości funkcji kryterialnych dla nowej i początkowej strategii: $Dr = r(\delta_n) - r(\delta)$ oraz $DG^{OT} = G^{OT}(\delta_n) - G^{OT}(\delta)$.
7. Jeśli zachodzą związki $Dr < 0$ oraz $DG^{OT} > 0$, to $\delta := \delta_n$, co oznacza, że δ_n zostaje zapisana do pliku wyników jako nowa strategia i następuje przejście do kroku 4. po dokonaniu regulacji temperatury $T_k := a \cdot T_k$. W przeciwnym przypadku następuje:
 - a. Obliczenie wartości $P = e^{-\frac{Dr}{T_k}} \cdot e^{-\frac{DG^{OT}}{T_k}}$.
 - b. Wybranie wartości p z rozkładu równomiernego z przedziału $\langle 0, 1 \rangle$.
 - c. Jeśli $p \leq P$ następuje powrót do kroku 4.
8. Jeśli nowa strategia została zaakceptowana, to następuje zapis kolejnego wiersza do pliku wyników: $\delta, r(\delta), G^{OT}(\delta)$.
9. Regulowanie temperatury $T_k := a \cdot T_k$.
10. Jeśli licznik iteracji osiągnął wartość równą założonej liczbie iteracji, to obliczenia zostają zakończone. W przeciwnym przypadku następuje przejście do kroku 4.

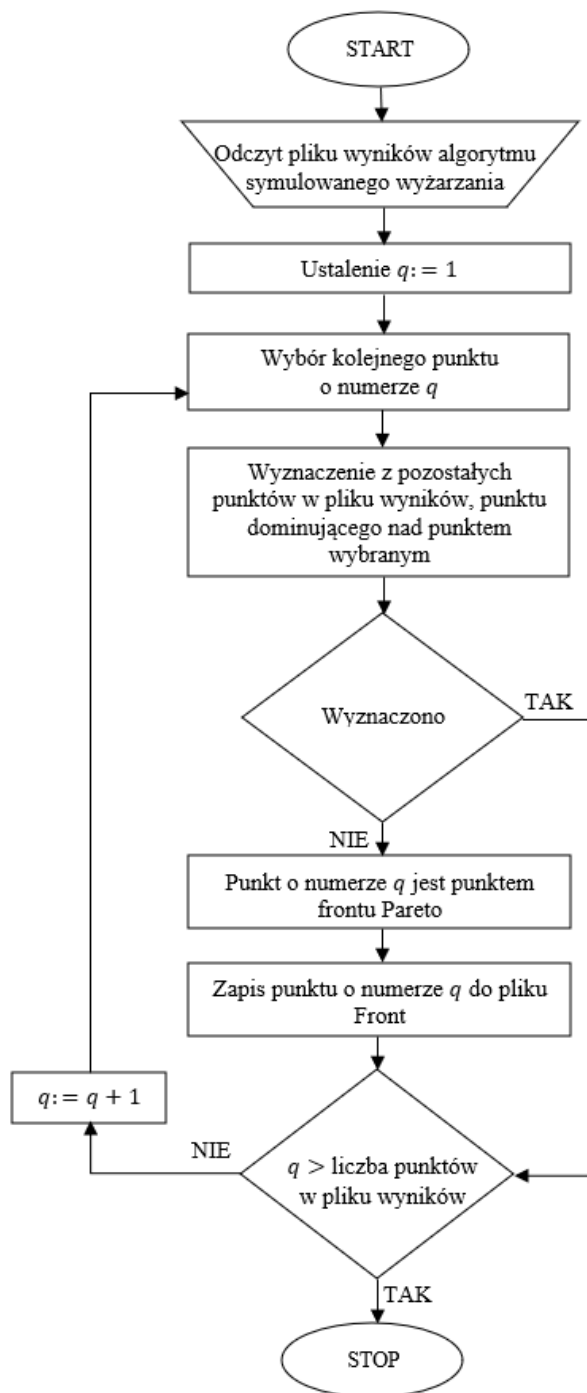
Efektom działania algorytmu symulowanego wyżarzania opisanego powyżej jest zbiór wierszy, zapisany w pliku tekstowym, w którym każdy z wierszy zawiera strategię sterowania procesem eksploatacji środków transportu δ (przedstawioną jako 21-pozycyjny wektor binarny) oraz wartości funkcji kryterialnych $r(\delta)$ i $G^{OT}(\delta)$. Wybór wierszy stanowiących suboptymalne strategie sterowania δ^* realizowany jest w wyniku wyznaczenia tylko tych strategii sterowania, które odpowiadają punktom leżącym na froncie Pareto wykresu Ryzyko-Gotowość. Wyznaczenie suboptymalnych strategii sterowania δ^* (punktów wykresu Ryzyko-Gotowość należących do frontu Pareto) odbywa się przez realizację następujących kroków:

1. Wybór strategii sterowania δ ze zbioru strategii sterowania wyznaczonych za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania (wiersza ze zbioru wierszy pliku wyników stanowiących strategię sterowania).
2. Porównanie wartości funkcji kryterialnych wybranej strategii sterowania δ względem pozostałych strategii sterowania ze zbioru wyznaczonego za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania.
3. Jeśli w wyniku realizacji kroku 2. okaże się, że nie istnieje strategia sterowania δ (wiersz pliku wyników), dla której $r(\delta)$ ma wartość mniejszą lub $G^{OT}(\delta)$ ma wartość większą niż dla wybranej strategii δ , to wybrana strategia sterowania jest strategią optymalną δ^* w sensie Pareto (punktem niezdominowanym wykresu Ryzyko-Gotowość należącym do frontu Pareto). W przeciwnym przypadku wybrana strategia sterowania δ (punkt wykresu Ryzyko-Gotowość) jest strategią (punktem) zdominowaną i nie należy do frontu Pareto.
4. Kroki 1, 2 i 3 realizuje się dla wszystkich strategii sterowania δ ze zbioru wyznaczonego za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania (wierszy pliku wyników).

Wynikiem powyższego działania jest uzyskanie zbioru suboptymalnych strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu δ^* (pliku z wierszami, które opisują punkty niezdominowane wykresu Ryzyko-Gotowość, stanowiące front Pareto rozwiązań suboptymalnych). Schemat blokowy wyznaczania zbioru suboptymalnych strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu δ^* przedstawiono na rysunku 5.3.

Opracowanie programu komputerowego z zastosowaniem algorytmu symulowanego wyżarzania oraz frontu Pareto umożliwia wyznaczenie „prawie najlepszych” (suboptymalnych) strategii sterowania procesem eksploatacji δ^* , z punktu widzenia rozpatrywanych kryteriów oceny: ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości obiektów technicznych (środków transportu) do realizacji przydzielonych zadań przewozowych. Wyznaczone strategię δ zostaną przedstawione graficznie w postaci wykresu, na którym każdą ze strategii oznacza się za pomocą punktu. Osie wykresu stanowią funkcje kryterialne (badane kryteria oceny: Ryzyko-Gotowość).

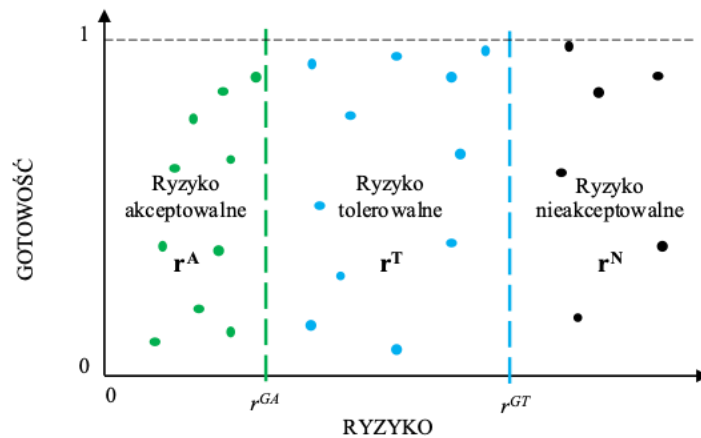
Poniżej na rysunkach od 5.4 do 5.6, przedstawiono w sposób graficzny kolejne etapy wyboru racjonalnych (suboptymalnych) strategii sterowania procesem eksploatacji δ^* , ze względu na przyjęte wymagane (dopuszczalne) poziomy ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości środków transportu do realizacji przydzielonych zadań przewozowych. Na rysunkach 5.4 - 5.6 liniami przerywanymi zaznaczono wartości graniczne obszarów: kategorii ryzyka akceptowalnego (górną granicę r^{GA} – kolor zielony) oraz kategorii ryzyka tolerowalnego (górną granicę r^{GT} – kolor niebieski). Taki sposób podziału umożliwił wyodrębnienie na wykresie trzech obszarów odpowiadających rozpatrywanym w pracy kategoriom ryzyka akceptowalnego, ryzyka tolerowalnego oraz ryzyka nieakceptowalnego.



Rys 5.3. Schemat blokowy wyznaczania suboptymalnych strategii sterowania procesem eksploatacji δ^* przy zastosowaniu frontu Pareto

Na rysunku 5.4 zostały przedstawione wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania strategii sterowania δ , z podziałem ze względu na trzy kategorie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych:

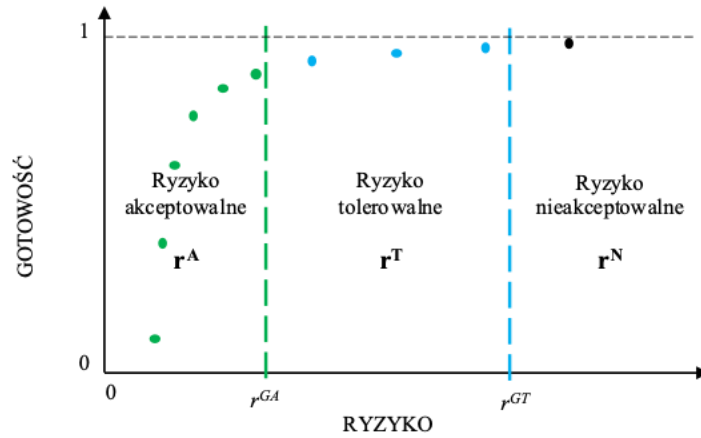
- a) ryzyko akceptowalne – strategie (punkty) oznaczone kolorem zielonym,
- b) ryzyko tolerowalne – strategie (punkty) oznaczone kolorem niebieskim,
- c) ryzyko nieakceptowalne – strategie (punkty) oznaczone kolorem czarnym.



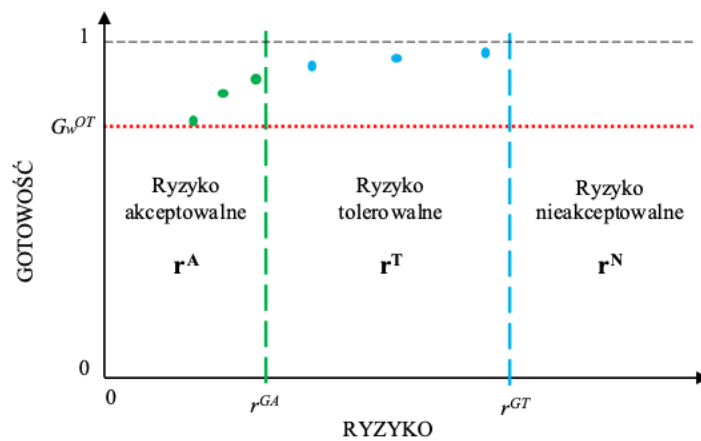
Rys 5.4. Podział wyznaczonych za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania strategii sterowania δ ze względu na kryterium ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych (ze względu na kategorie ryzyka)

Na rysunku 5.5 spośród strategii sterowania δ (przedstawionych na rysunku 5.4) zostały wyznaczone jedynie te strategie sterowania (strategie suboptymalne δ^*), które ze względu na rozpatrywane kryteria oceny: ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowość obiektów technicznych do realizacji przydzielonych zadań przewozowych znajdują się na tzw. froncie Pareto (należą do zbioru rozwiązań niezdominowanych – zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto).

Na rysunku 5.6 linią wykropkowaną (kolor czerwony) zaznaczono wartość wymaganej gotowości obiektów technicznych (środków transportu) do realizacji przydzielonych zadań przewozowych G_w^{OT} . Taki sposób podziału docelowo umożliwił wyodrębnienie sześciu obszarów na wykresie, ze względu na rozpatrywane w pracy trzy kategorie ryzyka oraz wartość gotowości obiektów technicznych wymaganą do zapewnienia prawidłowej realizacji przydzielonych zadań przewozowych.



Rys 5.5. Wyznaczenie suboptymalnych strategii sterowania procesem eksploatacji δ^* z zastosowaniem frontu Pareto, dla dwóch rozpatrywanych kryteriów oceny: ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości obiektów technicznych



Rys 5.6. Wybór racjonalnych (suboptymalnych) strategii sterowania procesem eksploatacji δ^* , dla których ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych należy do kategorii ryzyka akceptowalnego lub kategorii ryzyka tolerowalnego oraz gotowość rzeczywista obiektów technicznych jest wyższa niż gotowość wymagana do realizacji przydzielonych zadań przewozowych

Spośród wyznaczonego zbioru optymalnych (suboptymalnych) strategii sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych δ^* , na wykresie istotne z punktu widzenia celu opracowania i zastosowania wyników badań decyzyjnego modelu sterowania procesem eksploatacji są wyłącznie te obszary, w których ryzyko osiąga co najmniej poziom tolerowalny oraz gotowość rzeczywista

obiektów technicznych, przy zastosowaniu danej strategii sterowania δ^* jest wyższa lub równa wyznaczonej gotowości wymaganej do prawidłowej realizacji przydzielonych zadań.

Wyodrębnienie sześciu istotnych obszarów na wykresie Ryzyko-Gotowość przez wyznaczenie granicznych wartości rozpatrywanych charakterystyk (górnej granicy obszaru kategorii ryzyka akceptowalnego, górnej granicy obszaru kategorii ryzyka tolerowalnego oraz wymaganego poziomu gotowości środków transportu) oraz zastosowanie zasady optymalności Pareto, umożliwia wybór od kilku do kilkunastu „najlepszych” w sensie Pareto strategii sterowania rozpatrywanym procesem eksploatacji środków transportu. Wyniki badań na przykładzie analizowanego rzeczywistego systemu eksploatacji środków transportu (autobusów miejskich) zostały przedstawione w rozdziale 6.

6. WYNIKI BADAŃ RYZYKA WYSTĄPIENIA ZDARZEŃ NIEPOŻĄDANYCH W SYSTEMIE EKSPLOATACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU I WERYFIKACJA OPRACOWANYCH MODELI

W pracy przedstawiono opracowaną metodę oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu oraz zaproponowano możliwość jej zastosowania do wyznaczania strategii sterowania procesem eksploatacji w systemie eksploatacji autobusów miejskich na przykładzie rzeczywistego systemu transportowego realizującego przewozy pasażerów w wybranej aglomeracji miejskiej.

Semimarkowskie modele procesu eksploatacji autobusów miejskich (modele matematyczny oraz decyzyjny) przedstawione w pracy zostały opracowane dla danych eksploatacyjnych uzyskanych z rzeczywistego systemu eksploatacji środków transportu (autobusów komunikacji miejskiej), na podstawie 21-stanowego grafu stanów modelu procesu eksploatacji realizowanego w analizowanym systemie. W celu wyznaczenia rozpatrywanych charakterystyk: ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości środków transportu do realizacji przydzielonych zadań przewozowych, w dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki badań charakteryzujące analizowany proces eksploatacji:

- prawdopodobieństwa zmian stanów procesu eksploatacji,
- wartości średnie czasów pozostawania w stanach procesu eksploatacji w [h],
- wartości średnie jednostkowych dochodów (kosztów) generowanych w stanach procesu eksploatacji, wyznaczone w przeliczeniu na jeden obiekt techniczny (autobus miejski), w [PLN/h],
- prawdopodobieństwa graniczne włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa,
- prawdopodobieństwa graniczne procesu semi-Markowa $X(t)$.

W kolejnym etapie przedstawiono wyznaczone wartości ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w badanym systemie eksploatacji środków transportu dla każdego analizowanego rodzaju ryzyka, a następnie na podstawie opracowanej i przedstawionej w rozdziale 4 metody oceny ryzyka dokonano jego ewaluacji (oceniono, czy wyznaczone wartości ryzyka są akceptowalne, tolerowalne czy nieakceptowalne).

Dla zaprezentowania możliwości zastosowania opracowanej metody oceny ryzyka zbudowano semimarkowski model decyzyjny sterowania procesem eksploatacji, a następnie zrealizowano badania z zastosowaniem tego modelu, w tym:

- określono możliwe decyzje podejmowane w decyzyjnych stanach modelu procesu eksploatacji $X(t)$,
- dla każdej z decyzji wyznaczono bezwarunkowe czasy i jednostkowe dochody (koszty) generowane w stanach modelu procesu eksploatacji $X(t)$,

- oszacowano wartości ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w badanym systemie eksploatacji (dla każdego rozpatrywanego w pracy rodzaju ryzyka),
- oszacowano wartości gotowości rzeczywistej i gotowości wymaganej do realizacji przydzielonych zadań przewozowych dla pojedynczego obiektu technicznego (autobusu miejskiego) oraz dla rozpatrywanego systemu eksploatacji środków transportu,
- wyznaczono racjonalne (suboptymalne) strategie sterowania procesem eksploatacji środków transportu δ^* , ze względu na rozpatrywane kryteria oceny: ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowość środków transportu do realizacji przydzielonych zadań przewozowych.

Wyniki obliczeń dotyczących wyznaczenia optymalnych (w sensie Pareto) strategii sterowania procesem eksploatacji przy uwzględnieniu ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz zapewnieniu odpowiednio wysokiego poziomu gotowości środków transportu przedstawiono na rysunkach od 6.1 do 6.12 oraz w tabelach od 6.12 do 6.17.

6.1. WYNIKI BADAŃ SEMIMARKOWSKIEGO MODELU PROCESU EKSPLOATACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU

Na podstawie informacji źródłowych oraz danych eksploatacyjnych pozyskanych z badań rozpatrywanego systemu eksploatacji środków transportu oszacowano wartości liczbowe parametrów wejściowych charakteryzujących rozpatrywany proces eksploatacji autobusów miejskich, a następnie wyznaczono:

Wartości macierzy P prawdopodobieństw zmian stanów włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa

Wartości prawdopodobieństw zmian stanów włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa zostały wyznaczone dla grafu stanów modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich, przedstawionego w rozdziale 3 (rys. 3.4). Wartości macierzy P przedstawiono poniżej:

Wartości średnie bezwarunkowych czasów $\bar{\theta}_i$ przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$

Wartości średnie bezwarunkowych czasów $\bar{\theta}_i$ przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$ wyrażono w [h] i przedstawiono w tabeli 6.1.

Tab. 6.1. Wartości średnie bezwarunkowych czasów $\bar{\theta}_i$ przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$

$\bar{\theta}_1$	$\bar{\theta}_2$	$\bar{\theta}_3$	$\bar{\theta}_4$	$\bar{\theta}_5$	$\bar{\theta}_6$	$\bar{\theta}_7$
5,45	3,90	0,43	0,21	4,40	0,05	0,12
$\bar{\theta}_8$	$\bar{\theta}_9$	$\bar{\theta}_{10}$	$\bar{\theta}_{11}$	$\bar{\theta}_{12}$	$\bar{\theta}_{13}$	$\bar{\theta}_{14}$
0,17	0,59	0,59	0,83	2,87	0,55	1,73
$\bar{\theta}_{15}$	$\bar{\theta}_{16}$	$\bar{\theta}_{17}$	$\bar{\theta}_{18}$	$\bar{\theta}_{19}$	$\bar{\theta}_{20}$	$\bar{\theta}_{21}$
0,52	2,43	44,38	0,83	2880,00	3,62	0,55

Następnie na podstawie danych przedstawionych w macierzy P prawdopodobieństw zmian stanów włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa oraz w tabeli 6.1, dla opracowanego matematycznego modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich przedstawionego w rozdziale 4.1.3.1, wyznaczono:

- wartości prawdopodobieństw granicznych π_i włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa,
- wartości prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$.

Otrzymane wyniki przedstawiono poniżej, odpowiednio w tabelach 6.2 oraz 6.3.

Wartości prawdopodobieństw granicznych π_i włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa

Wartości prawdopodobieństw granicznych π_i włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa, wyznaczone na podstawie opracowanych w rozdziale 4 wzorów 4.13 - 4.16, przedstawiono w tabeli 6.2.

Tab. 6.2. Wartości prawdopodobieństw granicznych π_i włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa

π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7
0,1251	0,2620	0,2389	0,1243	0,0010	0,0263	0,0249
π_8	π_9	π_{10}	π_{11}	π_{12}	π_{13}	π_{14}
0,0187	0,0044	0,0044	0,0032	0,0033	0,0006	0,1117
π_{15}	π_{16}	π_{17}	π_{18}	π_{19}	π_{20}	π_{21}
0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	2,494E-06	0,0403	0,0091

Wartości prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$

Wartości prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$, wyznaczone na podstawie opracowanych w rozdziale 4 wzorów 4.26 i 4.27, przedstawiono w tabeli 6.3.

Tab. 6.3. Wartości prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$

p_1^*	p_2^*	p_3^*	p_4^*	p_5^*	p_6^*	p_7^*
0,2946	0,4981	0,0439	0,0091	0,0015	0,0006	0,0006
p_8^*	p_9^*	p_{10}^*	p_{11}^*	p_{12}^*	p_{13}^*	p_{14}^*
0,0007	0,0009	0,0011	0,0008	0,0030	0,0001	0,0821
p_{15}^*	p_{16}^*	p_{17}^*	p_{18}^*	p_{19}^*	p_{20}^*	p_{21}^*
0,0001	0,0004	0,0080	0,0001	0,0021	0,0505	0,0015

6.2. WYNIKI OCENY RYZYKA WYSTĄPIENIA ZDARZEŃ NIEPOŻĄDANYCH W BADANYM SYSTEMIE EKSPLOATACJI

Na podstawie opracowanej w pracy metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w analizowanym systemie eksploatacji autobusów miejskich, dla danych rzeczywistych przedstawionych w rozdziale 6.1 oraz w tabeli 6.4, oszacowano wartości ryzyka wystąpienia rozpatrywanych w pracy zdarzeń niepożądanych $z \in \{A, B, C, D, E\}$ oraz wartość ryzyka łącznego, zgodnie z wzorami 4.40 i 4.41 (wyniki przedstawiono w tabeli 6.7). W kolejnym etapie, dla wyznaczonych wartości granicznych: ryzyka akceptowalnego (górnej granicy r^{GA} obszaru kategorii ryzyka akceptowalnego) oraz ryzyka tolerowalnego (górnej granicy r^{GT} obszaru kategorii ryzyka tolerowalnego), określono zakresy wartości rozpatrywanych trzech kategorii ryzyka (akceptowalnego, tolerowalnego, nieakceptowalnego), które przedstawiono w tabelach 6.5 oraz 6.6.

W przypadku rozpatrywania ryzyka łącznego r_z , wartości $r^{GA} = r_z^{GA}$ oraz $r^{GT} = r_z^{GT}$ zostały wyznaczone na podstawie wyników badań semi-markowskiego modelu procesu eksploatacji środków transportu oraz przyjętych założeń dotyczących dochodu D^{OT} generowanego w systemie eksploatacji środków transportu, przedstawionych w rozdziale 4.2 oraz wzorów 4.47 i 4.48. W przypadku rozpatrywania poszczególnych (pięciu) rodzajów ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych r_z , $z \in \{A, B, C, D, E\}$, wartości graniczne wynoszą odpowiednio; $r_z^{GA} = 0,2 \cdot r_z^{GA}$ oraz $r_z^{GT} = 0,2 \cdot r_z^{GT}$.

Poniżej w tabeli 6.4 przedstawiono wartości średnie jednostkowych dochodów c_i generowanych w stanach modelu procesu eksploatacji $X(t)$, przypadające w jednostce czasu na jeden obiekt techniczny (autobus miejski), wyznaczone w [PLN/h].

Tab. 6.4. Wartości średnie jednostkowych dochodów c_i [PLN/h], generowanych w stanach modelu procesu eksploatacji $X(t)$

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
-13,61	53,00	-39,36	-328,62	-240,69	-44,31	-102,15
c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}
-319,13	-300,89	-118,02	-146,28	-241,16	-139,91	-13,61
c_{15}	c_{16}	c_{17}	c_{18}	c_{19}	c_{20}	c_{21}
-44,31	-251,54	-265,71	-145,37	-603,74	-131,66	-139,91

Tab. 6.5. Zakresy wartości rozpatrywanych kategorii ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w analizowanym systemie eksploatacji autobusów miejskich – dla ryzyka $r_z, z \in \{A, B, C, D, E\}$

Kryterium oceny ryzyka	Zakres wartości kategorii ryzyka [PLN/h]	Kategoria ryzyka
$r_z \leq r_z^{GA}$	$r_z \leq 1,25$	ryzyko akceptowalne
$r_z^{GA} < r_z \leq r_z^{GT}$	$1,25 < r_z \leq 1,33$	ryzyko tolerowalne
$r_z > r_z^{GT}$	$r_z > 1,33$	ryzyko nieakceptowalne

Tab. 6.6. Zakresy wartości rozpatrywanych kategorii ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w analizowanym systemie eksploatacji autobusów miejskich – dla ryzyka łącznego r_Σ

Kryterium oceny ryzyka	Zakres wartości kategorii ryzyka [PLN/h]	Kategoria ryzyka
$r_\Sigma \leq r_\Sigma^{GA}$	$r_\Sigma \leq 6,26$	ryzyko akceptowalne
$r_\Sigma^{GA} < r_\Sigma \leq r_\Sigma^{GT}$	$6,26 < r_\Sigma \leq 6,66$	ryzyko tolerowalne
$r_\Sigma > r_\Sigma^{GT}$	$r_\Sigma > 6,66$	ryzyko nieakceptowalne

Następnie dla wyznaczonych wartości ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w analizowanym systemie eksploatacji autobusów miejskich, uwzględniając zakresy wartości rozpatrywanych kategorii ryzyka (tabele 6.5 oraz 6.6), dokonano oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych. Wyniki oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w analizowanym systemie eksploatacji autobusów miejskich przedstawiono w tabeli 6.7.

Tab. 6.7. Wartości w [PLN/h] i ocena ryzyka wystąpienia poszczególnych zdarzeń niepożądanych w analizowanym systemie eksploatacji autobusów miejskich

Zdarzenia niepożądane	Wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia niepożądanego	Kategoria ryzyka wystąpienia zdarzenia niepożądanego
A	$r_A = 0,54$	ryzyko akceptowalne
B	$r_B = 0,49$	ryzyko akceptowalne
C	$r_C = 1,16$	ryzyko akceptowalne

cd. tab. 6.7. Wartości w [PLN/h] i ocena ryzyka wystąpienia poszczególnych zdarzeń niepożądanych w analizowanym systemie eksploatacji autobusów miejskich

D	$r_D = 2,60$	ryzyko nieakceptowalne
E	$r_E = 1,84$	ryzyko nieakceptowalne
Σ	$r_\Sigma = 6,62$	ryzyko tolerowalne

6.3. WYZNACZENIE STRATEGII STEROWANIA PROCESEM EKSPLOATACJI NA PODSTAWIE WYNIKÓW OCENY RYZYKA ORAZ GOTOWOŚCI ŚRODKÓW TRANSPORTU

Poniżej przedstawiono wyniki badań dwukryterialnego semimarkowskiego modelu decyzyjnego, w którym wyznaczenie racjonalnej (suboptymalnej) strategii sterowania procesem eksploatacji realizowane jest z uwzględnieniem dwóch kryteriów oceny: ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości środków transportu (autobusów miejskich) do realizacji przydzielonych zadań przewozowych.

6.3.1. Wartości gotowości rzeczywistej i gotowości wymaganej środków transportu

Dla rozpatrywanego systemu eksploatacji środków transportu wyznaczono wartości gotowości rzeczywistej pojedynczego obiektu technicznego (autobusu miejskiego), gotowości rzeczywistej systemu eksploatacji, a także wartości gotowości wymaganej pojedynczego autobusu miejskiego oraz systemu eksploatacji do realizacji przydzielonych zadań przewozowych, w przypadku, gdy w systemie eksploatowanych jest 149 autobusów miejskich.

Gotowość rzeczywistą pojedynczego obiektu technicznego (autobusu miejskiego) do realizacji przydzielonych zadań przewozowych wyliczono, dla danych eksploatacyjnych pozyskanych z rzeczywistego systemu eksploatacji autobusów miejskich, na podstawie wzorów 5.3 oraz 5.4 przedstawionego w rozdziale 5, jako sumę prawdopodobieństw granicznych przebywania w stanach semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji $X(t)$ należących do zbioru stanów gotowości S_G . W rozpatrywanym modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich do zbioru stanów gotowości należą cztery stany: 1, 2, 10 oraz 14. Wynik przedstawiono w tabeli 6.8.

Tab. 6.8. Wartość prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach modelu procesu eksploatacji $X(t)$ należących do zbioru stanów gotowości

Stan modelu procesu eksploatacji	Wartość p_i^*
1 - postój na placu zajezdni autobusowej,	0,2946
2 - realizacja zadania przewozowego,	0,4981
10 - oczekiwanie na realizację zadania przewozowego,	0,0011
14 - oczekiwanie na przydzielenie zadania przewozowego.	0,0821

Uwzględniając wartości przedstawione w tabeli 6.8, gotowość rzeczywista pojedynczego obiektu technicznego (autobusu miejskiego) wynosi:

$$G^{OT} = \sum_{i \in S_G} p_i^* = p_1^* + p_2^* + p_{10}^* + p_{14}^* = 0,8759$$

Dla wyznaczonej powyżej wartości gotowości rzeczywistej pojedynczego obiektu technicznego, na podstawie wzoru 5.5 przedstawionego w rozdziale 5 wyliczono wartość gotowości rzeczywistej dla rozpatrywanego systemu eksploatacji autobusów miejskich. Zgodnie z danymi uzyskanymi na podstawie badań eksploatacyjnych, przedstawionymi w tabeli 3.5 w rozdziale 3, dotyczącymi liczby autobusów miejskich realizujących zadania przewozowe w poszczególnych przedziałach dobowych, maksymalne zadanie przewozowe realizowane jest w godzinach porannego szczytu komunikacyjnego (od godziny 5:00 do godziny 9:00). Zgodnie z przyjętym planem i harmonogramem realizowanych zadań przewozowych, liczba autobusów miejskich niezbędnych do realizacji przydzielonych zadań przewozowych podczas porannego szczytu komunikacyjnego wynosi wówczas $k = 126$ spośród $N = 149$ eksploatowanych w systemie. Oznacza to, że wartość gotowości rzeczywistej dla rozpatrywanego systemu eksploatacji środków transportu w godzinach porannego szczytu komunikacyjnego (z uwzględnieniem struktury progowej systemu eksploatacji) wynosi:

$$\begin{aligned} G^{ST} &= \sum_{j=k}^N \binom{N}{j} \cdot [G^{OT}]^j \cdot [1 - G^{OT}]^{N-j} = \\ &= \sum_{j=126}^{149} \binom{149}{j} \cdot [0,8759]^j \cdot [0,1241]^{149-j} = 0,8913 \end{aligned}$$

Na podstawie powyższego, w celu zapewnienia prawidłowej realizacji przydzielonych zadań przewozowych wymagane jest utrzymanie w gotowości do realizacji zadania co najmniej $k = 126$ autobusów miejskich spośród $N = 149$ eksploatowanych w systemie, wówczas wartość gotowości wymaganej dla rozpatrywanego systemu eksploatacji środków transportu (zgodnie z wzorem 5.15 przedstawionym w rozdziale 5) wynosi:

$$G_w^{ST} = \frac{k}{N} = \frac{126}{149} = 0,8456$$

Na tej podstawie uwzględniając warunek przedstawiony wzorami 5.18 oraz 5.19 wyznaczono wartość gotowości wymaganej do realizacji przydzielonych zadań przewozowych dla pojedynczego obiektu technicznego (autobusu miejskiego):

$$G_w^{OT} = 0,8713$$

Poniżej w tabeli 6.9 przedstawiono wyznaczone wartości gotowości rzeczywistej i wymaganej do realizacji przydzielonych zadań przewozowych dla pojedynczego obiektu technicznego oraz dla rozpatrywanego systemu eksploatacji autobusów miejskich.

Tab. 6.9. Wartości gotowości rzeczywistej i wymaganej w badanym systemie eksploatacji

Gotowość	Wartość
rzeczywista obiektu technicznego	0,8759
wymagana obiektu technicznego	0,8713
rzeczywista systemu eksploatacji	0,8913
wymagana systemu eksploatacji	0,8456

Dla opracowanych wyników badań eksploatacyjnych wyznaczone wartości gotowości rzeczywistej badanych autobusów miejskich oraz gotowości rzeczywistej systemu eksploatacji środków transportu są wyższe niż odpowiadające im wartości gotowości wymaganych. Oznacza to, że zadania przewozowe przydzielone systemowi eksploatacji autobusów miejskich mogą zostać prawidłowo zrealizowane w poszczególnych przedziałach dobowych, w szczególności w godzinach porannego szczytu komunikacyjnego, kiedy wymagana liczba autobusów niezbędnych do realizacji zadań przewozowych jest największa.

6.3.2. Wyniki badań semimarkowskiego modelu decyzyjnego sterowania procesem eksploatacji

W badanym systemie eksploatacji środków transportu wyniki oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych zastosowano do wyznaczenia strategii sterowania procesem eksploatacji przy uwzględnieniu dodatkowego kryterium oceny, jakim jest gotowość obiektów technicznych do realizacji przydzielonych zadań przewozowych. Wartości rozpatrywanych funkcji kryterialnych wyznaczone są dla poszczególnych strategii sterowania, a tym samym zależą od rodzaju decyzji podejmowanych w stanach decyzyjnych analizowanego modelu procesu eksploatacji. Wybór racjonalnych decyzji umożliwia wyznaczenie optymalnej (suboptymalnej) strategii sterowania procesem eksploatacji z punktu widzenia wartości rozpatrywanych funkcji kryterialnych (ryzyko i gotowość).

W tabeli 6.10 określono możliwe decyzje podejmowane w decyzyjnych stanach rozpatrywanego procesu eksploatacji. Decyzje oznaczone kodem „0” stanowią podstawową procedurę działania w przypadku wystąpienia określonych stanów eksploatacyjnych, co oznacza, że przypisuje się tym stanom konkretną liczbę pracowników mającą wykonać określone czynności a także konkretne

warunki i zakres ich wykonania. Każda zamiana decyzji z decyzji „0” na decyzję „1” związana jest z bardziej intensywnym wykonaniem czynności w stanach decyzyjnych analizowanego procesu eksploatacji i wiąże się ze zmianą czasu trwania poszczególnych stanów oraz zmianą kosztów generowanych w tych stanach.

Tab. 6.10. Decyzje w stanach analizowanego semimarkowskiego decyzyjnego modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich

Stan procesu	Decyzja „0” - $d_i^{(0)}$	Decyzja „1” - $d_i^{(1)}$
2	Trasa oznaczona kodem „0” („trudne” warunki realizacji zadania przewozowego)	Trasa oznaczona kodem „1” („łatwe” warunki realizacji zadania przewozowego)
4	Obsługa codzienna oznaczona kodem „0” („normalna”)	Obsługa codzienna oznaczona kodem „1” („intensywna”)
5	Obsługa techniczna oznaczona kodem „0” („normalna”)	Obsługa techniczna oznaczona kodem „1” („intensywna”)
7	Diagnozowanie przez pogotowie techniczne oznaczone kodem „0” („normalne”)	Diagnozowanie przez pogotowie techniczne oznaczone kodem „1” („intensywne”)
8	Naprawa bez utraty kursu oznaczona kodem „0” („normalna”)	Naprawa bez utraty kursu oznaczona kodem „1” („intensywna”)
9	Naprawa z utratą kursu oznaczona kodem „0” („normalna”)	Naprawa z utratą kursu oznaczona kodem „1” („intensywna”)
11	Zjazd awaryjny oznaczony kodem „0” („samodzielny”)	Zjazd awaryjny oznaczony kodem „1” („holowanie”)
12	Naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu na trasie oznaczona kodem „0” („normalna”)	Naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu na trasie oznaczona kodem „1” („intensywna”)
13	Diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie oznaczone kodem „0” („normalne”)	Diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie oznaczone kodem „1” („intensywne”)
16	Akcja interwencyjno-ratownicza oznaczona kodem „0” („normalna”)	Akcja interwencyjno-ratownicza oznaczona kodem „1” („intensywna”)
17	Naprawa w stacji obsługi po kolizji lub wypadku oznaczona kodem „0” („normalna”)	Naprawa w stacji obsługi po kolizji lub wypadku oznaczona kodem „1” („intensywna”)
18	Diagnozowanie w stacji obsługi po kolizji lub wypadku oznaczone kodem „0” („podstawowe”)	Diagnozowanie w stacji obsługi po kolizji lub wypadku oznaczone kodem „1” („rozszerzone”)

cd. tab. 6.10. Decyzje w stanach analizowanego semimarkowskiego decyzyjnego modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich

19	Wymiana pojazdu po kolizji lub wypadku oznaczona kodem „0” („normalna”)	Wymiana pojazdu po kolizji lub wypadku oznaczona kodem „1” („intensywna”)
20	Naprawa w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia na OC lub OT oznaczona kodem „0” („normalna”)	Naprawa w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia na OC lub OT oznaczona kodem „1” („intensywna”)
21	Diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie oznaczone kodem „0” („normalna”)	Diagnozowanie w stacji obsługi po naprawie oznaczone kodem „1” („intensywna”)

Poniżej w tabeli 6.11 przedstawiono wartości średnie bezwarunkowych czasów przebywania w stanach semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji $X(t)$, oraz wartości jednostkowych dochodów (kosztów) generowanych w stanach tego modelu, z uwzględnieniem rodzaju decyzji (tabela 6.10) podejmowanej w danym stanie rozpatrywanego procesu $X(t)$ – zarówno dla stanów decyzyjnych i niedecyzyjnych opracowanego modelu procesu eksploatacji.

Tab. 6.11. Średnie bezwarunkowe czasy $\bar{\theta}_i$ przebywania oraz dochody jednostkowe c_i generowane w stanach modelu procesu $X(t)$ w zależności od zastosowanej decyzji

Stan procesu	$\bar{\theta}_i^{(0)}$ [h]	$\bar{\theta}_i^{(1)}$ [h]	$c_i^{(0)}$ [PLN/h]	$c_i^{(1)}$ [PLN/h]
1	5,45	5,45	-13,61	-13,61
2	3,90	4,40	53,00	44,00
3	0,43	0,43	-39,36	-39,36
4	0,21	0,17	-328,62	-406,86
5	4,40	3,68	-240,69	-268,68
6	0,05	0,05	-44,31	-44,31
7	0,12	0,06	-102,15	-125,72
8	0,17	0,09	-319,13	-438,80
9	0,59	0,45	-300,89	-379,38
10	0,59	0,59	-118,02	-118,02
11	0,83	0,61	-146,28	-181,39
12	2,87	2,10	-241,16	-284,45
13	0,55	0,39	-139,91	-180,37
14	1,73	1,73	-13,61	-13,61
15	0,52	0,52	-44,31	-44,31
16	2,43	1,97	-251,54	-291,26
17	44,38	38,00	-265,71	-376,42
18	0,83	0,71	-145,37	-199,89
19	2880,00	1920,00	-603,74	-862,49
20	3,62	2,90	-131,66	-166,01
21	0,55	0,39	-139,91	-160,90

Poniżej przedstawiono wyniki badań decyzyjnego semimarkowskiego modelu wyznaczania racjonalnej strategii sterowania dla badanego 21-stanowego modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich w aspekcie oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości środków transportu do realizacji przydzielonych zadań przewozowych.

Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą programu komputerowego opracowanego w środowisku programowania Python. Wyznaczenie zbioru „najlepszych” rozwiązań stanowiących suboptymalne („prawie najlepsze”) strategie sterowania procesem eksploatacji zostało zrealizowane z zastosowaniem frontu Pareto oraz algorytmu symulowanego wyżarzania. Poniżej przedstawiono zestawienie wartości parametrów wejściowych opracowanego programu komputerowego, dla których zostały wykonane obliczenia numeryczne:

- a) liczba iteracji $L_I = 200$,
- b) liczebność populacji $L_P = 100$,
- c) temperatura początkowa $T_k = 100$,
- d) współczynnik chłodzenia $a = 0,01$.

Na podstawie wykonanych obliczeń, dla rozpatrywanych funkcji kryterialnych wyznaczono racjonalne (suboptymalne, optymalne w sensie Pareto) strategie sterowania procesem eksploatacji realizowanym w badanym systemie transportowym δ^* .

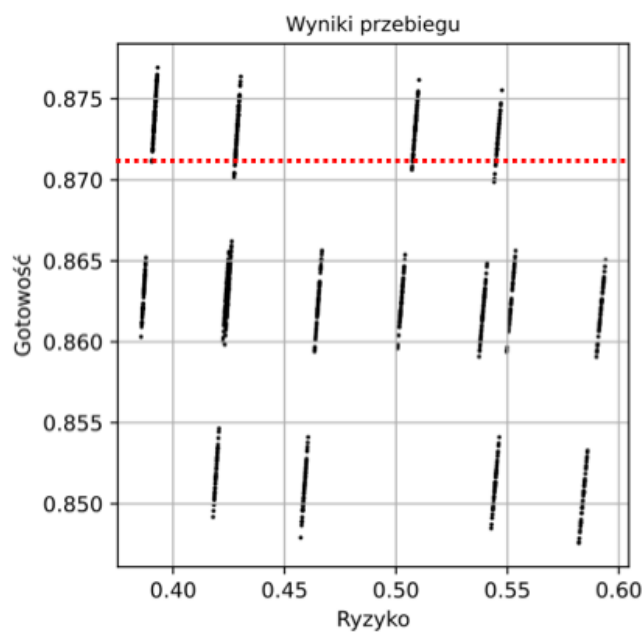
Obliczenia wykonano dla analizowanych w pracy poszczególnych pięciu rodzajów ryzyka r_A, r_B, r_C, r_D, r_E oraz dla ryzyka łącznego r_Σ wystąpienia zdarzeń niepożądanych w rozpatrywanym systemie eksploatacji autobusów miejskich. Wyniki obliczeń wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania dotyczące poszczególnych rodzajów ryzyka przedstawiono na rysunkach od 6.1 do 6.12 oraz w tabelach od 6.12 do 6.17.

Odpowiednio dla poszczególnych rodzajów ryzyka na rysunkach 6.1, 6.3, 6.5, 6.7, 6.9 oraz 6.11 przedstawiono wyniki (strategie sterowania) wyznaczone w kolejnych iteracjach za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania, natomiast na rysunkach 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 6.10 oraz 6.12 przedstawiono w sposób graficzny wyznaczone racjonalne (suboptymalne) strategie sterowania δ^* w postaci punktów leżących na tzw. froncie Pareto. Dodatkowo na rysunkach 6.1 - 6.12 zostały naniesione linie odpowiadające wyznaczonym wartościom r_z^{GA} lub r_Σ^{GA} górnej granicy obszaru kategorii ryzyka akceptowalnego (kolor zielony) i r_z^{GT} lub r_Σ^{GT} górnej granicy obszaru kategorii ryzyka tolerowalnego (kolor niebieski) oraz wymaganej gotowości obiektów technicznych (środków transportu) do realizacji przydzielonych zadań przewozowych G_w^{OT} (kolor czerwony). Umożliwiło to wyodrębnienie na wykresie Ryzyko-Gotowość maksymalnie sześciu obszarów, ze względu na rozpatrywane w pracy trzy kategorie ryzyka oraz wymaganą gotowości środków transportu do zapewnienia prawidłowej realizacji przydzielonych zadań przewozowych.

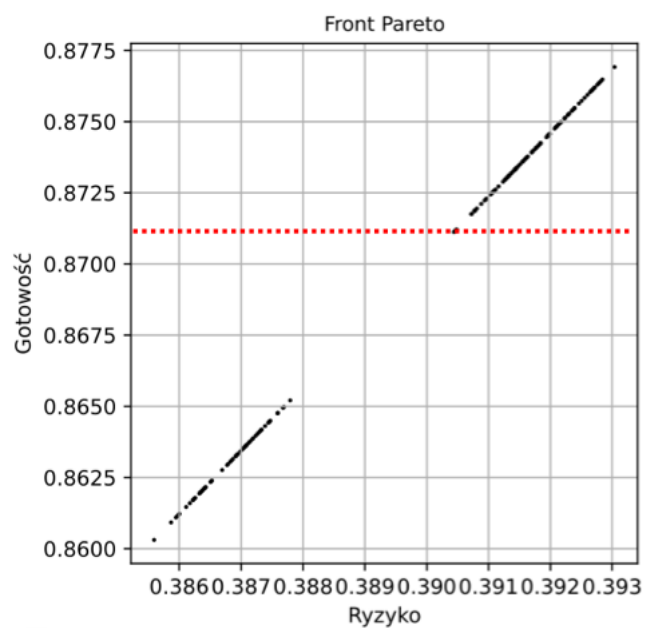
W przypadku niektórych rysunków, np. 6.1, 6.3, 6.9, linie odpowiadające górnej granicy obszaru ryzyka akceptowalnego (kolor zielony) oraz górnej granicy obszaru ryzyka tolerowalnego (kolor niebieski) nie są uwidocznione, ponieważ leżą poza obszarami wyznaczonych wartości ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych przedstawionymi na tych wykresach.

W tabelach 6.12 - 6.17, wyznaczone z zastosowaniem algorytmu symulowanego wyżarzania oraz frontu Pareto racjonalne strategie sterowania δ^* , przedstawiono w postaci binarnych kodów (wektorów), gdzie cyfry 0 i 1 oznaczają rodzaj zastosowanej decyzji w danym stanie modelowanego procesu eksploatacji oraz przedstawiono odpowiadające tym strategiom wartości funkcji kryterialnych. Przedstawione w postaci wektorów strategie sterowania δ^* oznaczono odpowiednio kolorami ze względu na wartości funkcji kryterialnych:

- a) kolorem zielonym oznaczono strategie sterowania δ^* , dla których wartość ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych zawiera się w obszarze ryzyka akceptowalnego r^A oraz gotowość rzeczywista obiektu technicznego (środka transportu) jest co najmniej równa gotowości wymaganej do prawidłowej realizacji zadań przewozowych;
- b) kolorem niebieskim oznaczono strategie sterowania δ^* , dla których wartość ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych zawiera się w obszarze ryzyka tolerowalnego r^T oraz gotowość rzeczywista obiektu technicznego (środka transportu) jest co najmniej równa gotowości wymaganej do prawidłowej realizacji zadań przewozowych;
- c) kolorem czarnym oznaczono strategie sterowania δ^* , dla których wartości ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych lub gotowości obiektu technicznego (środka transportu) nie spełniają warunków opisanych w punktach a) lub b).



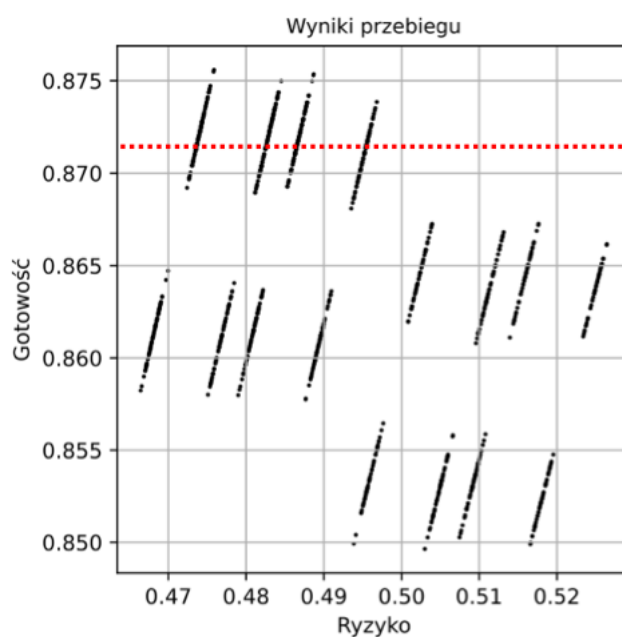
Rys. 6.1. Wyniki otrzymane w kolejnych iteracjach za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_A [PLN/h]



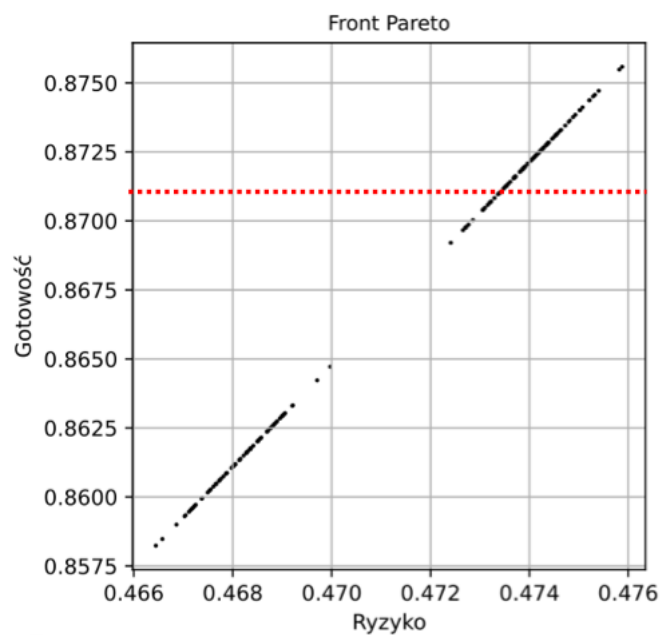
Rys. 6.2. Front Pareto rozwiązań optymalnych wyznaczony za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_A [PLN/h]

Tab. 6.12. Suboptymalne strategie sterowania δ^* oraz wartości funkcji kryterialnych wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_A

Strategia δ^*	$r_A(\delta^*)$ [PLN/h]	$G^{OT}(\delta^*)$
[0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1]	0,3930	0,8769
[1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0]	0,3927	0,8761
[0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,0]	0,3925	0,8758
[1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0]	0,3922	0,8751
[0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,1,1,0,0,1,0]	0,3919	0,8745
[1,1,0,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,0,1,0,1,0,1,0]	0,3917	0,8740
[1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,1,0]	0,3914	0,8734
[1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,0]	0,3913	0,8731
[0,1,0,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0,0,0,1,1]	0,3910	0,8724
[0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0]	0,3907	0,8717



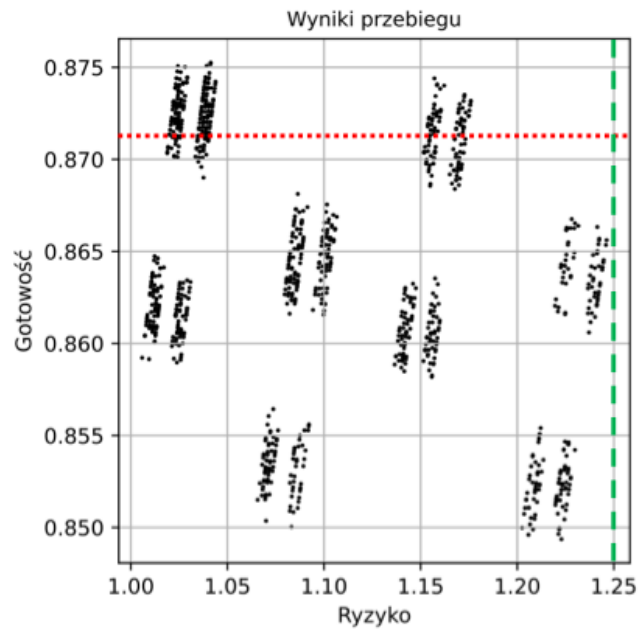
Rys. 6.3. Wyniki otrzymane w kolejnych iteracjach za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_B [PLN/h]



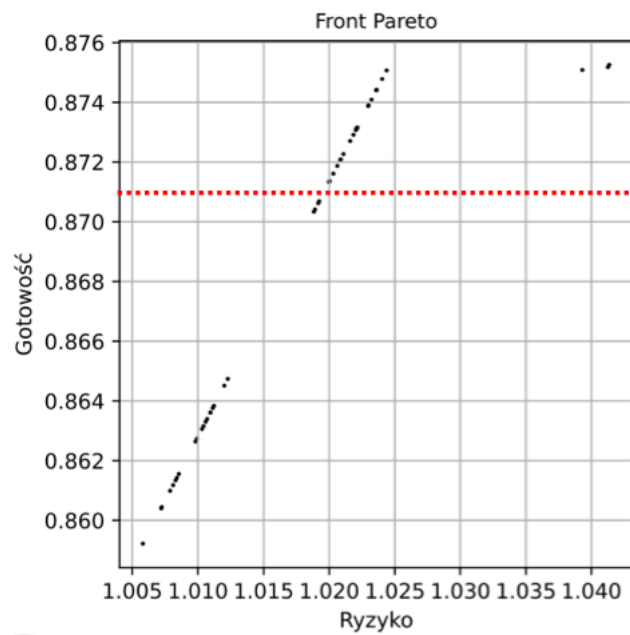
Rys. 6.4. Front Pareto rozwiązań optymalnych wyznaczony za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_B [PLN/h]

Tab. 6.13. Suboptymalne strategie sterowania δ^* oraz wartości funkcji kryterialnych wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_B

Strategia δ^*	$r_B(\delta^*)$ [PLN/h]	$G^{OT}(\delta^*)$
[1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1]	0,4758	0,8755
[1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,1,1]	0,4750	0,8740
[1,1,1,1,0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0]	0,4746	0,8732
[1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1]	0,4744	0,8728
[1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1]	0,4743	0,8727
[1,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1]	0,4741	0,8724
[0,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0]	0,4740	0,8722
[0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,1,1,1,1,1,1]	0,4738	0,8719
[0,1,0,1,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0]	0,4737	0,8716
[0,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0]	0,4735	0,8713



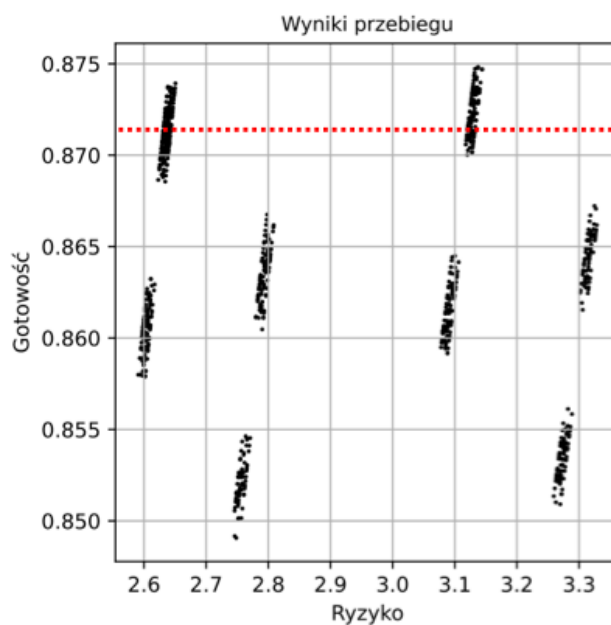
Rys. 6.5. Wyniki otrzymane w kolejnych iteracjach za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_c [PLN/h]



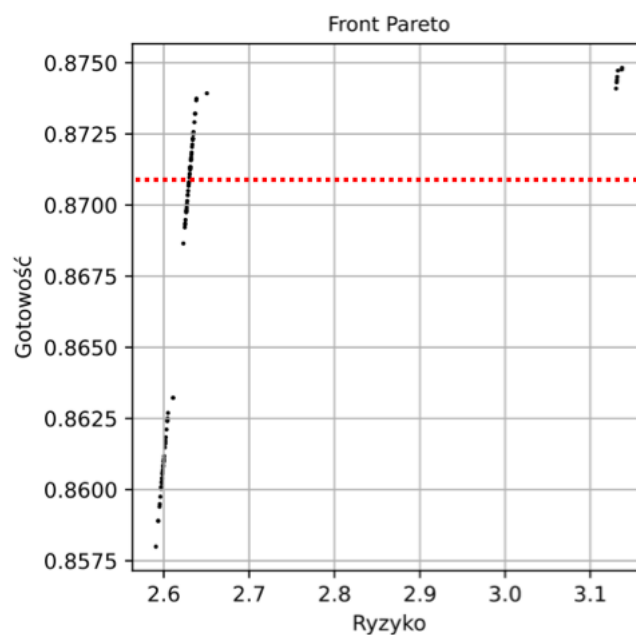
Rys. 6.6. Front Pareto rozwiązań optymalnych wyznaczony za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_c [PLN/h]

Tab. 6.14. Suboptymalne strategie sterowania δ^* oraz wartości funkcji kryterialnych wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_C

Strategia δ^*	$r_C(\delta^*)$ [PLN/h]	$G^{OT}(\delta^*)$
[1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,1,1]	1,0413	0,8753
[1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,0,1,0,1,1,0,1,1,1]	1,0412	0,8751
[1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,1,1,1]	1,0393	0,8751
[1,1,1,1,0,0,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1]	1,0243	0,8750
[0,1,0,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,1,1]	1,0232	0,8741
[1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1]	1,0220	0,8731
[0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0]	1,0215	0,8727
[0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,0,1,0]	1,0210	0,8722
[1,1,1,0,0,0,1,0,0,1,1,1,1,1,0,1,1,0,1,1,0]	1,0208	0,8720
[1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0]	1,0199	0,8713



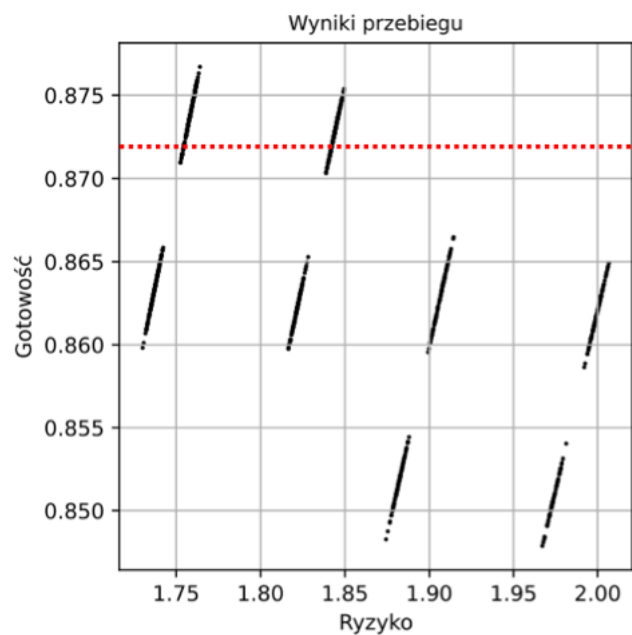
Rys. 6.7. Wyniki otrzymane w kolejnych iteracjach za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_D [PLN/h]



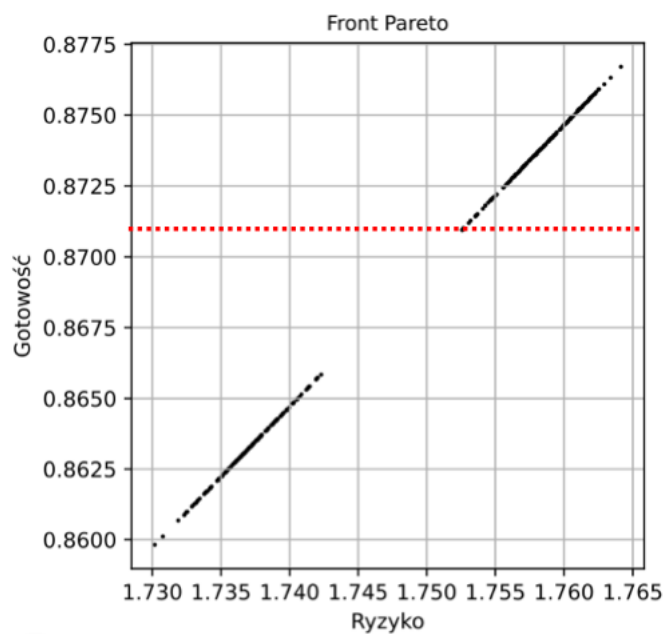
Rys. 6.8. Front Pareto rozwiązań optymalnych wyznaczony za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_D [PLN/h]

Tab. 6.15. Suboptymalne strategie sterowania δ^* oraz wartości funkcji kryterialnych wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_D

Strategia δ^*	$r_D(\delta^*)$ [PLN/h]	$G^{OT}(\delta^*)$
[0,1,1,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1]	3,1372	0,8749
[1,1,1,1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0]	3,1370	0,8748
[0,1,0,1,1,0,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,0,1,1,1]	3,1324	0,8747
[0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1]	3,1316	0,8745
[1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1]	3,1312	0,8744
[0,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1]	3,1309	0,8743
[0,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,0,1,1]	3,1302	0,8740
[0,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1]	2,6505	0,8739
[1,1,0,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0]	2,6358	0,8729
[0,1,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0]	2,6341	0,8723
[1,1,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,0]	2,6324	0,8717
[1,1,1,0,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0]	2,6310	0,8713



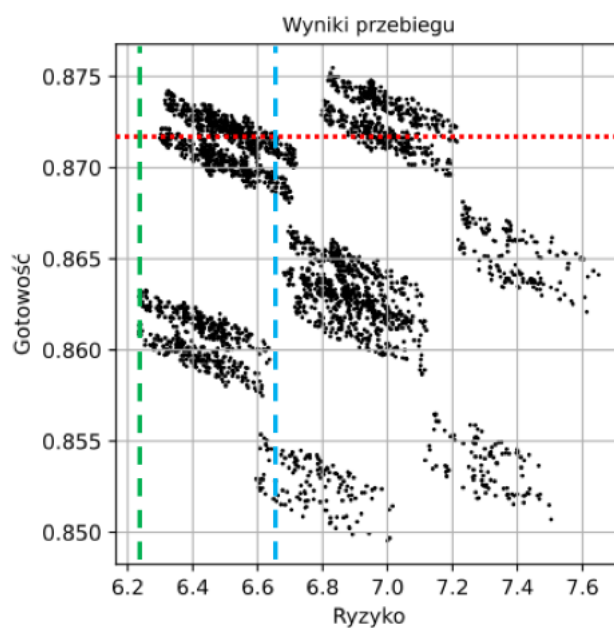
Rys. 6.9. Wyniki otrzymane w kolejnych iteracjach za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_E [PLN/h]



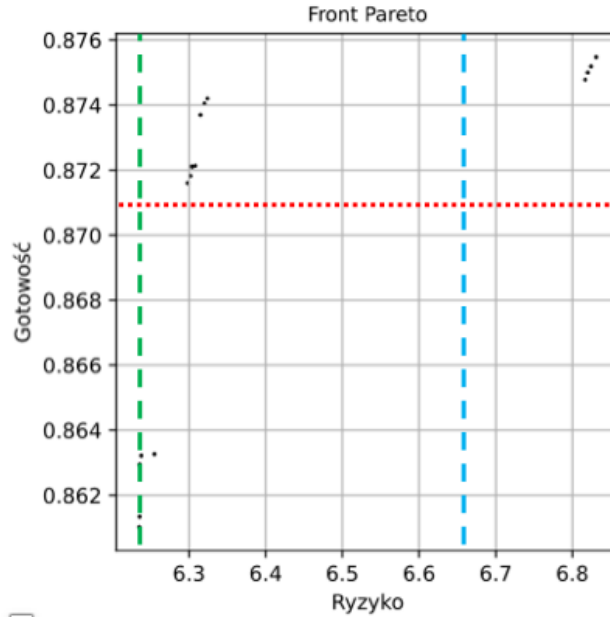
Rys. 6.10. Front Pareto rozwiązań optymalnych wyznaczony za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_E [PLN/h]

Tab. 6.16. Suboptymalne strategie sterowania δ^* oraz wartości funkcji kryterialnych wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_E

Strategia δ^*	$r_E(\delta^*)$ [PLN/h]	$G^{OT}(\delta^*)$
[1,1,0,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1]	1,7641	0,8767
[0,1,0,1,1,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1]	1,7617	0,8755
[0,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,0,1,0,1,1,0,1,0]	1,7610	0,8751
[1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,0]	1,7602	0,8747
[1,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1]	1,7593	0,8743
[1,1,0,1,0,1,1,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,1,1,1]	1,7579	0,8736
[0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0]	1,7571	0,8732
[1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0]	1,7564	0,8728
[0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,1,1,1,0]	1,7564	0,8728
[1,1,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0]	1,7535	0,8714



Rys. 6.11. Wyniki otrzymane w kolejnych iteracjach za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_Σ [PLN/h]



Rys. 6.12. Front Pareto rozwiązań optymalnych wyznaczony za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_{Σ} [PLN/h]

Tab. 6.17. Suboptymalne strategie sterowania δ^* oraz wartości funkcji kryterialnych wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_{Σ}

Strategia δ^*	$r_{\Sigma}(\delta^*)$ [PLN/h]	$G^{OT}(\delta^*)$
[1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1]	6,8407	0,8756
[0,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1]	6,8321	0,8753
[0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,0]	6,8317	0,8751
[0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,0]	6,8259	0,8747
[0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1]	6,3301	0,8741
[1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1]	6,3256	0,8740
[1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,1]	6,3118	0,8738
[1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0]	6,3102	0,8722
[1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,0,1,1,1,0]	6,3090	0,8721
[1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0]	6,3080	0,8719
[1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,0,1,0,1]	6,2985	0,8717
[1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,0,0,1,0,1]	6,2605	0,8634
[1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0,1]	6,2316	0,8633
[1,1,1,0,0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,0,1,0,1,1,0,1]	6,2303	0,8631
[0,1,1,0,0,1,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,1,0,1]	6,2273	0,8614
[1,1,0,0,1,0,1,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,0]	6,2254	0,8612

Na podstawie badań opracowanych modeli wyznaczono wartości analizowanych funkcji kryterialnych (ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości środków transportu). W efekcie, dla obliczonych wartości funkcji kryterialnych, wyznaczono odpowiadający im zbiór strategii sterowania procesem eksploatacji będący zbiorem rozwiązań optymalnych w sensie Pareto (dla rozpatrywanych w pracy poszczególnych rodzajów ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych A, B, C, D, E oraz ryzyka łącznego). Na tej podstawie istnieje możliwość wyboru pojedynczej strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu – jednego rozwiązania spośród wyznaczonego zbioru rozwiązań optymalnych (suboptymalnych) leżących na tzw. froncie Pareto, dla których ryzyko osiąga co najmniej poziom tolerowalny oraz gotowość rzeczywista obiektów technicznych (środków transportu) jest co najmniej równa wyznaczonej gotowości wymaganej do prawidłowej realizacji przydzielonych zadań. Wybór taki dokonywany jest zazwyczaj przez decydenta (zespół decydentów) systemu, na podstawie dodatkowych przesłanek dotyczących zarówno konkretnej sytuacji decyzyjnej oraz aktualnych warunków w jakich funkcjonuje system eksploatacji.

7. ZAKOŃCZENIE

7.1. PODSUMOWANIE ROZPRAWY

Prawidłowe funkcjonowanie złożonych systemów technicznych jest możliwe pod warunkiem zapewnienia jednego z nadrzędnych kryteriów ich funkcjonowania – odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. Jedną z miar bezpieczeństwa jest ryzyko wystąpienia zdarzeń powodujących zakłócenia w działaniu systemu i eksploatowanych obiektów technicznych oraz generujących straty. Zdarzenia tego typu wynikają często z niezdatności środków transportu, w tym przede wszystkim z uszkodzeń, kolizji i wypadków mających charakter losowy. Skutkiem jest przerwanie realizacji zadania przewozowego, generujące jednocześnie koszty napraw oraz dodatkowe koszty związane z karami za niezrealizowanie zadań przewozowych i kosztami utrzymania pojazdów rezerwowych. Z tego względu konieczne jest podjęcie działań zmierzających do zmniejszenia ryzyka przy zapewnieniu odpowiednio wysokich poziomów niezawodności i gotowości eksploatowanych środków transportu.

Analizy zagadnień związanych z ryzykiem są zatem istotne i uzasadnione z praktycznego oraz naukowego punktu widzenia, a zarazem stanowią aktualny problem badawczy.

W niniejszej rozprawie szczególną uwagę zwrócono na ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemach eksploatacji środków transportu na przykładzie rzeczywistego systemu eksploatacji autobusów miejskich w wybranej aglomeracji miejskiej. Jako obszar badań wybrano realizowany w tym systemie proces eksploatacji autobusów miejskich, w ramach którego wykonywany jest szereg czynności mających na celu bezpieczny i terminowy przewóz pasażerów. Realizację niniejszego celu w znacznym stopniu uniemożliwiają losowe zdarzenia niepożądane, które w ramach przedmiotowej rozprawy doktorskiej poddano analizie i ocenie ze względu na prawdopodobieństwo ich wystąpienia i związanych z tym skutków (strat).

W wyniku przeprowadzonych badań wstępnych sformułowano cel główny rozprawy:

Opracowanie metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu i weryfikacja możliwości jej zastosowania do racjonalnego sterowania procesem eksploatacji przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiednio wysokiego poziomu gotowości użytkowanych obiektów technicznych.

Cel rozprawy został osiągnięty w wyniku realizacji następujących zadań badawczych:

1. analizy zagadnień dotyczących ryzyka w systemach technicznych oraz sposobów jego oceny,
2. analizy zagadnień związanych z problematyką oceny efektywności i wyboru decyzji w systemach eksploatacji środków transportu,

3. identyfikacji obiektu badań i realizowanego w nim procesu eksploatacji oraz pozyskania danych (informacji) z badanego systemu (na podstawie badań eksploatacyjnych oraz z bazy danych i informacji eksperckiej stosowanych w badanym systemie eksploatacji autobusów miejskich),
4. zbudowania grafu stanów modelu rozpatrywanego procesu eksploatacji oraz modelu matematycznego tego procesu,
5. opracowania procedury analizy i oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych,
6. opracowania metody szacowania i oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu,
7. przedstawienia propozycji zastosowania opracowanej metody do racjonalnego sterowania procesem eksploatacji przez zbudowanie dwukryterialnego decyzyjnego modelu sterowania procesem eksploatacji uwzględniającego ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowość środków transportu do realizacji zadań przewozowych,
8. wykazania przydatności zbudowanych modeli i opracowanej metody oceny ryzyka na przykładzie rzeczywistych danych pochodzących z badań systemu transportu miejskiego.

W pracy doktorskiej można wyodrębnić cztery części. Pierwsza z nich przedstawia zarys problematyki badawczej wraz z celem pracy oraz rozważania dotyczące analiz i metod oceny ryzyka najczęściej przedstawianych w literaturze przedmiotu. Szczególną uwagę skupiono na ryzyku wystąpienia zdarzeń niepożądanych w złożonych systemach technicznych podczas eksploatacji obiektów technicznych i konsekwencjach związanych z tymi zdarzeniami. W tej części omówiono również dotychczas stosowane metody modelowania procesów eksploatacji oraz oceny efektywności ich działania, które były podstawą do realizacji kolejnych etapów niniejszej dysertacji.

Drugą część rozprawy stanowi identyfikacja badanego, rzeczywistego systemu i procesu eksploatacji środków transportu funkcjonującego na terenie wybranej aglomeracji miejskiej. W ramach przeprowadzonych badań opisano system i proces eksploatacji autobusów miejskich, zbudowano graf stanów modelu procesu eksploatacji i przedstawiono metodę badawczą oraz wyniki badań opracowane w sposób umożliwiający realizację celu rozprawy. Wyniki te poddano analizie statystycznej i szczegółowo przedstawiono tą analizę na wybranych przykładach.

W trzecim etapie realizacji rozprawy doktorskiej opracowano i przedstawiono metodę oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu. W ramach tej metody przygotowano procedurę analizy i oceny ryzyka, zidentyfikowano zagrożenia występujące w badanym systemie eksploatacji oraz zbudowano model matematyczny procesu eksploatacji środków transportu z zastosowaniem teorii procesów semi-Markowa wraz z modelem matematycznym wartościowania ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych. Ponadto przedstawiono sposób ewaluacji tego ryzyka przez odniesienie jego wartości do wartości dochodu uzyskiwanego w rozpatrywanym

systemie. W części badawczej zaproponowano również możliwość zastosowania opracowanej metody oceny ryzyka do wyznaczania strategii sterowania procesem eksploatacji w systemie eksploatacji autobusów miejskich na przykładzie zbudowanego modelu decyzyjnego tego procesu z uwzględnieniem dwóch kryteriów oceny tego modelu tj. ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz gotowości autobusów miejskich do realizacji przewozów pasażerów.

W ostatniej części pracy przedstawiono wyniki weryfikacji opracowanych modeli i metody oceny ryzyka na przykładzie danych pozyskanych z rzeczywistego systemu eksploatacji. Wyliczono wartości ryzyka wystąpienia wytypowanych zdarzeń niepożądanych w odniesieniu do zagrożeń istniejących w badanym systemie i oceniono je pod względem ich akceptowalności. Na podstawie wyznaczonych wartości ryzyka oraz wartości gotowości obiektów technicznych do realizacji zadań transportowych w badanym systemie wyznaczono zbiór optymalnych strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu. Najlepsze (suboptymalne), w sensie Pareto, strategie sterowania procesem eksploatacji z punktu widzenia rozpatrywanych kryteriów wyznaczono przy użyciu programu komputerowego napisanego w środowisku Python z zastosowaniem algorytmu symulowanego wyżarzania.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych rozprawy autorka zalicza:

1. Opracowanie metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu, w tym:
 - opracowanie metody analizy ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu z zastosowaniem teorii procesów semi-Markowa do oszacowania wartości ryzyka,
 - opracowanie sposobu ewaluacji wyznaczonego ryzyka polegającego na przypisaniu jego wartości do jednej z trzech wytypowanych kategorii ryzyka (akceptowalnego, tolerowalnego i nieakceptowalnego) przez:
 - wyznaczenie wartości górnych granic ryzyka akceptowalnego i ryzyka tolerowalnego,
 - odniesienie wartości ryzyka do wartości dochodu uzyskiwanego w systemie eksploatacji obiektów technicznych.
2. Wskazanie możliwości zastosowania opracowanej metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych do sterowania procesem eksploatacji środków transportu z zastosowaniem decyzyjnych procesów semi-Markowa.
3. Wskazanie propozycji zastosowania znanych z literatury kryteriów oceny efektywności funkcjonowania systemu technicznego (ryzyka i gotowości) do wyboru optymalnych (suboptymalnych) strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu z punktu widzenia zapewnienia bezpieczeństwa realizowanych przewozów oraz możliwości prawidłowej realizacji zadań przewozowych.
4. Opracowanie modelu decyzyjnego z zastosowaniem algorytmu symulowanego wyżarzania oraz frontu Pareto, umożliwiającego wybór

optymalnej strategii sterowania procesem eksploatacji przy minimalizacji wartości jednego z kryterium (ryzyka) oraz maksymalizacji wartości drugiego kryterium (gotowości).

7.2. WNIOSKI

Przeprowadzone w niniejszej dysertacji rozważania i wykonane analizy umożliwiły sformułowanie następujących wniosków końcowych:

1. Zaproponowana w pracy metoda oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu umożliwia wyznaczenie wartości rozpatrywanych rodzajów ryzyka w odniesieniu do zagrożeń istniejących w badanym systemie oraz wyznaczenie łącznego ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych generowanego w tym systemie.
2. Ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych wyznaczone na podstawie matematycznego modelu procesu eksploatacji zależy od liczby tych zdarzeń, czasów ich trwania oraz nakładów (kosztów) ponoszonych w stanach modelowanego procesu.
3. Na wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia niepożądanego wpływa prawdopodobieństwo wystąpienia analizowanego zdarzenia (w pracy wyliczone jako prawdopodobieństwo graniczne przebywania w stanach niepożądanych badanego procesu eksploatacji p_i^*) oraz koszty związane z wystąpieniem tego zdarzenia i usuwaniem jego skutków.
4. Dogodnym sposobem ewaluacji ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych jest wyznaczenie wartości granicznych (progów) przedziałów ryzyka akceptowalnego, tolerowalnego oraz nieakceptowalnego w odniesieniu do dochodu generowanego w badanym systemie eksploatacji.
5. Wartości ryzyka dotyczące uszkodzeń autobusów miejskich w trakcie realizacji zadań przewozowych (r_A, r_B, r_C), dla badanego systemu eksploatacji środków transportu wpisują się w kategorię ryzyka akceptowalnego, ponieważ nie przekraczają górnej granicy tej kategorii ryzyka wyznaczonej na poziomie 1,25 [PLN/h].
6. Ryzyko wystąpienia zdarzenia niepożądanego związanego z kolizją lub wypadkiem autobusu miejskiego i koniecznością wymiany go na nowy obiekt (r_E) jest ryzykiem nieakceptowalnym, ale nie jest największym ryzykiem ponoszonym w systemie, mimo generowania jednorazowo bardzo dużego kosztu zakupu nowego pojazdu. Powodem tego jest bardzo niskie prawdopodobieństwo graniczne wystąpienia kolizji lub wypadku autobusu miejskiego ze skutkiem w postaci likwidacji tego obiektu ($p_i^* = 0,0021$).
7. Największe ryzyko dla badanego systemu dotyczy zdarzeń niepożądanych związanych z kolizją lub wypadkiem autobusu miejskiego i koniecznością naprawy tego obiektu w stacji obsługi (r_D), które wynosi 2,60 [PLN/h] i niemal dwukrotnie przekracza górną granicę ryzyka tolerowalnego wyznaczoną na poziomie 1,33 [PLN/h]. Ryzyko to należy do kategorii ryzyka nieakceptowalnego.

8. Ryzyko łączne ponoszone w badanym systemie należy do kategorii ryzyka tolerowalnego ($r_{\Sigma} = 6,62$ [PLN/h]).
9. Na podstawie analizy wyników badań opracowanych modeli istnieje możliwość sterowania procesem eksploatacji środków transportu ze względu na wybrane kryteria oceny (ryzyko, gotowość).
10. Korzystając z metod heurystycznych (np. algorytmu symulowanego wyżarzania), przy zastosowaniu narzędzia w postaci frontu Pareto, można uzyskać zbiór rozwiązań problemu decyzyjnego jakim jest wybór suboptymalnej strategii sterowania procesem eksploatacji środków transportu.
11. Zastosowanie opracowanej metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz wyznaczenie dodatkowego kryterium decyzyjnego (np. wymaganej gotowości obiektu technicznego do realizacji przydzielonego zadania) determinuje wybór najlepszych decyzji spośród decyzji leżących na froncie Pareto.
12. Zaproponowana metoda oceny ryzyka umożliwia również wybór innych decyzji sterowania procesem eksploatacji, niż te które znajdują się na froncie Pareto. Przykładowo spośród wskazanego zbioru decyzji przy zastosowaniu algorytmu symulowanego wyżarzania dla ryzyka łącznego r_{Σ} (rys. 6.11) do sterowania procesem eksploatacji decydent może wybrać dowolną strategię znajdującą się w przedziale ryzyka akceptowalnego lub tolerowalnego, dla której gotowość rzeczywista obiektu technicznego przyjmuje wartość co najmniej równą gotowości wymaganej.

7.3. PLAN DALSZYCH BADAŃ

W aspekcie dalszych prac badawczych poświęconych tematyce oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w złożonych systemach technicznych, modelowania procesów eksploatacji realizowanych w tego typu systemach oraz problematyce związanej z obszarem podejmowania decyzji i sterowania procesami eksploatacji planowane są prace o następującym zakresie:

- kontynuowanie badań związanych z oceną ryzyka z uwzględnieniem zagadnień dotyczących napraw/wymian profilaktycznych i korekcyjnych realizowanych z zastosowaniem napraw/wymian dokładnych i minimalnych;
- opracowanie programu symulacji modelu procesu eksploatacji badanych obiektów, który umożliwi wykonywanie eksperymentów symulacyjnych dla różnych liczb zdarzeń eksploatacyjnych (zmian stanów procesu), różnej liczby obiektów technicznych, różnego czasu przebywania w poszczególnych stanach procesu; w efekcie realizacji eksperymentów symulacyjnych wygenerowane zostaną wartości zastosowanych funkcji kryterialnych, tzn.: wartość ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz wartość gotowości obiektu technicznego, z uwzględnieniem różnych wariantów decyzyjnych (strategii sterowania);

- opracowanie metody sterowania procesem eksploatacji z uwzględnieniem dodatkowego kryterium oceny jakim jest dochód osiągniany przez przedsiębiorstwo, w którym realizowany jest proces eksploatacji; rezultatem opracowania modelu trójkryterialnego będzie wskazanie najlepszych strategii sterowania procesem z punktu widzenia minimalizacji ryzyka, maksymalizacji gotowości obiektów oraz maksymalizacji zysku przedsiębiorstwa;
- opracowanie metody oceny ryzyka przy uwzględnieniu stopnia ważności ocenianych kryteriów (zróznicowanie wag kryteriów branych pod uwagę w ocenie ryzyka łącznego);
- podjęcie próby implementacji opracowanego modelu decyzyjnego sterowania procesem eksploatacji nie tylko w obszarze decyzji eksploatacyjnych podejmowanych na podstawie badań modelu semi-Markowa, ale również w zakresie decyzji strategicznych dla przedsiębiorstwa przez wskazanie rozwiązań minimalizujących ryzyko przy zapewnieniu wymaganych parametrów eksploatacyjnych użytkowanych obiektów.

Ponadto w dalszej perspektywie prac istnieje możliwość zastosowania zaproponowanej metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych jako elementu metody zarządzania ryzykiem (w celu racjonalnego sterowania ryzykiem). Opracowanie metody zarządzania ryzykiem uwzględniającej wyniki zrealizowanych dotychczas badań wymaga pogłębienia prac w obszarze analizy istniejących zagrożeń z punktu widzenia otoczenia i człowieka oraz związanymi z nimi stratami zarówno materialnymi (dla systemu eksploatacji) jak i stratami w postaci utraty zdrowia i życia ludzkiego oraz degradacji środowiska. Dodatkowo należy poddać analizie możliwość sterowania ryzykiem w celu jego minimalizacji przez przedstawienie propozycji rozwiązań w zakresie podejmowania decyzji eksploatacyjnych a także strategicznych dla przedsiębiorstwa oraz sposobu monitorowania założonych efektów.

LITERATURA

- [1] Australian Government, Department of Home Affairs, 2020. National Emergency Risk Assessment Guidelines Australian Institute for Disaster Resilience.
- [2] Aven T., Jensen, U., 2013. Stochastic Models in Reliability. Springer New York.
- [3] Aven T., 2015. Risk analysis. John Wiley & Sons.
- [4] Bandyopadhyay S., Saha S., Maulik U., Deb K., 2008. A Simulated Annealing-Based Multiobjective Optimization Algorithm: AMOSA. *IEEE Trans. Evol. Computat.* 12(3), 269–283.
- [5] Barbu V. S., Limnios N., 2008. Semi-Markov Chains and Hidden Semi-Markov Models toward Applications. Springer New York.
- [6] Będkowski L., Dąbrowski T., 2006. Podstawy eksploatacji. Cz. 2. Wojskowa Akademia Techniczna.
- [7] Bojar P., 2012. Application of FMEA method for assessment of risk in land transportation of hazardous materials. *Journal of KONES Powertrain and Transport* Vol. 19(3), 7.
- [8] Bojar W., Rostek K., Knopik L., 2014. Systemy wspomagania decyzji. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- [9] Borucka A., Niewczas A., Hasilova K., 2019. Forecasting the readiness of special vehicles using the semi-Markov model. *EiN* 21(4), 662–669.
- [10] Budzyński M., Jamroz K., Gaca S., Kustra W., Michalski L., 2016. Narzędzia do zarządzania bezpieczeństwem infrastruktury drogowej w Polsce. ZNPRzBiS
- [11] Chiacchio F., Aizpurua J. I., Compagno L., D’Urso D., 2020. SHyFTOO, an object-oriented Monte Carlo simulation library for the modeling of Stochastic Hybrid Fault Tree Automaton. *Expert Systems with Applications* 146, 113139.
- [12] Chruzik K., Fellner A., 2015. Zarządzanie ryzykiem w transporcie. (4/2015), 10.
- [13] Chruzik K., Fellner A., 2016. Safety platform of Polish transport. *SJSUTST* 90, 25–36.
- [14] Cullum J., Binns J., Lonsdale M., Abbassi R., Garaniya V., 2018. Risk-Based Maintenance Scheduling with application to naval vessels and ships. *Ocean Engineering* 148, 476–485.
- [15] Deb K., 2001. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. John Wiley & Sons.
- [16] Dekker R., 1996. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 51(3), 229–240.
- [17] Erguido A., Márquez A. C., Castellano E., Flores J. L., Gómez Fernández J. F., 2020. Reliability-based advanced maintenance modelling to enhance rolling stock manufacturers’ objectives. *Computers & Industrial Engineering*, 106436.
- [18] Gerigk M., 2012. Ocena ryzyka i zarządzanie bezpieczeństwem w czasie katastrofy obiektu oceanotechnicznego lub statku na morzu. *Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport*
- [19] Gill A., Kadziński A., Kalinowski D., 2011. Identyfikacja zagrożeń związanych z użytkowaniem drzwi podczas eksploatacji tramwajów typu 105Na. (12), 11.
- [20] Gill A., 2017. Optimisation of the technical object maintenance system taking account of risk analysis results. *EiN* 19(3), 420–431.
- [21] Gill A., 2018. Warstwowe modele systemów bezpieczeństwa do zastosowania w transporcie szynowym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.

- [22] Grabski F., 2002. Semi-Markowskie modele niezawodności i eksploatacji. Instytut Badań Systemowych PAN.
- [23] Grabski F., Jaźwiński J., 2009. Funkcje o losowych argumentach w zagadnieniach niezawodności, bezpieczeństwa i logistyki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [24] Grabski F., 2015. Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. Elsevier Inc.
- [25] Grabski F., 2019. Random models of accidents at Baltic Port and sea water areas. Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars(Volume 10 (1))
- [26] Hansel J., 2011. Kształtowanie bezpieczeństwa systemów maszynowych transportu pionowego w kopalniach Problemy Eksploatacji nr 1/2011, Radom.
- [27] Hoffmann C. H., 2017. Assessing Risk Assessment. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [28] Hu H., Cheng G., Li Y., Tang Y., 2009. Risk-based maintenance strategy and its applications in a petrochemical reforming reaction system. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22(4), 392–397.
- [29] ISO/IEC 31010:2009, Risk Management - Risk Assessment Techniques
- [30] Jacyna M., 2009. Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [31] Jamroz K., Kadziński A., Chruzik K., Szymanek A., Gucma L., Skorupski J., 2010. Trans-Risk - An Integrated Method for Risk Management in Transport. Journal of Konbin 13(1), 209–220.
- [32] Jamshidi A., Faghieh Roohi S., Núñez A., Babuska R., De Schutter B., Dollevoet R., Li Z., 2016. Probabilistic Defect-Based Risk Assessment Approach for Rail Failures in Railway Infrastructure. IFAC-PapersOnLine 49(3), 73–77.
- [33] Jaźwiński J., Grabski F., 2003. Niektóre problemy modelowania systemów transportowych. Biblioteka Problemów Eksploatacji.
- [34] Kadziński A., Gill A., Pruciak K., 2011. Rozpoznawanie źródeł zagrożeń jako ważny element metod zarządzania ryzykiem w komunikacji tramwajowej. TTS Technika Transportu Szynowego 9, 4.
- [35] Khademi N., Babaei M., Schmöcker J.-D., Fani A., 2018. Analysis of incident costs in a vulnerable sparse rail network – Description and Iran case study. Research in Transportation Economics 70, 9–27.
- [36] Khan F. I., Haddara M. M., 2003. Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16(6), 561–573.
- [37] Kielecki J., Prawie wszystko o autobusach. Samochody specjalne (4/1997)
- [38] Kierzkowski A., 2013. Model procesu eksploatacji obiektu technicznego. Autobusy 3/2013, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 9.
- [39] Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C. D., Vecchi M. P., 1983. Optimization by simulated annealing. Science Vol. 220(4598)
- [40] Knopik L., Landowski B., Perczyński D., 2002. Prognozowanie stanu systemu eksploatacji transformatorów rozdzielczych na podstawie badań modelowych. Zagadnienia eksploatacji maszyn 4 (132)(37)
- [41] Knopik L., 2010. Metoda wyboru efektywnej strategii eksploatacji obiektów technicznych.

- [42] Knopik L., Migawa K., 2017. Multi-state model of maintenance policy. *EiN* 20(1), 125–130.
- [43] Knopik L., Migawa K., 2017. Optimal age-replacement policy for non-repairable technical objects with warranty. *EiN* 19(2), 172–178.
- [44] Kobaszyńska-Twardowska A., 2017. Zarządzanie ryzykiem zagrożeń na przejazdach kolejowych Poznań: Politechnika Poznańska.
- [45] Kołowrocki K., Soszyńska J., 2010. Optymalizacja procesów eksploatacji złożonych systemów technicznych. *Problemy Eksploatacji* (1–2010)
- [46] Konak A., Coit D. W., Smith A. E., 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety* 91(9), 992–1007.
- [47] Kumamoto H., 2007. Satisfying safety goals by probabilistic risk assessment. Springer.
- [48] Kumar A., Saini M., 2018. Comparison of reliability characteristics of two semi-Markov repairable systems under degradation and abnormal environment. *Life Cycle Reliab Saf Eng* 7(4), 257–268.
- [49] Landowski B., Woropay M., Neubauer A., 2004. Sterowanie niezawodnością w systemach transportowych. Instytut Technologii Eksploatacji.
- [50] Legutko S., 2004. Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń. WSiP.
- [51] Lewitowicz J., 2010. Ryzyko w eksploatacji statków powietrznych. *Problemy Eksploatacji* (2–2010)
- [52] Loska A., 2011. Przegląd modeli ocen eksploatacyjnych systemów technicznych. Opole: Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie 2, 10.
- [53] Loska A., 2012. Remarks about modelling of maintenance processes with the use of scenario techniques. *Science and Technology* (2), 7.
- [54] Macha E., 2001. Niezawodność maszyn. Politechnika Opolska (skrypt nr 237), 110.
- [55] Matuszak Z., 2012. Badania rozkładów uszkodzeń systemów siłowni okrętowych. ADVESO.
- [56] Migawa K., 2013. Sterowanie gotowością w systemach eksploatacji środków transportu. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego.
- [57] Migawa K., Knopik L., 2015. Metoda oceny gotowości podsystemu utrzymania ruchu. *Logistyka* (4), 8.
- [58] Migawa K., Knopik L., Neubauer A., Sołtysiak A., 2017. Applying Pareto Frontier to Determine Control Strategy of Technical Objects Operation Process. *Journal of KONBiN* 44(1), 37–57.
- [59] Migawa K., Knopik L., Sołtysiak A., Kolber P., 2017. The method of risk assessment in transport systems. *Engineering Mechanics*
- [60] Migawa K., Sołtysiak A., Czyżewska M., 2019. Method of assessment of the transport system functioning with the application of the simulation model of the operating process. *MATEC Web Conf.* 302, 01016.
- [61] Miśkiewicz K., Wojacek A., Wojtas P., 2011. Problemy niezawodności kopalnianych systemów telekomunikacyjnych. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* (11(489))
- [62] Młyńczak M., 2012. Metodyka badań eksploatacyjnych obiektów mechanicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

- [63] Nam D., Park C. H., 2000. Multiobjective Simulated Annealing: A Comparative Study to Evolutionary Algorithms. *International Journal of Fuzzy Systems*, Springer, 11.
- [64] Niewczas A., Móravski Ł., Dębicka E., Borucka A., 2019. Commercial Vehicles Incapacity Risk Analysis in the Transport Company. *Journal of KONBiN* 49(4), 321–340.
- [65] Niu G., Yang B.-S., Pecht M., 2010. Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 95(7), 786–796.
- [66] Niziński S., Żółtowski B., 2002. Zarządzanie eksploatacją obiektów technicznych za pomocą rachunku kosztów. *Makar - B.Ż. Zielonka* 31B, 139.
- [67] Niziński S., Kolator B., 2006. Ocena efektywności funkcjonowania systemów eksploatacji pojazdów i maszyn z wykorzystaniem procesów Markowa. (8)
- [68] Nord Stream AG, 2009. Espoo Report - Chapter 5, Risk Assessment Nord Stream.
- [69] Paś J., 2017. Model sterowania procesem eksploatacji złożonego obiektu technicznego. *Biuletyn WAT LXVI*(1), 12.
- [70] PKN-ISO Guide 73:2012, Zarządzanie ryzykiem. Terminologia.
- [71] PN-93/N-50191, Słownik terminologiczny elektryki - Niezawodność, jakość usługi
- [72] PN-EN ISO 12100:2012, Bezpieczeństwo maszyn. Ogólne zasady projektowania. Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka.
- [73] PN-IEC 60300-3-9:1999, Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań. Analiza ryzyka w systemach technicznych.
- [74] PN-N-18002:2011, Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego.
- [75] Praca zbiorowa pod red. D. Wróblewskiego, 2015. Zarządzanie ryzykiem. Przegląd wybranych metodyk. Poland: CNBOP-PIB.
- [76] Praca zbiorowa pod red. M. Woropaya, 1996. Podstawy Racjonalnej Eksploatacji Maszyn. Instytut Technologii Eksploatacji.
- [77] Praca zbiorowa pod red. T. Szczuraszka, 2006. Bezpieczeństwo Ruchu Miejskiego. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [78] Radkowski S., 2003. Podstawy Bezpiecznej Techniki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [79] Radkowski S., 2006. Wykorzystanie informacji diagnostycznej w zorientowanej na bezpieczeństwo eksploatacji maszyn. *Diagnostyka* 2 (38)/2006
- [80] Rozenek R., Przasnyski J., Gemza M., 2015. Kwalifikacja zdarzeń drogowych oraz polecenia i sygnały wydawane przez policjanta na miejscu zdarzenia drogowego. *Zakład Ruchu Drogowego (Materiały Dydaktyczne 142)*, 44.
- [81] Rudnicki J., 2015. Application Issues of the Semi-Markov Reliability Model. *Polish Maritime Research* 22(1), 55–64.
- [82] Rusin A., Wojaczek A., 2012. Optimization of power machines maintenance intervals taking the risk into consideration. *Science and Technology* (1), 5.
- [83] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., 1999. Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [84] Rutkowski T., 2005. Teoria niezawodności i bezpieczeństwa. Politechnika Gdańska, 84.

- [85] Serafini P., 1994. Simulated Annealing for Multi Objective Optimization Problems. [W:] Multiple Criteria Decision Making, Tzeng G.H., Wang H.F., Wen U.P., Yu P.L., (red.) New York, NY: Springer New York, 283–292.
- [86] Sitarz M., Chrużik K., Wachnik R., 2011. Zintegrowany system zarządzania bezpieczeństwem w transporcie kolejowym (8). Ocena ryzyka. TTS Technika Transportu Szynowego 18(5–6), 5.
- [87] Słowiński B., 2010. Inżynieria Eksploatacji Maszyn. 268.
- [88] Sołtysiak A., Migawa K., 2019. Application of the Pareto front for risk control in the transport system. MATEC Web Conf. 302, 01023.
- [89] Sołtysiak A., Migawa K., 2019. Metoda analizy ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie autobusowej komunikacji miejskiej. [W:] Nauka niejedno ma imię, Bydgoszcz: Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego,
- [90] Sołtysiak A., Migawa K., 2019. Zastosowanie procesów semi-Markowa do oceny efektywności działania autobusów miejskich. [W:] Nauka niejedno ma imię, Bydgoszcz: Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego,
- [91] Stapelberg R. F., 2009. Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design. Springer London.
- [92] Strzała-Osuch K., 2006. Ekologiczne bariery rozwoju gospodarczego. Problemy wzrostu gospodarczego we współczesnych gospodarkach , Printgroup, Szczecin.
- [93] Szczepankiewicz E. I., 2016. Wykorzystanie punktowej metody oszacowania ryzyka operacyjnego w instytucjach finansowych. Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach (298)
- [94] Szkoła M., 2012. Wskaźniki niezawodności środków transportu szynowego. Logistyka (3), 8.
- [95] Szlachic B., 2014. Analiza ryzyka i zarządzania ryzykiem jako element systemu zarządzania kryzysowego w organizacji. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach, Administracja i Zarządzanie (103)
- [96] Szpytko J., 2010. Exploitation process of transport devices based on preventive strategy approach. Scientific Journals. Maritime University of Szczecin, 5.
- [97] Szrama S., 2019. Zarządzanie ryzykiem zagrożeń w systemie utrzymania samolotów wielozadaniowych F-16 Poznań: Politechnika Poznańska.
- [98] Szwedzka K., 2019. Metodyka badań efektywności eksploatacji złożonych systemów technicznych w przedsiębiorstwach branży meblarskiej. Politechnika Poznańska.
- [99] Szymanek A., 2008. Risk acceptance principles in transport. Journal of KONBiN (2(5))
- [100] Tereszkiwicz K., Bukala, B., 2016. Ryzyko występowania zdarzeń drogowych z udziałem zwierząt na terenie woj. podkarpackiego i możliwości jego ograniczania. Autobusy (12), 5.
- [101] Tomaszek H., Wróblewski, M., 2002. Metoda oceny efektywności eksploatacji wojskowych statków powietrznych. Zagadnienia eksploatacji maszyn 37(4 (132))
- [102] Urbański M., 2009. Rozumowania abdukcyjne: modele i procedury. Wydawnictwo Naukowe UAM.
- [103] Ustawa z dnia 6 czerwca 1997 r. Kodeks karny, 1997. Dz. U. 1997 Nr 88 poz. 553.

- [104] Vakil-Baghmisheh M.-T., Navarbafe A., 2008. A modified very fast Simulated Annealing algorithm. [W:] 2008 International Symposium on Telecommunications, Tehran: IEEE, 61–66.
- [105] Woropay M., 1998. Metoda oceny realizacji procesu eksploatacji w systemie transportowym. Akademia Techniczno-Rolnicza.
- [106] Woropay M., Knopik L., Landowski B., 2001. Modelowanie procesów eksploatacji w systemie transportowym. Biblioteka Problemów Eksploatacji.
- [107] Woropay M., Żurek J., Migawa K., 2003. Model oceny i kształtowania gotowości operacyjnej podsystemu utrzymania ruchu w systemie transportowym. Instytut Technologii Eksploatacji.
- [108] Woropay M., Bojar P., 2010. Ocena bezpieczeństwa działania systemu transportowego na podstawie analizy uszkodzeń autobusów. Biuletyn WAT Vol. LIX, nr 4, 18.
- [109] Woropay M., Bojar P., 2010. Identyfikacja zdarzeń niepożądanych w systemie transportu miejskiego. Problemy Eksploatacji (1–2010)
- [110] Zajac R., 2017. Podejście oparte na ryzyku w świetle wymagań normy PN-EN ISO 9001:2015-10. Maszyny Górnicze (3), 12.
- [111] ZeinEldin R. A., 2012. An improved simulated annealing approach for solving the constrained optimization problems. Th International Conference on INFOrmatics and Systems , 5.
- [112] Zhan S., Lin J., Zhang Z., Zhong Y., 2016. List-Based Simulated Annealing Algorithm for Traveling Salesman Problem. Computational Intelligence and Neuroscience 2016, 1–12.
- [113] Żak J., 2019. Optymalizacja systemu obsługi technicznej statków powietrznych w funkcji intensywności ich użytkowania. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych.
- [114] Żółtowski B., Niziński S., 2002. Modelowanie procesów eksploatacji maszyn. Makar - B.Z. Zielonka 31B, Białe Błota.
- [115] Żółtowski B., Kałaczyński T., 2011. Poszukiwanie dróg racjonalnej eksploatacji maszyn. Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą (48)
- [116] Żółtowski B., 2011. Bezpieczeństwo systemów w ujęciu diagnostyki. (4), 8.
- [117] Żurek J., Borucka A., Ziółkowski J., 2016. Analysis of the military vehicles operating process by means of Markov processes. Journal of KONES Powertrain and Transport 23(2), 12.

STRESZCZENIE

Metoda oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu

mgr inż. Agnieszka Sołtysiak

Słowa kluczowe: ocena ryzyka, system eksploatacji, zdarzenie niepożądane

Zakres pracy obejmuje zagadnienia teoretyczne i badawcze dotyczące oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji autobusów miejskich realizujących przewóz pasażerów na terenie wybranej aglomeracji miejskiej. Treść rozprawy została podzielona na siedem głównych rozdziałów oraz wykaz literatury.

Pierwsza część pracy stanowi wprowadzenie do tematyki racjonalnej eksploatacji środków transportu oraz uzasadnienie podjęcia niniejszej problematyki badań. Jako cel realizowanej rozprawy wskazano opracowanie metody oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji środków transportu i weryfikację możliwości jej zastosowania do racjonalnego sterowania procesem eksploatacji przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiednio wysokiego poziomu gotowości użytkowanych obiektów technicznych. W tej części omówiono pojęcia dotyczące analizy i oceny ryzyka w aspekcie eksploatacji obiektów technicznych oraz dokonano przeglądu literatury w zakresie zastosowania metod modelowania i poszukiwania rozwiązań optymalnych w systemach eksploatacji środków transportu.

W części drugiej rozprawy omówiono obszar badawczy: cel i zakres realizowanych badań eksploatacyjnych oraz identyfikację badanego systemu eksploatacji i realizowanego w nim procesu eksploatacji autobusów miejskich.

Na podstawie wyników zrealizowanych badań opracowano graf stanów modelu procesu eksploatacji oraz wyznaczono wartości parametrów charakteryzujących realizowany proces eksploatacji autobusów miejskich.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały czwarty i piąty, w których przedstawiono opracowaną metodę oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz wskazano jej użyteczność w aspekcie eksploatacji rzeczywistych obiektów technicznych. Dokonano analizy ryzyka, w tym m.in. szacowania ryzyka z zastosowaniem zbudowanego modelu semimarkowskiego. Zaproponowano sposób ewaluacji ryzyka, w efekcie której wyznaczone ryzyko przypisuje się do kategorii akceptowalnej, tolerowalnej lub nieakceptowalnej. Następnie zbudowano model decyzyjny wyboru najlepszych (suboptymalnych) strategii sterowania badanym procesem przy uwzględnieniu dwóch kryteriów decyzyjnych – ryzyka oraz gotowości systemu technicznego do realizacji przydzielonych zadań przewozowych. Wybór tej strategii dokonywany jest za pomocą opracowanego programu komputerowego przy zastosowaniu algorytmu symulowanego wyżarzania oraz frontu Pareto.

Rozdział szósty zawiera analizę wyników badań w oparciu o rzeczywiste dane pochodzące z systemu eksploatacji autobusów miejskich. Wyliczono pięć wartości ryzyka (dla różnych zagrożeń) oraz wartość łączną ryzyka dla badanego systemu eksploatacji i sklasyfikowano te wartości w wyznaczonych kategoriach ryzyka. Dla rozpatrywanego systemu eksploatacji i pojedynczego obiektu technicznego wyliczono gotowość do realizacji przydzielonych zadań przewozowych. Wytypowano zbiór możliwych rozwiązań problemu decyzyjnego. Spośród wskazanych możliwości wybrano strategię znajdującą się na froncie Pareto, pod warunkiem osiągnięcia co najmniej tolerowalnej kategorii ryzyka oraz wymaganej gotowości do realizacji zadań przewozowych.

Rozprawa doktorska kończy się podsumowaniem i wnioskami wynikającymi z jej realizacji oraz koncepcją podjęcia dalszych badań związanych z problematyką eksploatacji złożonych systemów technicznych.

ABSTRACT

Method of risk assessment of occurrence of undesirable events in the system of operation and maintenance of transport means

M.Sc. Agnieszka Soltysiak

Key words: risk assessment, operation and maintenance system, undesirable event

The scope of the work covers theoretical and research issues concerning the risk assessment of undesirable events in the operation and maintenance system of city buses carrying passengers in the selected urban agglomeration. The content of the dissertation has been divided into seven main chapters and a list of literature.

The first part of the work is an introduction to the rational use of transport means and the justification leading to the research issues. The aim of the dissertation was to develop a risk assessment method for the undesirable events in the system of operation and maintenance of transport means and to verify the possibility of its use for rational control of the operation process, while ensuring a sufficiently high level of availability of the technical facilities used. The theoretical part discusses the most important concepts of risk analysis and assessment in terms of the operation of technical facilities, and a review of the literature on the application of modeling methods and the search for optimal solutions in the operation and maintenance systems of transport means.

The second part of the dissertation is the description of the research area, including: the purpose and scope of the conducted operational research and identification of the tested operational system and the process of operating city buses in it. Based on the results of the research, a state graph of the operation

process model was developed and the values of the basic parameters characterizing the operation process of city buses were determined.

The main part of the work included in the fourth and fifth chapters in which the developed risk assessment method is presented and possibilities to use it in terms of the operation and maintenance of real technical facilities are indicated. A risk analysis was carried out, including estimating the risk with the use of a semi-Markov model. A method of evaluation of the obtained value of the risk of occurrence of undesirable events was proposed, as a result of which the designated risk is assigned to an acceptable, tolerable or unacceptable category. Then, a decision model for the selection of the best (suboptimal) control strategy for the analyzed process was built, taking into account two decision criteria - the risk and the technical system's availability to perform the assigned transport tasks. The selection of this strategy is performed numerically with the use of developed computer program, using the simulated annealing algorithm and the Pareto front.

Chapter six contains an analysis of the results of model tests based on real data from the city bus operation and maintenance system. For the developed data, 5 risk values relating to various hazards and the total value of risk generated in the analyzed system were calculated. At the stage of evaluation, these risks were classified into the acceptable and tolerable categories. For the considered operation system and a single technical object (city bus), the availability to perform the assigned transport tasks was calculated. Taking into account the assumed criteria for selecting the best decisions to control the operation and maintenance process, a set of possible solutions to the decision problem was obtained. From among the indicated possibilities, the strategies located on the Pareto front were selected, provided that the risk category was at least tolerable and the required availability to perform transport tasks was achieved.

The doctoral dissertation ends with a summary and conclusions resulting from its implementation and the concept of undertaking further research related to the issues of operation and maintenance of complex technical systems.