



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**
Wydział Inżynierii Mechanicznej

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INŻYNIERIA MECHANICZNA**

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Agnieszka Sołtysiak

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

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE
DYSCYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA

PROMOTOR

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

BYDGOSZCZ, 2022

1. WPROWADZENIE

Prawidłowe funkcjonowanie złożonych systemów technicznych, w tym transportowych, jest możliwe pod warunkiem zapewnienia odpowiedniego poziomu jednego z nadrzędnych kryteriów ich funkcjonowania – 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 umożliwiających wybór racjonalnych decyzji w systemie eksploatacji środków transportu, uwzględniających wyniki oceny ryzyka, przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganych poziomów niezawodności i gotowości eksploatowanych środków transportu.

W literaturze istnieje wiele opracowań stanowiących cząstkowe rozwiązania problemu oceny ryzyka działania złożonych systemów eksploatacji obiektów technicznych. Metody te pozwalają na ocenę, kontrolowanie i redukowanie 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, np. z kryterium gotowości obiektów technicznych. Należy zatem poszukiwać kompleksowych rozwiązań i 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.

2. CEL 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.

Dla realizacji celu głównego przyjęto następujące cele szczegółowe:

- 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.

3. BADANIA EKSPLOATACYJNE

3.1. CEL BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

Celem przeprowadzonych badań eksploatacyjnych było 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.

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. Miejskie Zakłady Komunikacyjne odpłatnie świadczą usługi przewozu pasażerów i ich bagażu komunikacją autobusową i tramwajową na wyznaczonych trasach komunikacyjnych zgodnie z ustalonym rozkładem jazdy.

W Zakładzie Autobusowym realizowane są przede wszystkim zadania dotyczące:

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

W badanym systemie eksploatacji środków transportu użytkowanych jest 149 autobusów miejskich, dwóch marek: Mercedes Benz (75 autobusów) oraz Solaris (74 autobusy). Średni wiek badanych autobusów realizujących zadania przewozowe na terenie analizowanej aglomeracji miejskiej w roku 2016 wynosił 5,4 lat.

3.3. IDENTYFIKACJA PROCESU EKSPLOATACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU

W analizowanym procesie eksploatacji wykonywany jest szereg czynności mających na celu bezpieczny i terminowy przewóz pasażerów. Realizację przydzielonych zadań przewozowych zakłócają zdarzenia niepożądane występujące w sposób losowy.

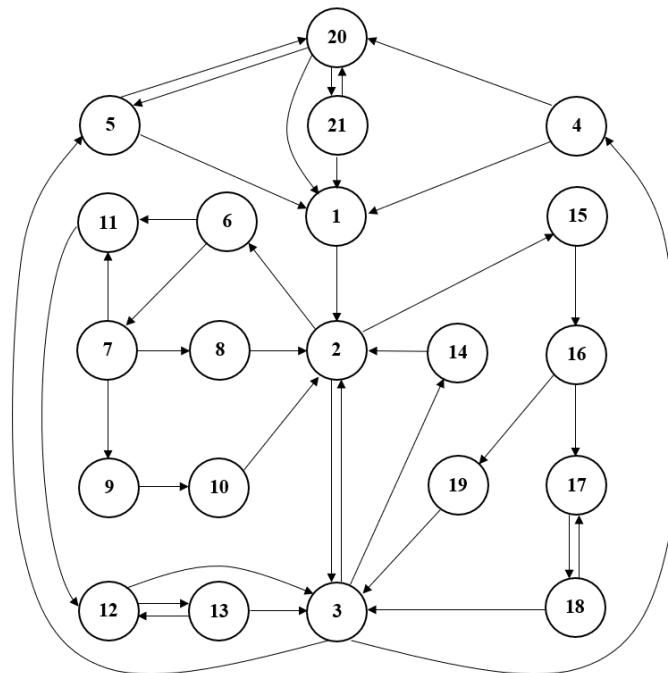
W ramach identyfikacji analizowanego procesu eksploatacji autobusów miejskich w pracy wyróżniono i opisano główne składowe tego procesu, do których przede wszystkim zalicza się:

- użytkowanie,
- naprawę realizowaną na trasie przez jednostki pogotowia technicznego (PT),
- obsługę w dniu użytkowania (obsługa codzienna OC),
- okresową obsługę techniczną OT,
- naprawę realizowaną na stanowiskach w stacji obsługi,
- diagnozowanie.

Następnie wyszczególniono istotne z punktu widzenia celu badań stany eksploatacyjne oraz opracowano graf stanów modelu analizowanego procesu eksploatacji (rysunek 3.1). 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 wyników badań tego modelu zastosowano dane eksploatacyjne dotyczące 30. losowo wybranych autobusów miejskich. Celem opracowania modelu 10-stanowego było przedstawienie analizowanego procesu eksploatacji w sposób uproszczony, a wyniki badań tego modelu posłużyły do opracowania założeń do budowy 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 [10–12, 14, 15]. W kolejnych etapach prac podjęto próby analizy badanego procesu eksploatacji w bardziej szczegółowy sposób i w tym celu opracowano 16- i 19-stanowe modele analizowanego procesu eksploatacji. Wyniki badań ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych otrzymane na podstawie zbudowanego 19-stanowego modelu procesu eksploatacji przedstawiono w pracy [16].

Celem budowy modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich, uwzględniającego 21 stanów eksploatacyjnych, była potrzeba zwiększenia jego szczegółowości oraz wnikliwego zbadania opracowanego modelu 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. Wyniki badań modelu 21-

stanowego zostały opracowane na podstawie danych eksploatacyjnych dotyczących 149 autobusów miejskich eksploatowanych w badanym systemie w analizowanym przedziale czasu.



Rys. 3.1. Graf stanów modelu procesu eksploatacji środków transportu (1-postój na placu zajezdni autobusowej, 2-realizacja zadania przewozowego, 3-zaopatrzenie 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)

3.4. METODA BADAWCZA

W ramach realizowanej rozprawy doktorskiej badania eksploatacyjne przeprowadzono metodą eksperymentu biernego w naturalnych warunkach eksploatacji autobusów miejskich użytkowanych w rozpatrywanym systemie 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. W rezultacie zebrano i opracowano dane dotyczące:

- eksploatowanych w badanym systemie autobusów miejskich,
- realizacji zadań przewozowych,
- uszkodzeń autobusów miejskich eksploatowanych w badanym systemie,
- kolizji i wypadków badanych autobusów miejskich,
- interwencji jednostek pogotowia technicznego,
- napraw,
- obsług codziennych i okresowych,
- diagnozowania stanu środków transportu.

3.5. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

Przetworzenie uzyskanych danych źródłowych dotyczących badanego systemu eksploatacji środków transportu umożliwiło przeprowadzenie analizy statystycznej zbioru danych źródłowych oraz wyznaczenie wartości parametrów wejściowych opracowanych modeli matematycznych 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 eksploatacji,
- 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 i kosztów generowanych w stanach procesu eksploatacji.

Dla zmiennych losowych oznaczających czasy trwania poszczególnych stanów rozpatrywanego modelu procesu eksploatacji, na podstawie danych z badań, wyznaczono wartości wybranych parametrów statystycznych (wartości średniej, odchylenia standardowego, liczebności, wartości minimalnej i maksymalnej, współczynnika zmienności, rozstępu w próbie), które przedstawiono w rozprawie doktorskiej.

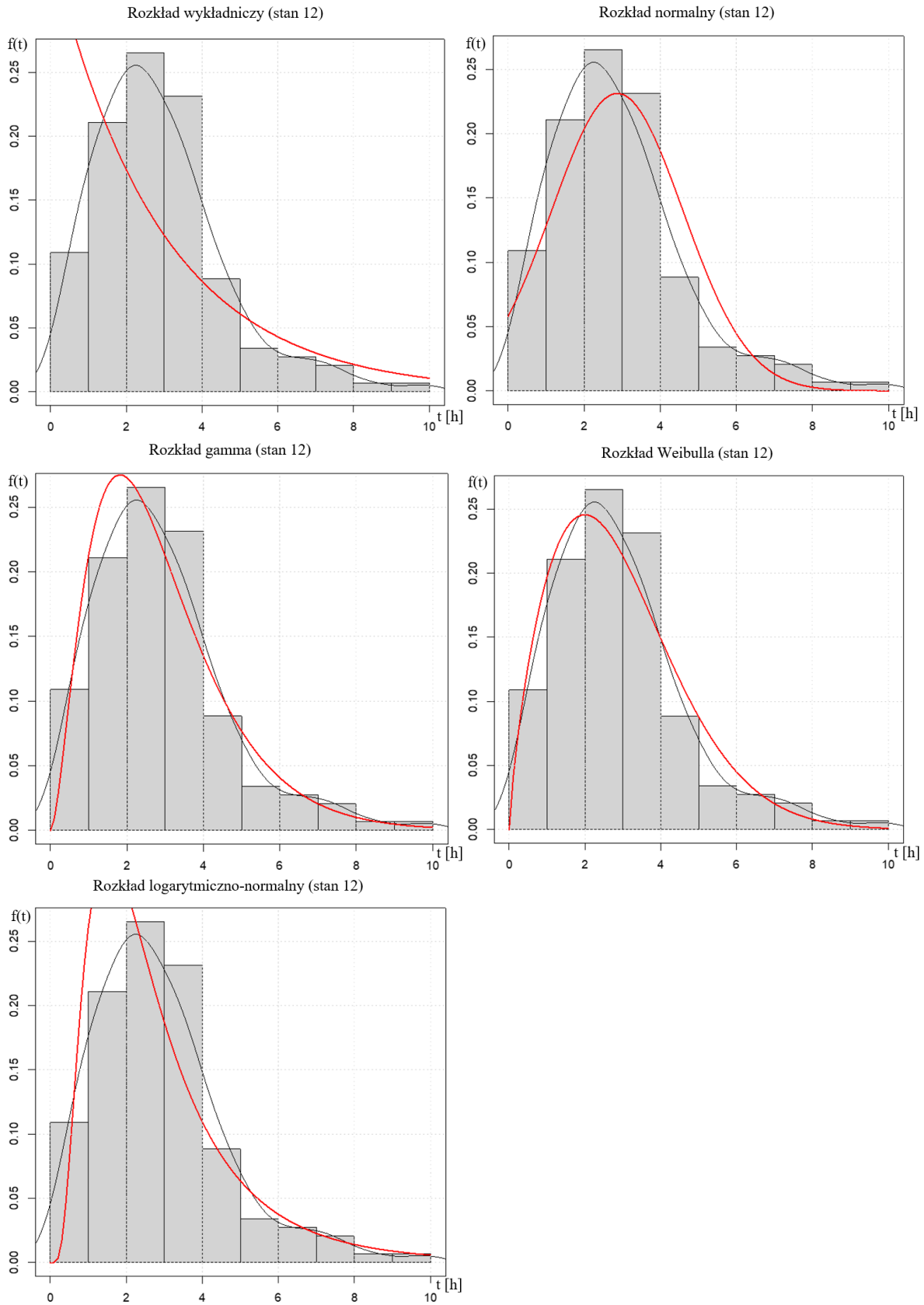
Dla każdego z wyróżnionych stanów modelu procesu eksploatacji S_i , $i=1,2,\dots,21$, zweryfikowano hipotezę zerową H_0 , że empiryczny rozkład zmiennej losowej T_i , $i=1,2,\dots,21$, oznaczającej czas trwania i -tego stanu procesu jest zgodny z następującymi rozkładami hipotetycznymi (teoretycznymi):

- 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 wybranego stanu eksploatacyjnego (stan 12 – naprawa w stacji obsługi po uszkodzeniu w trakcie realizacji zadania przewozowego) rozpatrywanego procesu eksploatacji środków transportu przedstawiono w tabeli 3.1 oraz na rysunku 3.2. Badania przeprowadzono dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

Tab. 3.1. 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.
parametr rozkładu wykładniczego λ	0,349	-	-	-	-
wartość średnia $\bar{\theta}$	-	2,868	-	-	-
odchylenie standardowe σ	-	1,725	-	-	-
parametr kształtu k	-	-	2,723	1,753	0,667
parametr skali s	-	-	0,95	3,23	0,859
poziom istotności α	0,05				
wartość p-value	0	0,105	0,477	0,775	0,054
statystyka testu K-S D	0,221	0,1	0,069	0,055	0,111
hipoteza zerowa H_0	0	1	1	1	1



Rys. 3.2. 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}

Na podstawie wyników przeprowadzonych testów zgodności rozkładu empirycznego z wybranymi rozkładami teoretycznymi, stwierdzono brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności rozkładu empirycznego rozpatrywanej zmiennej losowej θ_{12} z następującymi 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 $\alpha = 0,05$).

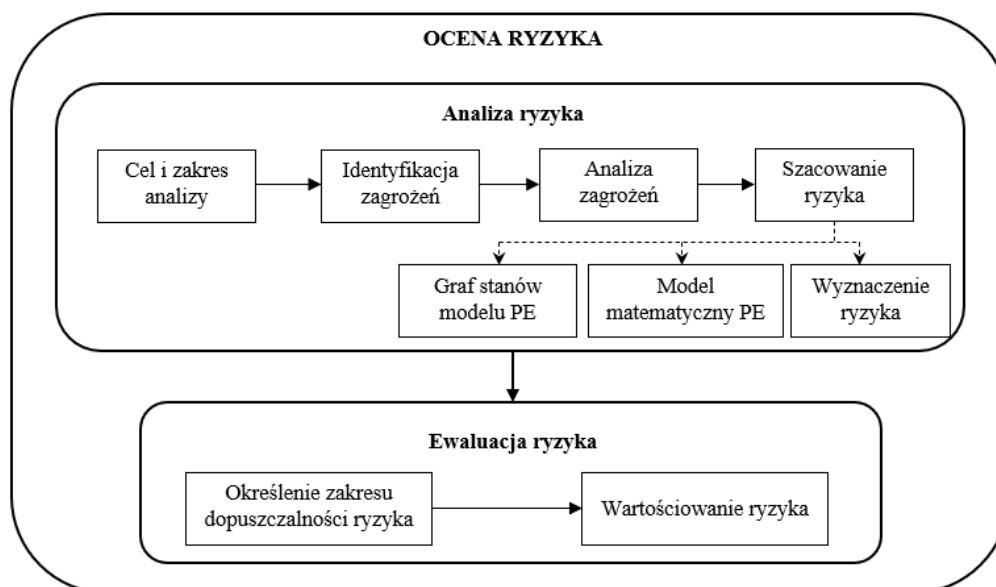
Na podstawie wyników analizy statystycznej danych eksploatacyjnych dotyczących wszystkich rozpatrywanych stanów oraz przeprowadzonych testów zgodności sformułowano następujące wnioski:

- 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.

4. METODA OCENY RYZYKA W BADANYM SYSTEMIE EKSPLOATACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU

W dysertacji opracowano procedurę postępowania w ocenie ryzyka prowadzącą do wyznaczenia wartości ryzyka dla każdego zdefiniowanego zagrożenia i przypisania tej wartości do odpowiedniej kategorii w procesie ewaluacji. Podstawowe elementy tej procedury w odniesieniu do badanego systemu eksploatacji środków transportu przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Procedura postępowania w ocenie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w badanym systemie eksploatacji środków transportu [opracowanie własne]

4.1. ANALIZA RYZYKA

Cel przeprowadzonej analizy ryzyka obejmował:

- identyfikację i klasyfikację zagrożeń i ich źródeł w obszarze badanego systemu eksploatacji środków transportu oraz w jego otoczeniu, które mogą mieć wpływ na powstanie zdarzeń niepożądanych,
- wyznaczenie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych dla każdego rozpatrywanego zagrożenia.

Źródła zagrożeń zidentyfikowane w badanym procesie eksploatacji dotyczą następujących zdarzeń niepożądanych: 1) uszkodzenia autobusu miejskiego i możliwości poniesienia strat w wyniku naprawy autobusu oraz 2) kolizji lub wypadku autobusu miejskiego i możliwości poniesienia strat w wyniku interwencji pogotowia technicznego oraz naprawy autobusu lub w wyniku konieczności wymiany autobusu na nowy obiekt. W ramach procedury identyfikacji zagrożeń na podstawie wymienionych zdarzeń, z zastosowaniem metody BHIP – identyfikacji zagrożeń wstecz [4], rozpoznano i sformułowano źródła zagrożeń oraz połączono je w grupy przyporządkowane określonym zdarzeniom niepożądanym, a następnie zdefiniowano zagrożenie.

Listy zdarzeń niepożądanych oraz odpowiadających im źródeł zagrożeń i zagrożeń przedstawiono w dysertacji. W badanym systemie eksploatacji wyodrębniono:

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

Zdarzenia niepożądane sformułowano następująco:

- A. Uszkodzenie autobusu miejskiego w trakcie realizacji zadania przewozowego oraz możliwość poniesienia strat w wyniku jego naprawy przez pogotowie techniczne bez utraty kursu.
- B. Uszkodzenie autobusu miejskiego w trakcie realizacji zadania przewozowego oraz możliwość poniesienia strat w wyniku jego naprawy przez pogotowie techniczne z utratą kursu.
- C. Uszkodzenie autobusu miejskiego w trakcie realizacji zadania przewozowego oraz możliwość poniesienia strat w wyniku jego naprawy w stacji obsługi po zjeździe awaryjnym lub holowaniu.
- D. Kolizja lub wypadek autobusu miejskiego oraz możliwość poniesienia strat w wyniku przeprowadzenia akcji interwencyjno-ratowniczej oraz naprawy uszkodzonego autobusu w stacji obsługi.
- E. Kolizja lub wypadek autobusu miejskiego oraz możliwość poniesienia strat w wyniku przeprowadzenia akcji interwencyjno-ratowniczej oraz konieczności wymiany uszkodzonego autobusu na nowy obiekt.

4.1.1. Szacowanie ryzyka

W pracy przyjęto, że modelem matematycznym procesu eksploatacji środków transportu jest proces losowy $X(t)$. Do matematycznego modelowania badanego procesu wybrano teorię procesów semi-Markowa. Teoretyczne podstawy modelowania procesów markowskich przedstawiono w pracach [2, 5–9]. Na podstawie opracowanego grafu stanów modelu procesu eksploatacji (rys. 3.1), zbudowano model matematyczny tego procesu, w ramach którego wyznaczono:

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

Wyżej wymienione etapy budowy modelu matematycznego zostały szczegółowo przedstawione i omówione w rozprawie. Wzory opisujące prawdopodobieństwa p_i^* dla rozkładu granicznego procesu semi-Markowa przedstawiają się następująco:

$$\left. \begin{aligned}
p_1^* &= \frac{[1 - A \cdot (p_{3,2} + p_{14,2} \cdot p_{3,14}) - p_{6,7} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{8,2} \cdot p_{7,8} + p_{10,2} \cdot p_{9,10} \cdot p_{7,9})] \cdot \bar{\theta}_1}{p_{1,2} \cdot M} \\
p_2^* &= \frac{\bar{\theta}_2}{M} \\
p_3^* &= \frac{A \cdot \bar{\theta}_3}{M} \\
p_4^* &= \frac{A \cdot p_{3,4} \cdot \bar{\theta}_4}{M} \\
p_5^* &= \frac{A \cdot (B \cdot p_{20,5} + p_{3,5}) \cdot \bar{\theta}_5}{M} \\
p_6^* &= \frac{p_{2,6} \cdot \bar{\theta}_6}{M} \\
p_7^* &= \frac{p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot \bar{\theta}_7}{M} \\
p_8^* &= \frac{p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,8} \cdot \bar{\theta}_8}{M} \\
p_9^* &= \frac{p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,9} \cdot \bar{\theta}_9}{M} \\
p_{10}^* &= \frac{p_{2,6} \cdot p_{6,7} \cdot p_{7,9} \cdot p_{9,10} \cdot \bar{\theta}_{10}}{M} \\
p_{11}^* &= \frac{p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7}) \cdot \bar{\theta}_{11}}{M} \\
p_{12}^* &= \frac{p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7}) \cdot \bar{\theta}_{12}}{(1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}) \cdot M} \\
p_{13}^* &= \frac{p_{12,13} \cdot p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7}) \cdot \bar{\theta}_{13}}{(1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}) \cdot M} \\
p_{14}^* &= \frac{A \cdot p_{3,14} \cdot \bar{\theta}_{14}}{M} \\
p_{15}^* &= \frac{p_{2,15} \cdot \bar{\theta}_{15}}{M} \\
p_{16}^* &= \frac{p_{2,15} \cdot p_{15,16} \cdot \bar{\theta}_{16}}{M} \\
p_{17}^* &= \frac{p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15} \cdot \bar{\theta}_{17}}{(1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}) \cdot M} \\
p_{18}^* &= \frac{p_{17,18} \cdot p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15} \cdot \bar{\theta}_{18}}{(1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}) \cdot M} \\
p_{19}^* &= \frac{p_{16,19} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15} \cdot \bar{\theta}_{19}}{M} \\
p_{20}^* &= \frac{A \cdot B \cdot \bar{\theta}_{20}}{M} \\
p_{21}^* &= \frac{A \cdot B \cdot p_{20,21} \cdot \bar{\theta}_{21}}{M}
\end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
M &= \frac{[1 - A \cdot (p_{3,2} + p_{14,2} \cdot p_{3,14}) - p_{6,7} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{8,2} \cdot p_{7,8} + p_{10,2} \cdot p_{9,10} \cdot p_{7,9})] \cdot \bar{\theta}_1}{p_{1,2}} + \bar{\theta}_2 + \\
&+ A \cdot [\bar{\theta}_3 + p_{3,4} \cdot \bar{\theta}_4 + p_{3,5} \cdot \bar{\theta}_5 + B \cdot (\bar{\theta}_5 \cdot p_{20,5} + \bar{\theta}_{20} + p_{20,21} \cdot \bar{\theta}_{21})] + \\
&+ \frac{p_{11,12} \cdot p_{2,6} \cdot (p_{6,11} + p_{7,11} \cdot p_{6,7})}{1 - p_{13,12} \cdot p_{12,13}} \cdot (\bar{\theta}_{12} + \bar{\theta}_{13} \cdot p_{12,13}) + \\
&+ \frac{p_{16,17} \cdot p_{15,16} \cdot p_{2,15}}{1 - p_{18,17} \cdot p_{17,18}} \cdot (\bar{\theta}_{17} + \bar{\theta}_{18} \cdot p_{17,18}) + A \cdot p_{3,14} \cdot \bar{\theta}_{14} + \\
&+ p_{2,15} \cdot [\bar{\theta}_{15} + p_{15,16} \cdot (\bar{\theta}_{16} + p_{16,19} \cdot \bar{\theta}_{19})] + p_{2,6} \cdot \\
&\cdot [\bar{\theta}_6 + p_{6,11} \cdot \bar{\theta}_{11} + p_{6,7} \cdot (\bar{\theta}_7 + \bar{\theta}_8 \cdot p_{7,8} + p_{7,11} \cdot \bar{\theta}_{11} + p_{7,9} \cdot (\bar{\theta}_9 + p_{9,10} \cdot \bar{\theta}_{10}))]
\end{aligned} \quad (4.2)$$

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, wyznaczane w odniesieniu do pojedynczego (uśrednionego) obiektu technicznego (autobusu miejskiego) w przeliczeniu na jednostkę czasu w [PLN/h], przedstawiono poniżej:

$$r = \sum_{i \in S_N} p_i^* \cdot c_i \left[\frac{PLN}{h} \right] \quad (4.3)$$

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.

Identyfikacja i przeprowadzona analiza zagrożeń oraz zgromadzona wiedza w zakresie badań nad ryzykiem na podstawie literatury, np. [1, 3, 17], uzasadnia podział ryzyka ze względu na wyodrębnione zagrożenia. Odnosząc się do 5 wytypowanych zagrożeń istniejących w badanym systemie eksploatacji, w pracy rozpatrzono 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 uszkodzonego autobusu w stacji obsługi,

r_E – ryzyko kolizji lub wypadku autobusu oraz możliwości poniesienia strat w wyniku akcji interwencyjno-ratowniczej oraz wymiany uszkodzonego autobusu na nowy obiekt.

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

$$r_z = \left| \sum_{i \in S_{Nz}} p_i^* \cdot c_i \cdot \alpha_{iz} \right|, \quad z \in \{A, B, C, D, E\} \quad (4.4)$$

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 , $z \in \{A, B, C, D, E\}$.

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

$$\begin{cases} r_A = |p_{7,8} \cdot (p_{6,7} \cdot p_6^* \cdot c_6 + p_7^* \cdot c_7) + p_8^* \cdot c_8| \\ r_B = |p_{7,9} \cdot (p_{6,7} \cdot p_6^* \cdot c_6 + p_7^* \cdot c_7) + p_9^* \cdot c_9 + p_{10}^* \cdot c_{10}| \\ r_C = |p_6^* \cdot c_6 \cdot (p_{6,11} + p_{6,7} \cdot p_{7,11}) + p_{7,11} \cdot p_7^* \cdot c_7 + \\ \quad + p_{11}^* \cdot c_{11} + p_{12}^* \cdot c_{12} + p_{13}^* \cdot c_{13}| \\ r_D = |p_{16,17} \cdot (p_{15}^* \cdot c_{15} + p_{16}^* \cdot c_{16}) + p_{17}^* \cdot c_{17} + p_{18}^* \cdot c_{18}| \\ r_E = |p_{16,19} \cdot (p_{15}^* \cdot c_{15} + p_{16}^* \cdot c_{16}) + p_{19}^* \cdot c_{19}| \end{cases} \quad (4.5)$$

Wzór na podstawie, którego wyznaczane 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:

$$r_\Sigma = \left| \sum_{i \in S_N} p_i^* \cdot c_i \right| \quad (4.6)$$

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:

$$r_z \in \begin{cases} r^A, & \text{gdy } r_z \leq r^{GA} \\ r^T, & \text{gdy } r^{GA} < r_z \leq r^{GT} \\ r^N, & \text{gdy } r_z > r^{GT} \end{cases} \quad (4.7)$$

gdzie:

r^A – przedział ryzyka akceptowalnego,

r^T – przedział ryzyka tolerowalnego,

r^N – przedział ryzyka nieakceptowalnego.

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.

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:

$$D^{OT} = \sum_{i \in S} p_i^* \cdot c_i \quad (4.8)$$

gdzie:

S – zbiór stanów modelu procesu eksploatacji.

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:

$$r^{GT} = \left| - \sum_{i \in (S-S_N)} p_i^* \cdot c_i \right| \quad (4.9)$$

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

$$r^{GA} = \left| 0,38 - \sum_{i \in (S-S_N)} p_i^* \cdot c_i \right| \quad (4.10)$$

5. DECYZYJNY MODEL STEROWANIA PROCESEM EKSPLOATACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU Z UWZGLĘDNIENIEM KRYTERIUM RYZYKA

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.

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 wraz z operatorem przebywa w systemie eksploatacji, jest zdalny i zaopatrzony oraz może terminowo i prawidłowo realizować przydzielone zadanie przewozowe [9]. Wówczas rzeczywista gotowość obiektu technicznego przedstawiona jest wzorem:

$$G^{OT} = \sum_{i \in S_G} p_i^* \quad (5.1)$$

gdzie:

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

W analizowanym 21-stanowym modelu procesu eksploatacji 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 powyższego wyznaczono w pracy również gotowość rzeczywistą systemu technicznego, a w dalszym etapie gotowości wymagane obiektu technicznego i systemu technicznego do realizacji przydzielonych zadań przewozowych.

Model decyzyjny sterowania procesem eksploatacji środków transportu opracowano z zastosowaniem decyzyjnych procesów semi-Markowa. Dla opracowanego modelu:

- 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 $X(t)$ (tabela 6.6).

Przedstawiony model decyzyjny 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. Kryteria wyboru strategii optymalnej δ^* przedstawiają się następująco:

$$r(\delta^*) = \min_{\delta} [r(\delta)] \quad (5.2)$$

$$G^{OT}(\delta^*) = \max_{\delta} [G^{OT}(\delta)] \quad (5.3)$$

Wyznaczenie racjonalnych strategii sterowania realizowane jest za pomocą algorytmu symulowanego wyzarzania, dla którego zbiór rozwiązań optymalnych stanowi front Pareto. Algorytm symulowanego wyzarzania stanowi narzędzie do poszukiwania rozwiązań problemów o przestrzeni rozwiązań, dla których wyznaczenie jednego dokładnego rozwiązania jest bardzo trudne lub nawet niemożliwe [13]. Algorytm ten nie wskazuje rozwiązania optymalnego, ale znajduje grupę bardzo dobrych rozwiązań w akceptowalnym czasie. Front Pareto stanowi zbiór rozwiązań optymalnych w sensie Pareto, czyli zbiór niezdominowanych rozwiązań całej dopuszczalnej przestrzeni poszukiwań.

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

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 i przedstawiono w rozprawie:

- wartości macierzy P prawdopodobieństw zmian stanów włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa,
- wartości średnie bezwarunkowych czasów $\bar{\theta}_i$ przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$,

- wartości prawdopodobieństw granicznych π_i włożonego w proces semimarkowski $X(t)$ łańcucha Markowa,
- wartości prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$,
- wartości średnie jednostkowych dochodów c_i [PLN/h], generowanych w stanach modelu procesu eksploatacji $X(t)$.

Wartości prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach procesu semi-Markowa $X(t)$ oraz wartości średnie jednostkowych dochodów (kosztów) c_i generowanych w stanach modelu procesu eksploatacji $X(t)$, przypadające w jednostce czasu na jeden obiekt techniczny (autobus miejski), wyznaczone w [PLN/h], przedstawiono odpowiednio w tabelach 6.1 i 6.2.

Tab. 6.1. 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

Tab. 6.2. Wartości średnie jednostkowych dochodów (kosztów) 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

Dla wyznaczonych wartości granicznych: ryzyka akceptowalnego (górną granicę r^{GA} obszaru kategorii ryzyka akceptowalnego) oraz ryzyka tolerowalnego (górną granicę r^{GT} obszaru kategorii ryzyka tolerowalnego), określono zakresy wartości rozpatrywanych trzech kategorii ryzyka (akceptowalnego, tolerowalnego, nieakceptowalnego), które przedstawiono w tabeli 6.3. 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, opisanych wzorami 4.9 i 4.10. 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 $r_z^{GT} = 0,2 \cdot r_z^{GT}$.

Tab. 6.3. Zakresy wartości poszczególnych kategorii ryzyka

Kategoria ryzyka	Zakres wartości dla ryzyka łącznego r_z [PLN/h]	Zakres wartości dla ryzyka r_z , $z \in \{A, B, C, D, E\}$ [PLN/h]
ryzyko akceptowalne	$r_z \leq 6,26$	$r_z \leq 1,25$
ryzyko tolerowalne	$6,26 < r_z \leq 6,66$	$1,25 < r_z \leq 1,33$
ryzyko nieakceptowalne	$r_z > 6,66$	$r_z > 1,33$

Dla wyznaczonych danych rzeczywistych, oszacowano wartości ryzyka wystąpienia rozpatrywanych w pracy zdarzeń niepożądanych $z \in \{A, B, C, D, E\}$ oraz wartość ryzyka łącznego i przypisano je do odpowiednich kategorii ryzyka. Wyniki przedstawiono w tabeli 6.4.

Tab. 6.4. Wartości ryzyka w [PLN/h] i jego ocena w analizowanym systemie eksploatacji autobusów miejskich

Zdarzenia niepożądane	Wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia niepożądanego [PLN/rok]	Kategoria ryzyka wystąpienia zdarzenia niepożądanego
<i>A</i>	$r_A = 0,54$	ryzyko akceptowalne
<i>B</i>	$r_B = 0,49$	ryzyko akceptowalne
<i>C</i>	$r_C = 1,16$	ryzyko akceptowalne
<i>D</i>	$r_D = 2,60$	ryzyko nieakceptowalne
<i>E</i>	$r_E = 1,84$	ryzyko nieakceptowalne
Σ	$r_\Sigma = 6,62$	ryzyko tolerowalne

W tabeli 6.5 przedstawiono wyznaczone wartości gotowości rzeczywistej i wymaganej do realizacji przydzielonych zadań przewozowych dla pojedynczego obiektu technicznego oraz dla rozpatrywanego systemu eksploatacji autobusów miejskich.

Tab. 6.5. 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

Do wyznaczenia strategii sterowania procesem eksploatacji określono możliwe decyzje podejmowane w decyzyjnych stanach rozpatrywanego procesu eksploatacji, szczegółowo opisane w rozprawie doktorskiej. 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.

Poniżej w tabeli 6.6 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 podejmowanej w danym stanie rozpatrywanego procesu $X(t)$ – zarówno dla stanów decyzyjnych i niedecyzyjnych opracowanego modelu procesu eksploatacji.

Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą programu komputerowego opracowanego w środowisku programowania Python.

Tab. 6.6. Średnie bezwarunkowe czasy $\bar{\theta}_i$ przebywania oraz dochody (koszty) 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

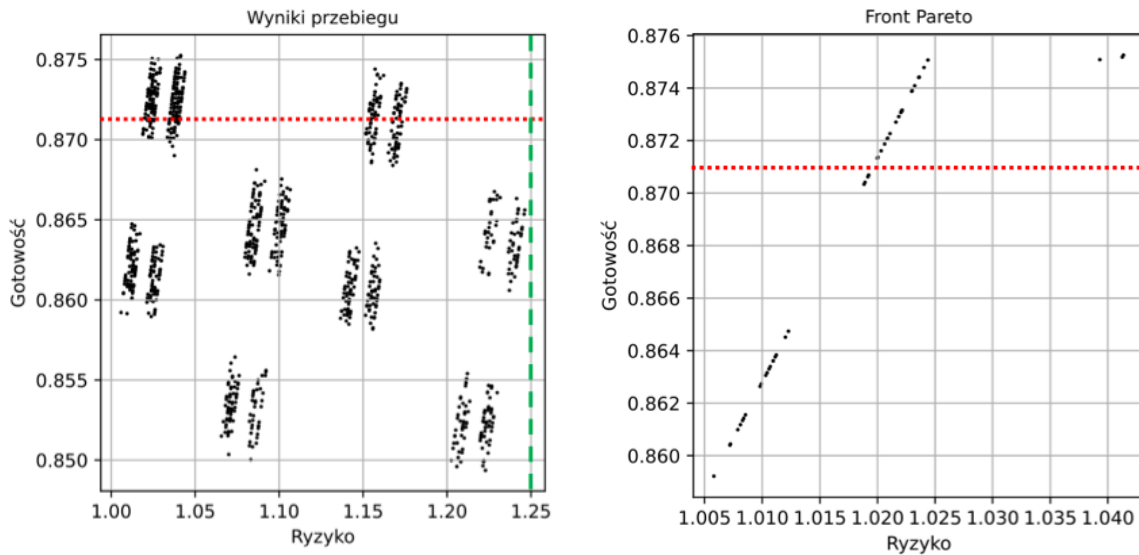
Obliczenia wykonano dla analizowanych w pracy poszczególnych pięciu rodzajów ryzyka r_A , r_B , r_C , r_D , r_E oraz dla ryzyka łącznego r_Σ wystąpienia zdarzeń niepożądanych w rozpatrywanym systemie eksploatacji autobusów miejskich. Wyniki obliczeń wyznaczone z zastosowaniem algorytmu symulowanego wyżarzania dla wybranego rodzaju ryzyka: r_C oraz dla ryzyka łącznego r_Σ przedstawiono na rysunkach 6.1 i 6.2 oraz w tabelach 6.7 i 6.8.

Odpowiednio dla poszczególnych rodzajów ryzyka przedstawiono wyniki (strategie sterowania) wyznaczone w kolejnych iteracjach za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania oraz wyznaczone racjonalne (suboptymalne) strategie sterowania δ^* w postaci punktów leżących na tzw. froncie Pareto. Dodatkowo na rysunkach 6.1 i 6.2 zostały naniesione linie odpowiadające wyznaczonym wartościom r_z^{GA} i r_Σ^{GA} górnej granicy obszaru kategorii ryzyka akceptowalnego (kolor zielony) i 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). Dzięki temu wyodrębniono na wykresie Ryzyko-Gotowość obszary umożliwiające wybór od kilku do kilkunastu „najlepszych” w sensie Pareto strategii sterowania rozpatrywanym procesem eksploatacji środków transportu. Dla ryzyka r_C wyodrębniono 4 obszary, natomiast dla ryzyka łącznego r_Σ - 6 obszarów, ze względu na rozpatrywane w pracy trzy kategorie ryzyka oraz wymaganą gotowości środków transportu do zapewnienia prawidłowej realizacji przydzielonych zadań przewozowych.

W przypadku rysunku 6.1 linia odpowiadająca górnej granicy obszaru ryzyka tolerowalnego (kolor niebieski) nie jest uwidoczniona, ponieważ leży poza obszarem wyznaczonych wartości ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych przedstawionym na tym wykresie.

W tabelach 6.7 i 6.8, 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:

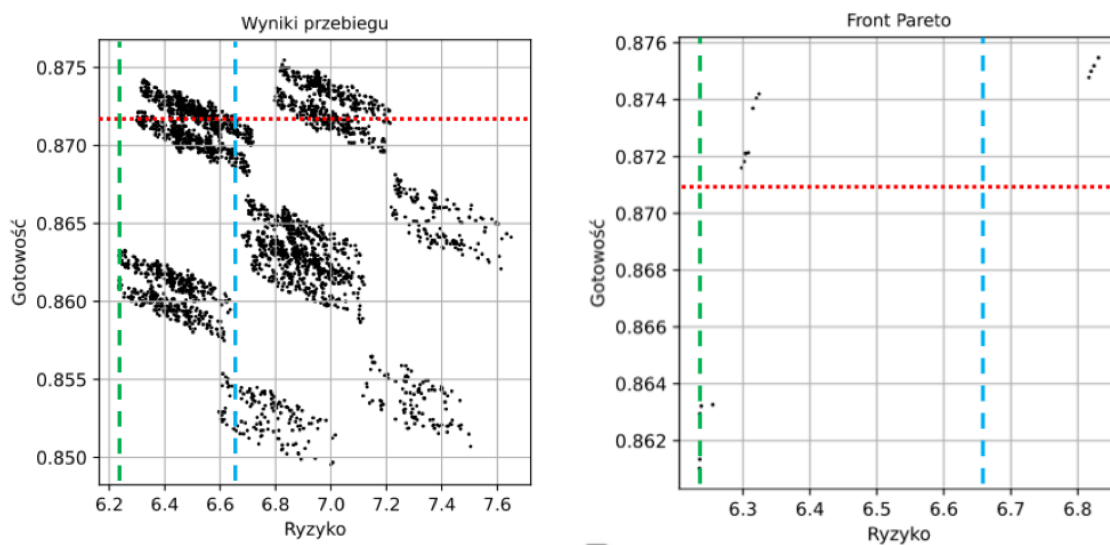
- kolorem zielonym oznaczono strategie sterowania δ^* , dla których wartość ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych zawiera się w obszarze ryzyka akceptowalnego r^A oraz gotowość rzeczywista obiektu technicznego (środka transportu) jest co najmniej równa gotowości wymaganej do prawidłowej realizacji zadań przewozowych;
- 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;
- 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 przebiegu otrzymane w kolejnych iteracjach oraz Front Pareto rozwiązań optymalnych wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_C [PLN/h]

Tab. 6.7. 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]	$G^{OT}(\delta^*)$
[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,1,0,1,1,1]	1,0413	0,8753
[1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,0,1,0,1,1,0,1,0,1,1,1]	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]	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. 6.2. Wyniki przebiegu otrzymane w kolejnych iteracjach oraz Front Pareto rozwiązań optymalnych wyznaczone za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania – dla ryzyka r_Z [PLN/h]

Tab. 6.8. 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]	$G^{OT}(\delta^*)$
[1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1]	6,8407	0,8756
[0,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1]	6,8321	0,8753
[0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,1,0,1,0]	6,8317	0,8751
[0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0]	6,8259	0,8747
[0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1]	6,3301	0,8741
[1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1]	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
[1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0]	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
[1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,1,0,1]	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 i gotowości). W efekcie, dla obliczonych wartości funkcji kryterialnych, wyznaczono odpowiadający im zbiór strategii sterowania procesem eksploatacji będący zbiorem rozwiązań optymalnych w sensie Pareto. 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. WNIOSKI

Do najważniejszych osiągnięć naukowych rozprawy autorka zalicza:

- 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) z uwzględnieniem:
 - wyznaczonych wartości górnych granic ryzyka akceptowalnego i ryzyka tolerowalnego,
 - Odniesienia wyznaczonej wartości ryzyka do wartości dochodu uzyskiwanego w systemie eksploatacji obiektów technicznych.
- 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).

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. Istotnym elementem przedstawionej w pracy metody 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. Na podstawie analizy wyników badań opracowanych modeli istnieje możliwość sterowania procesem eksploatacji środków transportu ze względu na wybrane kryteria oceny (ryzyko, gotowość).
6. 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.
7. 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.
8. Zaproponowana metoda oceny ryzyka umożliwia również wybór innych decyzji sterowania procesem eksploatacji niż tylko te, które znajdują się na froncie Pareto. Przykładowo spośród zbioru decyzji wyznaczonych przy zastosowaniu algorytmu symulowanego wyżarzania dla ryzyka łącznego r_Σ (rys. 6.2), 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.

LITERATURA

Spis piśmiennictwa w rozprawie doktorskiej obejmuje 117 pozycji. W niniejszym autoreferacie zacytowano 17 pozycji literaturowych.

- [1] Aven T., 2015. Risk analysis. John Wiley & Sons.
- [2] Barbu V. S., Limnios N., 2008. Semi-Markov Chains and Hidden Semi-Markov Models toward Applications. Springer New York.
- [3] Gill A., 2017. Optimisation of the technical object maintenance system taking account of risk analysis results. *EiN* 19(3), 420–431.
- [4] Gill A., 2018. Warstwowe modele systemów bezpieczeństwa do zastosowania w transporcie szynowym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [5] Grabski F., 2002. Semi-Markowskie modele niezawodności i eksploatacji. Instytut Badań Systemowych PAN.
- [6] Grabski F., Jaźwiński J., 2009. Funkcje o losowych argumentach w zagadnieniach niezawodności, bezpieczeństwa i logistyki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [7] Grabski F., 2015. Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. Elsevier Inc.
- [8] Jaźwiński J., Grabski F., 2003. Niektóre problemy modelowania systemów transportowych. Biblioteka Problemów Eksploatacji.
- [9] Migawa K., 2013. Sterowanie gotowością w systemach eksploatacji środków transportu. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego.
- [10] 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.
- [11] Migawa K., Knopik L., Sołtysiak A., Kolber P., 2017. The method of risk assessment in transport systems. *Engineering Mechanics*.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Sołtysiak A., Migawa K., 2019. Zastosowanie procesów semi-Markowa do oceny efektywności dziania autobusów miejskich. [W:] *Nauka niejedno ma imię*, Bydgoszcz: Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego.
- [16] Sołtysiak A., Migawa K., 2019. Application of the Pareto front for risk control in the transport system. *MATEC Web Conf.* 302, 01023.
- [17] Szrama S., 2019. Zarządzanie ryzykiem zagrożeń w systemie utrzymania samolotów wielozadaniowych F-16 Poznań: Politechnika Poznańska.