

dr hab. inż. Przemysław Simiński, prof. WITPiS
Wojskowy Instytut Techniki Pancерnej i Samochodowej
przemyslaw.siminski@witpis.eu

RECENZJA

rozprawy doktorskiej kpt. mgr. inż. Mateusza Oszczypały
pt.: „Modelowanie niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-osobowych
funkcjonujących w wojskowych systemach transportowych”
opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna”
Wojskowej Akademii Technicznej
nr 45/RDN IM/2025 z dnia 16 kwietnia 2025 r.
Promotor: płk dr hab. inż. Jarosław Ziółkowski
Promotor pomocniczy: ppłk dr inż. Piotr Kędzierski

1. Ocena wyboru problematyki rozprawy

Tematyka niezawodności i gotowości pojazdów wojskowych jest niezwykle istotnym zagadnieniem z punktu widzenia zdolności bojowych i operacyjnych Sił Zbrojnych RP. Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia w kontekście obecnej sytuacji geopolitycznej i konieczności utrzymywania odpowiednich zdolności transportowych wojska. Przedmiot badań, czyli pojazdy ciężarowo-osobowe typu Honker 2000, stanowią znaczną część parku samochodowego SZ RP, przez co optymalizacja procesu ich eksploatacji może przynieść wymierne korzyści ekonomiczne i operacyjne. System utrzymania i użytkowania pojazdów wojskowych charakteryzuje się niezwykle różnorodnością wynikającą z: mnogości typów sprzętu wojskowego, zróżnicowania systemów utrzymania technicznego, zmiennej częstotliwości użytkowania, niejednorodnych wskaźników eksploatacyjnych oraz zaangażowania wielu podmiotów o różnych zakresach odpowiedzialności. Złożoność tego systemu generuje ogromne ilości danych. Jednocześnie dostrzegalny jest deficyt ustandaryzowanych instrumentów służących do obserwacji, gromadzenia, weryfikacji i interpretacji informacji na poszczególnych szczeblach eksploatacji.

Podjęcie tematyki rozprawy wymagało od Doktoranta: dobrej organizacji pracy, umiejętności analitycznych, znajomości zaawansowanych metod probabilistycznych i symulacyjnych oraz umiejętności pozyskania i analizy danych eksploatacyjnych, które są trudno dostępne ze względu na specyfikę wojskowych systemów transportowych.

Problematyka badawcza dotycząca modelowania niezawodności i gotowości pojazdów wojskowych jest istotna zarówno z punktu widzenia teorii, jak i praktycznych zastosowań w obszarze eksploatacji, co nadaje jej cechy dysertabilności. Zakres pracy powoduje, że mieści się ona w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna. Założony zakres pracy jest wystarczający do wykazania umiejętności samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-badawczych, co jest podstawowym wymogiem stawianym przed pracami doktorskimi. Ponadto realizacja wybranej tematyki rozprawy przyczynia się do wypracowania optymalnego systemu eksploatacji pojazdów wojskowych.

2. Ocena struktury, strony metodycznej rozprawy oraz uwagi ogólne

Praca stanowi oryginalny utwór naukowy. Całość opracowania obejmuje 82 strony jednostronnego wydruku w formacie A4. W strukturze rozprawy znajduje się: streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz skrótów, wykaz publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej, 7 głównych rozdziałów wykaz literatury i załączniki.

Wykorzystana bibliografia liczy 87 pozycji, wśród których znajdują się przede wszystkim artykuły naukowe i monografie. Wykorzystanie źródeł jest prawidłowe. Piśmiennictwo obejmuje szeroki zakres tematyczny, począwszy od klasycznych prac dotyczących teorii niezawodności, przez modele probabilistyczne, procesy Markowa i semi-Markowa, metody symulacyjne, a skończywszy na specjalistycznych pracach dotyczących eksploatacji pojazdów. Należy podkreślić, że zakres geograficzny piśmiennictwa jest szeroki i obejmuje prace autorów z różnych ośrodków naukowych na świecie. Istotnym elementem jest też to, że Autor powołuje się na najnowsze publikacje, co świadczy o dobrej znajomości aktualnego stanu badań w dziedzinie. Doktorant wykazał umiejętność dogłębnej analizy literaturowej, co potwierdzają szczegółowe odniesienia do publikacji naukowych w artykułach stanowiących podstawę rozprawy, na przykład w publikacji dotyczącej zastosowania dwuwymiarowych kopuł probabilistycznych do modelowania niezawodności podsystemów pojazdu, gdzie przeanalizowano szeroki katalog metod stosowanych w badaniach niezawodności pojazdów.

Struktura rozprawy jest logiczna i przejrzysta. Praca rozpoczyna się od streszczenia w języku polskim i angielskim, następnie Autor przedstawia uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej oraz wprowadza czytelnika w problematykę rozprawy. W dalszej części pracy zaprezentowano cel i zakres badań, opis metodyki badawczej oraz szczegółowe wyniki przeprowadzonych analiz teoretycznych i symulacyjnych. Pracę kończy podsumowanie i wnioski.

Główny cel pracy, którym było opracowanie oraz implementacja modeli probabilistycznych i symulacyjnych do wieloaspektowej analizy niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-osobowych, jest jasno określony i został w pełni zrealizowany. Autor zdekomponował cel główny na sześć szczegółowych celów badawczych, które obejmowały:

- estymację funkcji niezawodności na podstawie danych empirycznych;
- opracowanie modelu niezawodnościowego uwzględniającego obsługi okresowe;
- opracowanie i porównanie modeli gotowości pojazdów o zróżnicowanej przestrzeni stanów;
- zbadanie wpływu intensywności użytkowania pojazdów na ich gotowość;
- identyfikację podsystemów pojazdu o największej awaryjności;
- określenie gotowości systemu transportowego oraz wpływu procesów uszkodzeń i napraw na jego gotowość.

Strona metodyczna rozprawy jest na wysokim poziomie. Autor wykorzystał zaawansowane metody matematyczne, statystyczne i symulacyjne, w tym: procesy Markowa i semi-Markowa, estymator Kaplana-Meiera, metody Monte Carlo, kopule probabilistyczne oraz miary ważności niezawodnościowej. Modele zostały zweryfikowane na podstawie danych empirycznych, co zwiększa ich wiarygodność i przydatność praktyczną.

Istotnym elementem pracy jest wieloaspektowe podejście do modelowania niezawodności i gotowości pojazdów. Autor analizuje pojazd w trzech ujęciach: jako obiekt techniczny, jako system techniczny złożony z podsystemów oraz jako komponent (element) systemu transportowego. Takie kompleksowe podejście pozwala na pełniejsze zrozumienie problematyki niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-osobowych, a także na optymalizację poziomów redundancji w systemach transportowych.

3. Ocena merytoryczna i uwagi szczegółowe

Oceniana rozprawa ma charakter badawczy, przy czym jest to połączenie analiz teoretycznych, badań empirycznych i symulacyjnych. Autor opracował szereg modeli matematycznych i symulacyjnych, które zostały zastosowane do analizy niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-osobowych. Modele te zostały zwalidowane na podstawie danych empirycznych zebranych dla 19 i 55 pojazdów marki Honker 2000, co zwiększa ich wiarygodność i przydatność praktyczną.

Ocenę elementów naukowych rozprawy, jako szczególnego dorobku Doktoranta, chciałbym podsumować w następujących punktach:

1. Opracowanie metodyki analizy niezawodności pojazdów w oparciu o cenzorowane dane eksploatacyjne. Autor zastosował estymator Kaplana-Meiera do wyznaczenia funkcji niezawodności pojazdów, co umożliwiło uwzględnienie obserwacji cenzorowanych w analizie. Jest to istotne, gdyż pozwala na uwzględnienie wszystkich dostępnych danych, a nie tylko tych, dla których zaobserwowano awarie. W szczególności w publikacji [P1] Doktorant opracował modele dla funkcji niezawodności pojazdów w dziedzinie przebiegu, uzyskując trzy alternatywne charakterystyki: model wykładniczy, model Weibulla oraz model oparty na sieci neuronowej, których dokładność została zweryfikowana poprzez współczynniki korelacji przekraczające 0.99.
2. Rozwój modeli semi-Markowa o zróżnicowanej przestrzeni stanów. Autor opracował trzy modele semi-Markowa (3-, 4- i 9-stanowe), które zostały wykorzystane do analizy gotowości pojazdów. Modele te uwzględniają różne aspekty procesu eksploatacji, w tym użytkowanie, obsługiwane okresowe i naprawy. Autor wykazał, że model semi-Markowa jest odpowiedni do modelowania procesów eksploatacji pojazdów, gdyż uwzględnia dowolne rozkłady czasów przejść międzystanowych. W publikacji [P4] Doktorant zaprezentował szczegółową metodykę wyznaczania funkcji niezawodności na podstawie 3-stanowego modelu semi-Markowa w czasie ciągłym, wykorzystując transformatę Laplace'a do rozwiązywania równań macierzowych.
3. Zastosowanie metod symulacyjnych Monte Carlo do analizy wpływu intensywności użytkowania na gotowość pojazdów. Autor opracował algorytm symulacyjny, który umożliwia badanie wpływu intensywności użytkowania pojazdów na ich gotowość. Wykazał, że zwiększenie wartości oczekiwanej dobowego przebiegu pojazdu zmniejsza wartości wskaźników gotowości, co ma istotne znaczenie dla planowania eksploatacji pojazdów. W pracy [P3] Doktorant udowodnił, że wzrost parametru prawdopodobieństwa przydziału zadania transportowego o wartość 0,01 powoduje zmniejszenie wartości wskaźników gotowości i zdolności o około 0,002, a wzrost wartości oczekiwanej dobowego przebiegu o 1 km wpływa na redukcję wartości tych wskaźników o około 0,0008.
4. Zastosowanie dwuwymiarowych kopul probablistycznych do modelowania niezawodności podsystemów pojazdu. Autor wykorzystał kopule archimedesowskie (Franka, Clayтона i Gumbela) do modelowania niezawodności podsystemów pojazdu w dwuwymiarowej dziedzinie czasu eksploatacji i przebiegu. Jest to innowacyjne podejście, które umożliwia

uwzględnienie zależności między czasem eksploatacji a wielkością wykonanej pracy. Jak wykazano w publikacji [P6], dla wszystkich podsystemów pojazdu nawiązano znaczącą zależność monotoniczną mierzoną za pomocą współczynnika tau Kendalla na poziomie od 0,5804 do 0,8197.

5. Identyfikacja podsystemów o największej awaryjności za pomocą miar ważności niezawodnościowej. Autor wykorzystał miary Birnbauma, miarę krytyczną i miarę Barlowa-Proschana do określenia podsystemów, które najbardziej wpływają na niezawodność pojazdu. Wykazał, że najbardziej awaryjnymi podsystemami są silnik, instalacja elektryczna i układ przeniesienia napędu. W publikacji [P6] wykazano, że miara Birnbauma oraz miara krytyczna wskazały silnik i instalację elektryczną jako podsystemy najbardziej awaryjne w 29 i 6 punktach pomiarowych dwuwymiarowej dziedziny funkcji niezawodności.
6. Analiza redundancji w systemach transportowych. Autor opracował model systemu transportowego o strukturze progowej $k \times n$ i wykazał, że możliwa jest redukcja liczby pojazdów z 19 do 10 przy zachowaniu wartości wskaźników gotowości i efektywności systemu powyżej 0,95. Wykazał również, że istotne dla systemu jest utrzymywanie odpowiednich zdolności do naprawy uszkodzonych komponentów. W publikacji [P5] udowodniono, że nawet 10-krotny wzrost intensywności uszkodzeń nie spowodowałby obniżenia wartości wskaźników poniżej 0,90, pod warunkiem utrzymania bieżącej intensywności napraw.

Ponadto Autor wykazał, że stosowanie opracowanych modeli i metod może przynieść wymierne korzyści ekonomiczne, poprzez optymalizację poziomu redundancji w systemach transportowych. W publikacji [P5] oszacował, że potencjalna redukcja kosztów systemu transportowego przy zmniejszeniu liczebności pojazdów z 19 do 10 wynosi ponad 53,2 tys. USD rocznie, co przekłada się na 47% oszczędności. Doktorant przeprowadził również analizę wrażliwości zoptymalizowanego systemu transportowego, która wykazała, że nawet przy znacznym pogorszeniu parametrów niezawodnościowych, system zachowuje wymaganą dostępność, co świadczy o solidności zaproponowanego rozwiązania.

Warto również podkreślić, że podstawę rozprawy doktorskiej stanowi cykl sześciu powiązanych tematycznie publikacji naukowych (w pracy jako załączniki B, opublikowanych w czasopiśmie z listy Journal Citation Reports. Świadczy to o wysokim poziomie naukowym przeprowadzonych badań i ich uznaniu przez międzynarodowe środowisko naukowe.

Biorąc pod uwagę zakres i jakość badań przedstawionych w rozprawie doktorskiej, można wskazać kilka elementów, które mogłyby zostać rozwinięte lub udoskonalone:

- a) Badania opierają się głównie na danych dotyczących jednego typu pojazdu (Honker 2000), chociaż w publikacji [P5] Doktorant rozszerzył analizy także na pojazdy ciężarowe Iveco Stralis. Dalsza rozbudowa o inne typy pojazdów ciężarowo-osobowych lub porównanie z pojazdami cywilnymi mogłaby zwiększyć uniwersalność opracowanych modeli.
- b) W analizie wpływu czynników eksploatacyjnych na niezawodność pojazdów nie uwzględniono w pełni warunków ich użytkowania (np. terenu, klimatu), które mogą istotnie wpływać na awaryjność. W publikacji [P6] Doktorant zidentyfikował ten aspekt jako potencjalny kierunek dalszych badań.
- c) Modele niezawodnościowe oparte na kopulach probabilistycznych, zaprezentowane w publikacji [P6], zostały opracowane na poziomie podsystemów pojazdu. Uszczegółowienie analizy do poziomu mechanizmów lub pojedynczych komponentów mogłoby przynieść bardziej precyzyjne wyniki, jednak jak słusznie zauważył Autor, wiązałoby się to ze znacznie większą złożonością obliczeniową i koniecznością zebrania obszerniejszej bazy danych empirycznych.
- d) Modele symulacyjne Monte Carlo oparte są na uproszczonych założeniach, które mogą nie w pełni odzwierciedlać rzeczywisty proces eksploatacji pojazdów w warunkach wojskowych. W publikacji [P3] Doktorant wskazał, że rozwinięciem opracowanego modelu mogłoby być uwzględnienie sezonowości procesu eksploatacji i wpływu na intensywność użytkowania pojazdów.

Jednak pomimo powyższych uwag, nie zmienia to ogólnej pozytywnej oceny rozprawy. Są to raczej sugestie do dalszych badań niż zarzuty do obecnej pracy.

Chciałbym poznać zdanie Doktoranta w następujących kwestiach:

1. W jaki sposób opracowane modele niezawodności i gotowości mogą być zaimplementowane w systemach informatycznych wspierających proces eksploatacji w SZ RP?
2. W publikacji [P5] przeprowadzono badania zarówno na pojazdach ciężarowo-osobowych, jak i ciężarowych. Jakie modyfikacje należałoby wprowadzić, aby modele opracowane dla tych dwóch typów pojazdów mogły być zastosowane do czołgów, wozów bojowych, kołowych transporterów opancerzonych lub innych specjalistycznych pojazdów wojskowych?

3. Jaka jest Pana opinia na temat wpływu rozwoju systemów autonomicznych i zdalnie sterowanych na przyszłość wojskowych systemów transportowych oraz na metodykę oceny ich niezawodności i gotowości? Czy zaproponowane w pracy modele mogłyby być adaptowane do takich systemów?
4. W modelu semi-Markowa wykazano, że skrócenie czasu oczekiwania na naprawę o 50% skutkowałoby wzrostem wskaźników gotowości i zdatności o ponad 0,04. Jakie konkretne zmiany organizacyjne w planowo-zapobiegawczej strategii eksploatacji, obowiązującej w SZ RP, mogłyby przyczynić się do takiej redukcji czasów oczekiwania?
5. W publikacji [P5] stwierdzono „nawet 10-krotny wzrost intensywności uszkodzeń nie spowodowałby obniżenia wartości wskaźników poniżej 0,90, pod warunkiem utrzymania bieżącej intensywności napraw.” Jak Pan interpretuje ten zapis funkcjonalnie dla konkretnego systemu?
6. W publikacji [P6] zastosowano miary ważności niezawodnościowej do identyfikacji krytycznych podsystemów pojazdu. Jak Pan ocenia możliwość zastosowania tych miar do optymalizacji poziomów redundancji w innych systemach wojskowych, takich jak systemy łączności, dowodzenia czy uzbrojenia?

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam pozytywnie, ponieważ Autor właściwie zrealizował w zaplanowanym zakresie określony problem naukowy z wykorzystaniem wiedzy teoretycznej i właściwej metodologii badawczej. Praca kpt. mgr inż. Mateusza Oszczypały jest bardzo dobrze zrealizowaną pracą naukową. Autor dokonał wnikliwej analizy literatury, opracował oryginalne modele niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-osobowych, a następnie zweryfikował je na podstawie danych empirycznych.

Szczególne walory pracy to:

- Wieloaspektowe podejście do modelowania niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-osobowych;
- Zastosowanie zaawansowanych metod matematycznych, statystycznych i symulacyjnych;
- Wykorzystanie rzeczywistych danych eksploatacyjnych do weryfikacji opracowanych modeli;
- Opracowanie modeli i metod, które mogą być zastosowane w praktyce do optymalizacji systemów transportowych;

- Publikacja wyników badań w renomowanych czasopismach naukowych.

Praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zarówno pod względem merytorycznym, jak i formalnym. Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a uzyskane wyniki stanowią oryginalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej „inżynieria mechaniczna”.

Uważam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska kpt. mgr inż. Mateusza Oszczypały spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2021 poz. 478 z późn. zm.), dopuszczenie jej do publicznej obrony i kontynuowanie czynności w ramach przewodu doktorskiego. Jednocześnie do Rady Dyscypliny Naukowej kieruje wniosek o wyróżnienie Doktoranta.