

Wrocław, 25.03.2024

dr hab. inż. Sylwia Werbińska-Wojciechowska, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny, Katedra Eksploatacji Systemów Technicznych

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Beaty Magryty-Mut
p/t.: „*Optymalizacja kosztów eksploatacji złożonych, wielostanowych,
starzejących się systemów technicznych*”,

której promotorem jest dr hab. inż. Jacek Malinowski

1. Podstawa opracowania rozprawy

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie dr hab. inż. Jana W. Owsńskiego z dnia 29 grudnia 2023.

Recenzja została wykonana w oparciu o kryteria określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2017 r. poz. 1668 z późn. zm.).

2. Charakterystyka ogólna rozprawy – obszar problemowy i aktualność podjętej tematyki

Tematyka podjęta przez Doktorantkę związana jest z problematyką modelowania i optymalizacji kosztów eksploatacji złożonych systemów technicznych, mogących przebywać w różnych stanach eksploatacyjnych oraz stanach bezpieczeństwa. Z naukowego punktu widzenia jest to zagadnienie o szczególnym znaczeniu, biorąc pod uwagę konieczność zapewnienia odpowiedniej efektywności ekonomicznej przy uwzględnieniu wymagań eksploatacyjnych, procesów degradacji oraz bezpieczeństwa złożonych systemów technicznych, jak przytoczone w pracy systemy transportowe. Z utylitarne punktu widzenia, problem ten jest szczególnie istotny w świetle konieczności zapewnienia bezpiecznej i efektywnej eksploatacji systemów infrastruktury krytycznej przy racjonalizacji kosztów operacyjnych oraz optymalnej alokacji zasobów w celu minimalizacji ryzyka dla człowieka i otoczenia.

Poruszane w pracy zagadnienie modelowania kosztów eksploatacji starzejących się systemów technicznych do tej pory było rozwijane w kontekście zapewnienia niezawodności systemu lub jego bezpieczeństwa. Pojawiło się wiele opracowań w kontekście zarządzania cyklem życia systemów (*Life Cycle Costs*), czy też prac ukierunkowanych na budowanie modeli prognostycznych w oparciu o dane dotyczące stanu technicznego systemu dla przewidywania potencjalnych uszkodzeń i planowania odpowiedniej strategii eksploatacyjnej. Z punktu widzenia zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa w trakcie

eksploatacji systemu, znane modele ukierunkowane są na ocenę ryzyka (np. *Cost-risk models*), czy modelowanie kosztów bezpieczeństwa operacyjnego (*Operational Safety Costs models*). Brakuje rozwiązań integrujących oba podejścia dla zapewnienia efektywnej eksploatacji, ukierunkowanych na optymalizację kosztów eksploatacyjnych. W tym świetle, proponowane przez Autorkę badania, ukierunkowane na opracowanie modeli i optymalizację kosztów eksploatacji dla systemu ze zmieniającymi się w czasie stanami eksploatacyjnymi i stanami bezpieczeństwa są celowe zarówno w wymiarze naukowym jak i w wymiarze użytkowym.

W związku z tym, w pracy zdefiniowano główny cel pracy, jakim jest modelowanie i optymalizacja kosztów eksploatacji złożonych, wielostanowych starzejących się systemów, ze szczególnym uwzględnieniem praktycznego wykorzystania wprowadzonych modeli do usprawnienia działania rzeczywistych systemów transportu portowego i morskiego.

W ramach celu pracy opracowano dwa modele kosztów eksploatacji systemu:

1. Model całkowitego kosztu eksploatacji systemu w danym przedziale czasu,
2. Model całkowitego kosztu eksploatacji systemu podczas przebywania w danym podzbiore stanów bezpieczeństwa.

Praca niniejsza została ukierunkowana na osiągnięcie określonego celu badawczego, co stanowiło główny motyw przeprowadzenia badań. Praca nie zawiera tezy badawczej, którą Autorka starałaby się udowodnić, wykorzystując odpowiednie metody badawcze, analizę danych i argumentację.

Jednocześnie, tytuł rozprawy doktorskiej „*Optymalizacja kosztów eksploatacji złożonych, wielostanowych, starzejących się systemów technicznych*” w sposób prawidłowy oddaje jej tematykę, która jest aktualna, a materiał w niej przedstawiony stanowi wartościowy wkład do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Tytuł rozprawy doktorskiej również w pełni podsumowuje osiągnięcia Doktorantki w badanym obszarze naukowym.

Reasumując, opiniowana rozprawa doktorska koncentrując się na zagadnieniach modelowania i optymalizacji kosztów eksploatacji złożonych, starzejących się systemów technicznych, podejmuje ważny i aktualny problem badawczy, zorientowany na efektywne ekonomiczne podejmowanie decyzji w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa systemów infrastruktury krytycznej.

Uważam, że podjęcie przedstawionej problematyki w rozprawie o charakterze metodologiczno-analitycznym jest uzasadnione zarówno ze względów poznawczych jak i użytkowych. Jednocześnie, tak sformułowany cel badawczy w moim przekonaniu zawiera pierwiastek nowości i będzie stanowić oryginalny wkład do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

3. Struktura pracy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska liczy 96 stron, w tym stronę tytułową, spis treści – 2 strony oraz bibliografię – 5 stron (65 pozycji literaturowych). Praca nie zawiera streszczenia w języku polskim/angielskim, brakuje również spisu ważniejszych oznaczeń oraz spisu rysunków i spisu tabel. Brak spisu oznaczeń znacząco utrudnia czytelność pracy, zwłaszcza w kontekście mnogości wzorów i obliczeń matematycznych.

W części zasadniczej praca składa się z przedmowy, zawierającej: wprowadzenie, stan zagadnienia i zarys pracy dyplomowej, sześciu rozdziałów merytorycznych oraz podsumowania.

Układ pracy jest poprawny i odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim. Tytuły poszczególnych rozdziałów odpowiadają ich zawartości.

Praca nie jest w pełni zbilansowana objętościowo. Rozdział zawierający przegląd stanu zagadnienia jest przygotowany na poziomie bardzo ogólnym, nie ma uporządkowania wiedzy w tym obszarze oraz jasnego określenia luki badawczej.

Pod względem redakcyjnym rozprawa przygotowana jest starannie. Warto podkreślić również jakość schematów i rysunków w rozdziale drugim pracy, która zwiększa czytelność opracowanych modeli. Wprawdzie praca zawiera drobne błędy redakcyjne i stylistyczne, ale nie mają one wydatnego wpływu na wartość merytoryczną pracy.

4. Ocena merytoryczna rozprawy wraz z uwagami

W *Przedmowie* Autorka krótko przedstawia problematykę podjętą w pracy doktorskiej, definiując cel badawczy oraz zakres pracy.

W podrozdziale 1.1. *Wprowadzenie* opisuje podstawowe założenia przyjęte w procesie modelowania wraz z przedstawieniem definicji bezpieczeństwa, stanu bezpieczeństwa, czy stanów eksploatacji. Omówione zostały podstawowe metody zastosowane w pracy, jak programowanie liniowe. Omawia również proces optymalizacji kosztów eksploatacji.

W kolejnym podrozdziale 1.2. *Stan zagadnienia* Autorka w sposób ogólny omawia stan badań w dziedzinie kosztów eksploatacji złożonych, wielostanowych, starzejących się systemów technicznych. Skupiła się na literaturze definiującej podstawowe pojęcia i klasyfikacje kosztów eksploatacji w kontekście zarządzania systemami.

W ostatnim podrozdziale 1.3. *Zarys pracy dyplomowej*, omówiono streszczenie pracy.

Do przeprowadzonego przez Doktorantkę wywodu w tym rozdziale mam dodatkowo pytania i uwagi:

1. W pracy Autorka wyróżnia dwa modele uwzględniające stany eksploatacji i stany bezpieczeństwa. Proszę wyjaśnić, dlaczego wyróżnienie stanów bezpieczeństwa w modelowaniu kosztów eksploatacji jest istotne z punktu badawczego i użytecznego?
2. W podrozdziale pierwszym Autorka wskazuje na wykorzystanie w procesie optymalizacji programowania liniowego. Jednocześnie wskazuje na podobieństwa podejścia do modelowania z wykorzystaniem procesów Markowa. Czy Autorka w swoich badaniach analizowała możliwość zastosowania podejścia opartego na procesach Markowa do rozwiązania problemu badawczego, postawionego w pracy? Jeśli nie to dlaczego?
3. W podrozdziale 1.2 Autorka przedstawia w bardzo ogólny sposób przegląd literatury z badanego obszaru. Skupiono się jedynie na definicjach i klasyfikacji kosztów eksploatacji. Zabrakło omówienia metod i modeli znanych w literaturze, z uwzględnieniem mocnych i słabych stron znanych podejść, które uzasadniałyby wybór podejścia opartego np. na programowaniu liniowym. Zabrakło jasnej klasyfikacji znanych metod i modeli ukierunkowanych na zarządzanie cyklem życia systemów (*Life Cycle Management*) czy zarządzanie utrzymaniem ruchu (*Maintenance, Repair, and Operations Management*). Nie ma omówienia znanych modeli optymalizacyjnych np. ukierunkowanych na dobór optymalnej strategii utrzymania systemów w kontekście kosztów eksploatacyjnych, wieku, stanu technicznego systemu czy ryzyka wystąpienia uszkodzenia. Nie została zdefiniowana w pracy luka badawcza w oparciu o aktualny stan wiedzy. Autorka jedynie powołuje

się na publikacje, w których była autorem lub współautorem, przyjmując je za podstawę rozważanego w pracy podejścia do modelowania i optymalizacji.

Ponadto, dobrą praktyką przy pisaniu rozpraw doktorskich jest również w części wprowadzającej przedstawienie struktury doktoratu oraz schematu podsumowującego przeprowadzone badania. Pozwala to na płynne przejście do kolejnego rozdziału rozprawy doktorskiej oraz ułatwia śledzenie toku prowadzonych prac badawczych. Tego elementu zabrakło w pracy, jednakże nie zaburzyło to w wydatnym stopniu czytelności rozprawy doktorskiej.

W rozdziale drugim: Koszt eksploatacji generycznego systemu Autorka omawia dwa autorskie modele kosztów eksploatacji. **Jest to zarazem jedna z najważniejszych części pracy.** Pierwszy model, przedstawiony w podrozdziale 2.1., dotyczy modelowania kosztów eksploatacji systemu w danym przedziale czasu. Autorka zaproponowała semi-Markowski model procesu eksploatacji oraz model kosztu eksploatacji systemu. Określono podstawowe atrybuty procesu semimarkowskiego z dyskretnym zbiorem stanów oraz jego charakterystyki. Zdefiniowano również chwilowy koszt eksploatacji systemu, pod warunkiem, że system znajduje się w jednym ze zdefiniowanych stanów eksploatacyjnych.

Drugi model został przedstawiony w podrozdziale 2.2. Zdefiniowano podstawowe założenia modelu oraz stany bezpieczeństwa systemu o starzejących się w czasie elementach. Zdefiniowano również funkcję bezpieczeństwa, funkcję ryzyka systemu, oraz wskaźniki bezpieczeństwa. W sposób analityczny został przedstawiony wpływ procesu eksploatacji systemu na jego bezpieczeństwo, poprzez zdefiniowanie m.in. warunkowych funkcji bezpieczeństwa elementów systemu w stanach eksploatacyjnych, bezwarunkowej funkcji bezpieczeństwa systemu, wartości oczekiwanej i wariancji bezwarunkowych czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów bezpieczeństwa. Finalnie, zaproponowano model chwilowych kosztów eksploatacji systemu w podzbiorach stanu bezpieczeństwa oraz oczekiwaną wartość całkowitego kosztu eksploatacji systemu.

Od strony naukowej zaproponowane modele zostały opisane w niniejszym rozdziale pracy w sposób prawidłowy. Określone zostały podstawowe założenia modeli. W sposób analityczny zostały opisane poszczególne modele w zakresie modelowania procesów eksploatacji i kosztów eksploatacji. Zabrakło jednak ogólnego omówienia ograniczeń modeli (np. warunki stosowalności). Ponadto praca nie zawiera ogólnego przedstawienia proponowanego podejścia do modelowania kosztów eksploatacji, np. poprzez schemat blokowy, które pozwoliłoby na uogólnienie opracowanego podejścia. Jest to szczególnie istotne, gdyż omówienie procesu optymalizacji kosztów eksploatacji jest poruszane dopiero w rozdziale czwartym.

W rozdziale trzecim: Koszt eksploatacji portowej bazy paliw oraz systemu technicznego promu morskiego Autorka przedstawia dwa przykłady analizy kosztu procesu eksploatacji infrastruktury krytycznej z wykorzystaniem przedstawionych w rozdziale drugim modeli kosztowych.

W podrozdziale 3.1 skupiono się na procesach eksploatacji portowej bazy paliw. W pierwszym kroku omówiono proces eksploatacji bazy paliw oraz infrastrukturę krytyczną bazy paliw definiując strukturę funkcjonalną systemu oraz charakterystyki eksploatacyjne. Wyznaczono warunkowe chwilowe koszty w czasie eksploatacji oraz wartość oczekiwaną kosztu eksploatacji systemu. W kolejnym kroku zdefiniowano i omówiono strukturę

bezpieczeństwa badanego systemu oraz wyliczono podstawowe funkcje modelu bezpieczeństwa i koszt eksploatacji systemu w podzbiorze stanów bezpieczeństwa.

W analogiczny sposób, w podrozdziale 3.2. przeprowadzono analizę kosztu eksploatacji systemu technicznego promu morskiego. Omówiono proces eksploatacji promu oraz zdefiniowano jego strukturę bezpieczeństwa w odniesieniu do stanów eksploatacyjnych. Przedstawiono podstawowe obliczenia dla charakterystyk bezpieczeństwa oraz w zakresie modelowania kosztowego. Wyznaczono wartość oczekiwaną kosztów całkowitych systemu oraz całkowite koszty eksploatacji w podzbiorze stanów bezpieczeństwa.

Przedstawiony rozdział ma charakter użytkowy i został podporządkowany wymaganiom procesów eksploatacji analizowanych systemów technicznych. Kluczowe w danym rozdziale jest ukazanie dwóch różnych systemów technicznych, dla których opracowane modele pozwalają na uzyskanie wartości oczekiwanych całkowitych kosztów eksploatacji. Brakuje jednak interpretacji Autorki uzyskanych wyników prowadzonych analiz, np. w odniesieniu do poziomu funkcji bezpieczeństwa czy oszacowanych kosztów eksploatacyjnych.

Jednocześnie, do przeprowadzonego przez Doktorantkę wywodu w tym rozdziale mam dodatkowo pytania i uwagi:

1. W analizowanych przykładach Autorka definiuje strukturę funkcjonalną systemów oraz wyznacza podstawowe parametry podsystemów. Jednocześnie, prowadzone analizy opiera na założeniach i oszacowaniach, które nie zostały w sposób wyczerpujący objaśnione. Przykładowo na stronie 19 wskazuje, że: „(...) pozostałe podsystemy A_2-A_9 są uwzględnione zbiorczo i z dowolnie przyjętymi parametrami z powodu braku dostępnych danych”. Zabrakło w pracy komentarza, na jakiej podstawie parametry zostały oszacowane i jak oceniono wiarygodność przyjętych wartości? Analogicznie sytuacja z oszacowaniem kosztów całkowitych przebywania danych podsystemów w poszczególnych stanach eksploatacyjnych (strony 25 i 32 doktoratu). Zostały one oszacowane arbitralnie na poziomie 10 000 PLN/rok. Brakuje uzasadnienia tak przyjętego założenia.
2. Na stronach 23-24 doktoratu przedstawiono charakterystyki procesu eksploatacji bazy paliw. Charakterystyki te zostały przytoczone na podstawie publikacji [29, 33,42] oraz publikacji, której nie ma w spisie bibliograficznym: (Kołowrocki, Soszynska, 2010b). Po pierwsze, w kontekście uzupełnienia spisu bibliograficznego – czy Autorka miała na myśli publikację [32], która w opisie bibliograficznym ma odniesienie do roku publikacji: 2010a? Po drugie, dla zapewnienia pełnej oceny przeprowadzonych analiz kosztowych, w pracy zabrakło informacji, z jakiego okresu wykorzystano dane eksploatacyjne do obliczeń oraz jak zostały wyznaczone charakterystyki eksploatacji bazy paliw. Analogiczna sytuacja powtarza się w zakresie omówienia charakterystyk procesu eksploatacji promu morskiego (strony 37-38 doktoratu), gdzie również powołano się na konkretne publikacje, bez wskazania z jakiego okresu zostały wykorzystane dane oraz sposobu ich wyznaczenia. Ponownie powołano się na publikację (Kołowrocki, Soszynska, 2010b), której nie ma w spisie bibliograficznym.
3. W punkcie 3.1.1.2 powołano się na opinie ekspertów dla oceny chwilowych kosztów eksploatacji pojedynczych podstawowych elementów portowego rurociągu. Zabrakło jednak informacji odnośnie charakterystyki ekspertów, którzy szacowali koszty – np. ilu ekspertów współpracowało, ich doświadczenia, obszaru kompetencji, itp. Podobnie, w przypadku analizy bezpieczeństwa eksploatacji promu morskiego, zostały wykorzystane

opinie ekspertów, bez wyjaśnienia procesu opiniowania i jego wiarygodności (strony 43-44 doktoratu).

4. W przypadku prowadzonych analiz kosztów eksploatacji promu morskiego, ponownie w sposób arbitralny przyjęto pewne parametry – np. współczynnik c dla wyznaczenia kosztów podsystemów. Brakuje komentarza, na ile tak przyjmowane uproszczenia/założenia wpływają na wiarygodność uzyskanych wyników końcowych.

Dodatkowe uwagi redakcyjne:

1. Podpis do rysunku 3.12 nie odpowiada strukturze bezpieczeństwa systemu w stanie eksploatacyjnym z_1 a jedynie podsystemu A_1 . Podobnie podpisy pod rysunkami 3.13-3.18.
2. Na stronie 41 opis poprzedzający rysunek 3.26 jest w języku angielskim.
3. Na stronie 41 w podpisie do rysunku 3.25 zamiast S_1 i S_{18} powinno być odpowiednio: z_1 i z_{18} .
4. Również indeksacja oraz oznaczenia wzorów są bardzo złożone, co utrudnia odbiór treści przy braku spisu ważniejszych oznaczeń, zwyczajowo umieszczanego na początku rozprawy doktorskiej.

Drugim najważniejszym rozdziałem pracy jest rozdział czwarty: *Optymalizacja kosztu eksploatacji generycznego systemu*. W rozdziale tym omówione zostały dwie procedury optymalizacji kosztu eksploatacji systemu – w danym przedziale czasu i podczas przebywania w podzbiorze stanów bezpieczeństwa.

W pierwszym podrozdziale Autorka zaproponowała algorytm minimalizacji wartości oczekiwanej całkowitego kosztu eksploatacji w ustalonym czasie eksploatacji z wykorzystaniem programowania liniowego.

W ramach proponowanego algorytmu:

- zdefiniowano funkcję celu zadania programowania,
- określono jej ograniczenia – dolne i górne granice prawdopodobieństw chwilowych przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych,
- w oparciu o algorytm optymalizacyjny przedstawiony w [20] wyznaczono minimalizującą wartość oczekiwaną całkowitego kosztu eksploatacji systemu w ustalonym czasie eksploatacji.

W drugim podrozdziale, skupiono się na minimalizacji oczekiwanych całkowitych kosztów eksploatacji systemu w podzbiorze stanów bezpieczeństwa w poszczególnych stanach eksploatacyjnych.

W ramach proponowanego algorytmu:

- zdefiniowano funkcję celu zadania programowania,
- określono jej ograniczenia – dolne i górne granice prawdopodobieństw chwilowych przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych i w podzbiorze stanów bezpieczeństwa,
- w oparciu o algorytm optymalizacyjny przedstawiony w [20] wyznaczono minimalizującą wartość oczekiwanych kosztów eksploatacji systemu w poszczególnych stanach bezpieczeństwa.

Do przeprowadzonego przez Doktorantkę wywodu w tym rozdziale mam dodatkowo jedną uwagę:

Treści merytoryczne rozdziału obejmują procedury optymalizacji opracowanych przez Autorkę modeli kosztowych. W opinii Recenzenta przedstawienie na początku rozdziału jasnego schematu proponowanych algorytmów poprawiłoby czytelność pracy oraz pozwoliłoby na wprowadzenie pewnej ciągłości przyczynowo-skutkowej treści merytorycznych, zawartych w pracy. W obecnej postaci, podejście modelowe, algorytmy optymalizacyjne, algorytm łącznej optymalizacji (przedstawiony w rozdziale szóstym) są przeplatane rozdziałami mającymi charakter implementacyjny, weryfikujący kolejne zagadnienia o charakterze metodologiczno-analitycznym. Pomimo, że jest to podejście poprawne z badawczego punktu widzenia, zabrakło wyraźnego przedstawienia metodologii zawartej w pracy, które pozwoliłoby na podkreślenie osiągnięć naukowych Doktorantki.

Możliwości implementacji opracowanych procedur optymalizacyjnych przedstawiono w **rozdziale piątym**. W podrozdziale 5.1 skupiono się na optymalizacji kosztów eksploatacji bazy paliw. Optymalizacja kosztów eksploatacji promu została omówiona w podrozdziale 5.2. Uzyskane wyniki w procesie optymalizacji zostały odpowiednio skomentowane w tekście w odniesieniu do wyników obliczeń, przeprowadzonych w rozdziale 3.

Rozdział szósty odnosi się do procesu łącznej optymalizacji kosztów eksploatacji i bezpieczeństwa generycznego systemu. W rozdziale tym w sposób bardzo zwięzły przedstawiono zasady optymalizacji kosztów eksploatacji i bezpieczeństwa. Opisano dwa algorytmy:

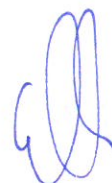
- zapewnienia bezpieczeństwa systemu przy optymalnym koszcie eksploatacji,
- estymacji kosztów eksploatacji systemu przy optymalnym bezpieczeństwie.

Do przeprowadzonego przez Doktorantkę wywodu w tym rozdziale mam dodatkowo jedną uwagę:

Podobnie jak w przypadku rozdziału czwartego, zabrakło pewnego schematycznego uogólnienia przedstawionych treści łącznej optymalizacji kosztu eksploatacji systemu i jego bezpieczeństwa. Schemat wnioskowania wraz ze wskazaniem poszczególnych kroków postępowania stanowiłby istotny element, podkreślający osiągnięcia naukowe Doktorantki oraz byłby podstawą dla treści przedstawionych w kolejnym rozdziale, weryfikujących poprawność opracowanych algorytmów łącznej optymalizacji dla analizowanych systemów transportowych. Brakuje również jasnego omówienia zakresu zastosowania opracowanych algorytmów z jasnym wskazaniem dla decydenta, w jakich sytuacjach powinien stosować podejście pierwsze ukierunkowane na minimalizację kosztów przy założonym stanie bezpieczeństwa, a kiedy podejście związane z maksymalizacją bezpieczeństwa systemu przy określonym podzbiórze kosztów eksploatacji, a kiedy zastosować oba aby dobrać najkorzystniejsze rozwiązanie.

W **rozdziale siódmym** przedstawiono implementację opracowanych algorytmów łącznej optymalizacji kosztu eksploatacji i bezpieczeństwa dla analizowanych w pracy systemów transportowych: portowej bazy paliw oraz systemu technicznego promu morskiego.

W **podrozdziale 7.1.: Bezpieczeństwo systemu przy minimalnym koszcie**, proces łącznej optymalizacji przeprowadzono w trzech krokach (dla eksploatacji bazy paliw). W pierwszym kroku skupiono się na optymalizacji bezpieczeństwa bazy paliw przy minimalnym koszcie eksploatacji w danym przedziale czasu. Algorytm postępowania obejmował wyznaczenie



warunkowych charakterystyk bezpieczeństwa (m.in. warunkowej funkcji bezpieczeństwa, warunkowej funkcji ryzyka, warunkowych przybliżonych intensywności starzenia się, warunkowych współczynników wpływu procesu eksploatacji na bezpieczeństwo oraz warunkowy współczynnik odporności). Następnie, w drugim kroku analogicznie wyznaczono warunkowe charakterystyki bezpieczeństwa dla oszacowania bezpieczeństwa bazy paliw przy minimalnym koszcie eksploatacji w danym podzbiornie stanów bezpieczeństwa. Trzeci krok obejmuje analizę uzyskanych wyników pod kątem możliwości doskonalenia strategii eksploatacji bazy paliw w zakresie zapewnienia optymalnej efektywności ekonomicznej systemu.

W sposób analogiczny przedstawiono implementację algorytmu łącznej optymalizacji kosztu eksploatacji i bezpieczeństwa promu morskiego (podrozdział 7.1.2).

W *podrozdziale 7.2: Koszt eksploatacji systemu przy maksymalnym bezpieczeństwie* Autorka przedstawiła wyniki implementacji algorytmu estymacji kosztów eksploatacji systemu przy optymalnym bezpieczeństwie dla badanych systemów transportowych. Procedura optymalizacji została przeprowadzona dla dwóch przypadków: 1) optymalizacji warunkowych całkowitych kosztów eksploatacji portowej bazy paliw w przedziale czasu – okres jednego roku, 2) optymalizacji warunkowego całkowitego kosztu eksploatacji portowej bazy paliw w podzbiornach stanów bezpieczeństwa, przy warunku maksymalizacji bezpieczeństwa. W ostatnim kroku omówione zostały uzyskane wyniki pod kątem możliwości doskonalenia strategii eksploatacji bazy paliw w zakresie zapewnienia optymalnej efektywności ekonomicznej systemu, zapewniającej utrzymanie bezpieczeństwa na odpowiednim poziomie.

Do przeprowadzonego przez Doktorantkę wywodu w tym rozdziale mam dodatkowo jedną uwagę:

Doktorantka przedstawiła proces implementacji opracowanych algorytmów łącznej optymalizacji kosztu eksploatacji i bezpieczeństwa. Jest to jednocześnie rozdział podsumowujący opracowane podejście do modelowania kosztów eksploatacji złożonych, wielostanowych, starzejących się systemów technicznych. W związku z tym, w ocenie Recenzenta zabrakło jasnego podsumowania danego rozdziału wraz z zestawieniem uzyskanych wyników dla badanych systemów przed optymalizacją oraz po optymalizacji pierwszą i drugą metodą. Pozwoliłoby to na jasne podkreślenie zasadności stosowania opracowanych przez Autorkę modeli oraz procedur ich optymalizacji. Zabrakło również analizy wrażliwości dla badanych modeli kosztów eksploatacji co z kolei pozwoliłoby na wnioskowanie w zakresie stosowalności opracowanych modeli i algorytmów. Nie zostało również przedstawione pewne uogólnienie zagadnienia poprzez wskazanie, na przykład jakie wymagania, ograniczenia, wady/zalety są związane z zastosowaniem opracowanych modeli i algorytmów ich optymalizacji w praktyce.

Rozdział ósmy przedstawia **Podsumowanie** rozprawy doktorskiej. Autorka podsumowała uzyskane efekty naukowe i użytkarne pracy. Zostały również wskazane potencjale kierunki prac badawczych w badanym obszarze.

Do przeprowadzonego przez Doktorantkę wywodu w tym rozdziale mam dodatkowo kilka uwag:

W podsumowaniu, pomimo wyraźnego opisu osiągnięć naukowych Autorki (pomimo wskazania w części wprowadzającej luki badawczej), zabrakło jednoznacznego podsumowania wad/zalet opracowanych modeli i algorytmów optymalizacji oraz ograniczeń ich zastosowania w praktyce. Jednocześnie, Doktorantka w ostatniej części podsumowania powołuje się na możliwość zastosowania w przyszłości wielokryterialnych modeli optymalizacji i algorytmów

ewolucyjnych. Jednakże w części dotyczącej analizy stanu obecnego temat ten w żaden sposób nie został poruszony w kontekście definicji luki badawczej – nie zostały omówione żadne podejścia modelowe, które można zastosować do rozwiązania zagadnienia modelowania kosztów eksploatacji złożonych, starzejących się systemów technicznych.

Literatura obejmuje zestawienie łącznie 65 pozycji – wszystkie w języku angielskim; 28 pozycji zostało opublikowanych w ciągu ostatnich 5 lat (od roku 2019). Dobór literatury uważam za poprawny i aktualny. W rozprawie doktorskiej Doktorantka powołuje się również na 7 opublikowanych prac współautorskich i 4 prace autorskie.

Podsumowując, pomimo wskazanych uwag do treści pracy, stwierdzam, że Autorka opracowała oryginalne modele optymalizacji kosztów eksploatacji złożonych, wielostanowych, starzejących się systemów oraz wykazała ich skuteczność w kontekście szacowania efektywności ekonomicznej wybranych systemów technicznych. W rozprawie zaprezentowano oryginalne ujęcie zagadnienia, co stanowi niewątpliwe osiągnięcie naukowe Doktorantki. Powyższe uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej.

5. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych w pracy zadań badawczych, metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam ogólnie pozytywnie. O właściwym przygotowaniu Autorki rozprawy do prowadzenia prac badawczych świadczą: zastosowanie właściwej wiedzy z zakresu modelowania systemów infrastruktury krytycznej, teorii systemów oraz programowania liniowego, jak również przeprowadzenie analiz opartych na danych, pozyskanych w rzeczywistych warunkach operacyjnych. Słabą stroną Autorki jest jednak przygotowana w pracy synteza literatury, w której zabrakło wskazania wyraźnej luki badawczej jak również nie omówiono żadnych podejść do modelowania kosztów eksploatacji systemów technicznych, skupiając się jedynie na kilku wybranych pozycjach definiujących i klasyfikujących te koszty w systemach.

W ogólnym kontekście praca jest ułożona logicznie, zawierając wszystkie etapy postępowania potrzebne do realizacji postawionego w niej celu. Przedstawienie opracowanych modeli kosztowych, sposób wnioskowania, jak również proces weryfikacji opracowanej metodyki zostały przeprowadzone w sposób poprawny metodologicznie, potwierdzając dobre przygotowanie warsztatu badawczego Doktorantki. Jasne i logiczne przedstawienie procesu obliczania kosztów eksploatacji systemów technicznych, wykorzystując opracowane modele, a następnie przeprowadzenie optymalizacji zarówno osobno, jak i łącznie, stanowi mocną stronę pracy.

Na tym etapie, za oryginalne i ważne pod względem naukowym oraz użytecznym rezultaty badań uzyskane przez Doktorantkę uznaję:

- opracowanie dwóch autorskich modeli wyznaczania kosztów eksploatacji złożonych, wielostanowych, starzejących się systemów technicznych z uwzględnieniem podzbioru stanów bezpieczeństwa;

- opracowanie algorytmu optymalizacji kosztów eksploatacji złożonych, wielostanowych, starzejących się systemów technicznych z uwzględnieniem podzbioru stanów bezpieczeństwa;
- przeprowadzenie procesu weryfikacji opracowanych modeli i algorytmów optymalizacji kosztowej wraz z analizą wyników.

Jednakże warto zauważyć, że w pracy zabrakło pewnego uogólnienia podejścia metodologicznego oraz jasnego określenia luki badawczej, która mogłaby ukierunkować dalsze prace w dziedzinie optymalizacji kosztów eksploatacji i zapewnienia bezpieczeństwa. W kontekście metodologii pracy, w opinii Recenzenta, zabrakło przedstawienia nowej metody optymalizacji kosztów eksploatacji systemów infrastruktury krytycznej w kontekście bezpieczeństwa, której wybrane etapy (jak opracowane identyfikacja i szacowanie parametrów eksploatacyjnych systemów, definicja stanów eksploatacji i stanów bezpieczeństwa, modele kosztowe, optymalizacja, czy proces wnioskowania) w sposób rozproszony zostały ukazane w pracy. Jasne ujęcie podejścia metodologicznego, które uwzględniałoby takie etapy, jak m.in. identyfikacja systemu technicznego i jego struktury eksploatacyjnej/bezpieczeństwa, szacowanie parametrów eksploatacyjnych, wyznaczenie kosztów eksploatacyjnych, optymalizacja kosztów eksploatacyjnych, wnioskowanie wraz z definicją kierunków doskonalenia systemu eksploatacji pod kątem efektywności ekonomicznej, operacyjnej przy zachowaniu/podniesieniu poziomu bezpieczeństwa podkreśliłoby oryginalne, istotne pod kątem naukowym i użytecznym osiągnięcie Doktorantki. Takiego uogólnienia wraz z definicją luki badawczej jednak zabrakło w pracy.

Pomimo wskazanych słabych punktów w pracy, uzyskane rezultaty pozwalają na pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska p/t. *Optymalizacja kosztów eksploatacji złożonych, wielostanowych, starzejących się systemów technicznych* jest aktualnym oraz interesującym opracowaniem, dotyczącym zagadnień z obszaru teorii modelowania złożonych, wielostanowych, starzejących się systemów technicznych, gdzie kwestie bezpieczeństwa są szczególnie istotne.

Przedstawiony materiał badawczy oraz zaproponowane dwa modele kosztów eksploatacji systemów technicznych wraz z algorytmami ich optymalizacji są oryginalnym dorobkiem mgr inż. Beaty Magryty-Mut, zarówno pod względem naukowym jak i użytecznym, który wpisuje się w zakres dziedziny *nauk inżyniersko-technicznych* w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.

Podjęte przez mgr inż. Beatę Magrytę-Mut prace naukowo-badawcze pozwoliły na rozwiązanie postawionego w rozprawie doktorskiej problemu naukowego, uzupełniając wiedzę w obszarze inżynierii mechanicznej w zakresie modelowania kosztów eksploatacji złożonych systemów technicznych w kontekście bezpieczeństwa.

Przedstawione w pracy wyniki przeprowadzonych badań oraz analizy w ramach podejmowanej tematyki wskazują, że mgr inż. Beata Magryta-Mut posiada odpowiednią wiedzę w zakresie modelowania eksploatacyjnego podbudowaną doświadczeniem w

prowadzeniu prac naukowo-badawczych. Przedstawiony zakres badań jest uzasadniony zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. Może być podstawą do kontynuowania oraz rozszerzania prac badawczych w przyszłości.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, wskazujących na możliwości doskonalenia warsztatu naukowego Doktorantki uważam, że opracowane przez mgr inż. Beatę Magrytę-Mut modele kosztów eksploatacyjnych złożonych systemów technicznych wraz z algorytmami ich optymalizacji są oryginalnym osiągnięciem naukowym, szczególnie o walorach praktycznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oraz pokazuje, że Doktorantka posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne w wystarczającym zakresie. Potwierdza, że Doktorantka posiadała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Zaprezentowane w rozprawie badania stanowią rozwiązanie zadania naukowego i spełniają w moim przekonaniu wymagania zawarte w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2017r. poz. 1688 z późn. zm.).

W związku z powyższym, oceniam pozytywnie recenzowaną pracę doktorską i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Sylwia Werbińska-Wojciechowska

