

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej kpt. mgr. inż. Mateusza Oszczypały  
pt.: „Modelowanie niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-  
osobowych funkcjonujących w wojskowych systemach  
transportowych”**

*Podstawa opracowania: Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna”  
Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego nr 45/RDN IM/2025 z dnia 16  
kwietnia 2025 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej kpt. mgr. inż.  
Mateusza OSZCZYPAŁY*

Dokumentację merytoryczną do sporządzenia recenzji stanowi egzemplarz rozprawy doktorskiej Pana kpt. mgr. inż. Mateusza OSZCZYPAŁY pt. „Modelowanie niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-osobowych funkcjonujących w wojskowych systemach transportowych”.

Promotorem rozprawy jest Pan płk dr hab. inż. Jarosław Ziółkowski, natomiast promotorem pomocniczym ppłk dr inż. Piotr Kędzierski.

### **1. Uwagi ogólne o doborze tematu rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zagadnień modelowania niezawodności i gotowości wojskowych pojazdów ciężarowo-osobowych Honker 2000, funkcjonujących jako elementy systemu transportowego Sił Zbrojnych RP. Problematyka pracy została osadzona w realnym i aktualnym kontekście eksploatacyjnym oraz logistycznym, a jej celem było opracowanie i wdrożenie probabilistycznych i symulacyjnych modeli analizy niezawodności i gotowości, które mogłyby zostać zaimplementowane w systemach informatycznych wspierających zarządzanie eksploatacją sprzętu wojskowego.

Podjęta tematyka badawcza charakteryzuje się wysokim stopniem użyteczności oraz interdyscyplinarnością, łącząc elementy inżynierii mechanicznej, logistyki wojskowej, modelowania matematycznego i analizy statystycznej. Wybór problematyki badawczej uważam za uzasadniony, zarówno z punktu widzenia aktualnych potrzeb eksploatacyjnych SZ RP, jak i możliwości praktycznego zastosowania uzyskanych wyników w systemach wspomagania decyzji i zarządzania flotą transportową.

W celu realizacji celu głównego, Autor rozprawy opracował modele niezawodnościowe dla siedmiu podstawowych podsystemów pojazdu ciężarowo-osobowego z wykorzystaniem kopuł probabilistycznych w dwuwymiarowej dziedzinie czasu i przebiegu;

- ✓ Zastosował trzy typy kopuł Archimedesowskich (Claytona, Franka, Gumbela), identyfikując najlepiej dopasowane modele na podstawie statystyki Craméra-von Misesa;
- ✓ Wprowadził i obliczył miary ważności niezawodnościowej (BIM, CIM, BPIM), wskazując kluczowe podsystemy wpływające na niezawodność całego pojazdu;
- ✓ Przeprowadził analizę niezawodności systemu transportowego o strukturze progowej typu  $k$  z  $n$  w oparciu o model Markowa;
- ✓ Zaimplementował metody probabilistyczne i symulacyjne (Monte Carlo) do wyznaczenia gotowości systemu transportowego i efektywności realizacji zadań;
- ✓ Przeprowadził analizę wrażliwości modelu na zmiany parametrów uszkodzeń i napraw oraz opracował metodę optymalizacji struktury systemu transportowego w kontekście kosztów i skuteczności;
- ✓ Oszacował wpływ wielkości floty na wskaźniki eksploatacyjne oraz zidentyfikował potencjalne oszczędności wynikające z racjonalizacji struktury systemu.

Rozprawa ma charakter empiryczny i została oparta na rzeczywistych danych eksploatacyjnych pochodzących z dokumentacji wojskowej (PST, KUT), co dodatkowo podnosi jej wartość praktyczną. Badania objęły próbę 55 pojazdów na przestrzeni pięciu lat oraz analizę systemu transportowego złożonego z 19 pojazdów.

Rozprawa została napisana w sposób uporządkowany, obejmuje 8 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz bibliografii liczący 93 pozycje literaturowe, z czego znaczna część pochodzi z uznanych źródeł naukowych, w tym czasopism indeksowanych w bazach JCR. Praca zawiera liczne tabele, wykresy, modele matematyczne oraz wyniki symulacji, co świadczy o wysokim stopniu zaawansowania metod badawczych.

Uważam, że problem badawczy został sformułowany trafnie, temat rozprawy jest aktualny i ma znaczenie zarówno naukowe, jak i aplikacyjne. Zakres przeprowadzonych analiz, a także przedstawione wnioski, jednoznacznie wskazują,

że Autor w sposób samodzielny i kompetentny przeprowadził prace badawcze i wyciągnął istotne wnioski o charakterze praktycznym i poznawczym.

## **2. Analiza struktury rozprawy – podział treści na rozdziały**

Struktura rozprawy doktorskiej została zaprojektowana w sposób logiczny i spójny z zakresem badań oraz celami naukowymi pracy. Układ treści odzwierciedla stopniowe przechodzenie od ogólnych założeń badawczych i charakterystyki problemu, przez rozwój modeli matematycznych i symulacyjnych, aż po ich aplikację w analizie gotowości systemów transportowych. Rozdziały 4, 5 i 6 stanowią trzon merytoryczny pracy, w których zaprezentowano kolejno: modelowanie procesu eksploatacji pojazdów z uwzględnieniem niezawodności i gotowości, analizę pojazdu jako złożonego systemu technicznego oraz ocenę funkcjonowania pojazdów jako komponentów wojskowego systemu transportowego. Taki układ umożliwia systematyczne przedstawienie wyników badań i ich interpretację w kontekście rzeczywistych warunków eksploatacji, a jednocześnie podkreśla wieloaspektowy charakter podjętej problematyki. Całość uzupełniają rozdziały zawierające uzasadnienie wyboru tematu, wprowadzenie, wnioski końcowe oraz załączniki dokumentujące zarówno kod źródłowy modeli, jak i pełne teksty publikacji naukowych stanowiących podstawę rozprawy.

**Rozdział 2** pełni funkcję merytorycznego wprowadzenia do właściwej części badań, stanowiąc jednocześnie uzasadnienie podjęcia tematyki związanej z analizą niezawodnościową wojskowych pojazdów ciężarowo-osobowych. Autor rozpoczyna od osadzenia problematyki badawczej w szerszym kontekście geopolitycznym, wskazując, że obecne konflikty zbrojne – w szczególności wojna Rosji z Ukrainą – oraz zwiększone zagrożenie globalne skutkują rosnącym znaczeniem gotowości operacyjnej sił zbrojnych państw NATO.

W tym kontekście autor zwraca szczególną uwagę na znaczenie systemu transportowego Sił Zbrojnych RP jako elementu krytycznego dla realizacji zadań logistycznych. Podkreślono, że skuteczne przemieszczanie wojsk i zasobów (amunicji, paliwa, żywności) jest możliwe jedynie przy zachowaniu wysokiego poziomu niezawodności i gotowości pojazdów. Utrzymanie tych parametrów w praktyce wymaga jednak zastosowania strukturalnej redundancji, co wiąże się z wysokimi kosztami utrzymania nadmiarowego sprzętu.

Rozdział zawiera także przegląd stanu wiedzy w zakresie modelowania niezawodności środków transportu. Autor wskazuje, że literatura naukowa dotycząca wojskowych pojazdów transportowych, zwłaszcza w polskim kontekście, jest uboga, głównie z uwagi na ograniczony dostęp do danych objętych klauzulami tajności. Podkreśla potrzebę opracowania specjalistycznych modeli probabilistycznych (np. Markowa i semi-Markowa), które odzwierciedlają rzeczywiste warunki eksploatacji wojskowych systemów transportowych i mogą być wykorzystane do ich optymalizacji.

W dalszej części rozdziału przedstawiono przegląd istniejących modeli eksploatacyjnych wykorzystywanych w analizie niezawodności pojazdów. Autor omawia zarówno modele o małej przestrzeni stanowej (np. 3- lub 4-stanowe), jak i bardziej złożone (16-stanowe), podkreślając kompromis między dokładnością odwzorowania procesu eksploatacji a złożonością obliczeniową. Opiszano również wykorzystanie symulacji Monte Carlo w kontekście walidacji modeli i analizy scenariuszy eksploatacyjnych.

Na zakończenie rozdziału autor uzasadnia wybór pojazdów ciężarowo-osobowych jako przedmiotu badań. Decyzja ta została podyktowana zarówno luką tematyczną w literaturze, jak i praktycznym znaczeniem tych pojazdów, które stanowią istotną część floty transportowej Wojska Polskiego. Autor podkreśla, że wyniki prowadzonych analiz mogą przyczynić się do zwiększenia efektywności systemu transportowego SZ RP.

Rozdział ten stanowi solidne zaplecze teoretyczne dla dalszych prac, a jednocześnie uzasadnia potrzebę prowadzenia badań o charakterze empirycznym i aplikacyjnym w zakresie wojskowej logistyki transportowej.

**Rozdział 3** stanowi podstawę konstrukcji merytorycznej całej rozprawy i obejmuje szczegółowe przedstawienie przedmiotu badań, a także celów i zakresu pracy. Autor skupia się na pojazdach ciężarowo-osobowych, które odgrywają istotną rolę w systemie transportowym Sił Zbrojnych RP. Przedmiotem szczegółowej analizy stał się pojazd Honker 2000, wykorzystywany do przewozu ludzi i ładunków, zaklasyfikowany do grupy 1.1 pojazdów wysokiej mobilności. Przedstawiono jego dane techniczne, właściwości użytkowe oraz miejsce w strukturze wojskowego parku samochodowego.

Autor szczegółowo opisuje procedury eksploatacji pojazdów w SZ RP, realizowane w oparciu o strategię planowo-zapobiegawczą, która uwzględnia interwały czasowe oraz przebiegi pojazdów jako kryteria wykonywania czynności obsługowych.

Omówiono system dokumentacji eksploatacyjnej – m.in. rozkazy wyjazdu, protokoły stanu technicznego oraz karty usług technicznych (KUT), które stanowią podstawowe źródła danych eksploatacyjnych.

W toku badań autor zgromadził dwie bazy danych: pierwszą – obejmującą 19 pojazdów Honker 2000 w cyklu użytkowania w latach 2017, 2019 i 2020, oraz drugą – uwzględniającą uszkodzenia podzespołów 55 pojazdów w ciągu 5 lat. Dane te posłużyły do odtworzenia procesów eksploatacyjnych oraz analizy niezawodnościowej i gotowościowej.

W drugiej części rozdziału przedstawiono koncepcję badawczą pracy, zgodnie z którą pojazd ciężarowo-osobowy analizowany jest jako złożony system techniczny – zarówno w ujęciu indywidualnym, jak i jako komponent floty realizującej zadania transportowe. Podejście to umożliwia wielowymiarową analizę niezawodności zarówno całych pojazdów, jak i ich podsystemów.

Sformułowano hipotezę badawczą, zgodnie z którą zastosowanie metod probabilistycznych i symulacyjnych pozwala na efektywne modelowanie niezawodności i gotowości pojazdów wojskowych. Na jej podstawie określono główny cel pracy, którym jest opracowanie i implementacja modeli probabilistycznych i symulacyjnych służących do oceny niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-osobowych eksploatowanych w strukturach wojskowych.

Cel główny został uszczegółowiony w postaci sześciu celów szczegółowych, obejmujących m.in. estymację funkcji niezawodności z danych empirycznych, modelowanie procesów obsługowych, analizę gotowości w różnych konfiguracjach stanowych oraz identyfikację najbardziej awaryjnych podsystemów pojazdu. Szczególną uwagę zwrócono również na analizę gotowości całego systemu transportowego w kontekście poziomów redundancji floty.

Rozdział kończy się prezentacją schematu realizacji celów badawczych (Rys. 3.4), który ilustruje zależności między przyjętymi założeniami, metodami badawczymi i danymi empirycznymi. Tym samym rozdział ten stanowi punkt wyjścia do rozdziałów 4–6, w których omówiono szczegółowe wyniki analiz i badań.

**Rozdział 4** stanowi zasadniczy filar analityczny rozprawy doktorskiej, w którym autor przedstawia kompleksowe podejście do matematycznego modelowania niezawodności i gotowości eksploatacyjnej pojazdów ciężarowo-osobowych marki Honker 2000. Przeprowadzone analizy odpowiadają realizacji celów szczegółowych

[C1–C4] i opierają się na metodach probabilistycznych, stochastycznych oraz symulacyjnych.

W części 4.1 dokonano analizy niezawodności w dwóch podstawowych dziedzinach: czasu oraz przebiegu pojazdu. Autor szczegółowo przedstawia klasyczne ujęcie probabilistyczne niezawodności, w tym funkcje: niezawodności, zawodności, gęstości uszkodzeń oraz intensywności uszkodzeń, formułując je w sposób zgodny z rachunkiem prawdopodobieństwa i teorią procesów stochastycznych.

Na podstawie danych empirycznych pochodzących z rzeczywistej eksploatacji przeprowadzono estymację funkcji niezawodności z uwzględnieniem danych weryfikowanych, stosując estymator Kaplana-Meiera. Uzyskane wartości przybliżono rozkładami wykładniczym oraz Weibulla, a także modelem sieci neuronowej MLP, co umożliwiło określenie oczekiwanych przebiegów międzyawaryjnych, które dla modelu Weibulla wyniosły ok. 4686 km. Wyniki te dokumentują realizację celu szczegółowego [C1].

W części 4.1.2 autor opracował 3-stanowy model semi-Markowa do analizy niezawodności w dziedzinie czasu. Poprzez agregację 9-stanowego modelu proces eksploatacyjny uproszczono do trzech stanów: użytkowania, obsługiwanego okresowego i niezdatności. Model pozwolił na uzyskanie funkcji niezawodności niezależnej od stanu początkowego pojazdu oraz umożliwił wyznaczenie charakterystyk eksploatacyjnych, takich jak funkcja intensywności uszkodzeń. Wyniki tej części są zgodne z realizacją celu [C2].

W kolejnym podrozdziale 4.2 przedstawiono modelowanie gotowości technicznej pojazdów. Autor opracował trzy modele semi-Markowa o różnych przestrzeniach stanowych: 3-, 4- i 9-stanowe, których szczegółowość odwzorowania procesu eksploatacyjnego wzrasta wraz z liczbą stanów. Dla każdego z modeli obliczono prawdopodobieństwa ergodyczne, oczekiwane czasy przebywania w stanach oraz wskaźniki gotowości funkcjonalnej. Najwyższy poziom odwzorowania rzeczywistego procesu osiągnięto w modelu 9-stanowym, dla którego wskaźnik gotowości  $K_r$  wyniósł 0,9073. W tej części zrealizowano cel szczegółowy [C3].

Dalsze analizy objęły modele symulacyjne Monte Carlo (podrozdział 4.2.2), skonstruowane na podstawie danych empirycznych oraz struktury przestrzeni stanowej zaadaptowanej z modelu 4-stanowego. Opracowano 16 wariantów modeli (MC1–MC16), różniących się typem rozkładów przypisanych do podprocesów eksploatacyjnych. Symulacje przeprowadzono na próbie 19 pojazdów przez okres

odpowiadający 20 latom użytkowania. Najlepszy okazał się model MC1, którego wyniki wykazały wysoką zgodność z modelem semi-Markowa, co potwierdziło jego poprawność i trafność odwzorowania procesu eksploatacji. Na podstawie wyników symulacji wyznaczono wskaźniki gotowości i zdatności oraz przeprowadzono analizę wrażliwości, która ujawniła silną zależność gotowości od intensywności użytkowania. Przeprowadzone badania spełniają założenia celu szczegółowego [C4].

Rozdział 4 wyróżnia się wysokim poziomem szczegółowości, bogactwem formalizmów matematycznych oraz aplikacyjnym charakterem analiz, stanowiąc fundament dla praktycznego wykorzystania wyników w planowaniu eksploatacji wojskowych środków transportu.

**Rozdział 5** stanowi kluczowy etap realizacji celu szczegółowego [C5] rozprawy, którym była identyfikacja podsystemów pojazdu o największej awaryjności i kluczowym znaczeniu dla niezawodności całego systemu technicznego. W odróżnieniu od wcześniejszych analiz (rozdz. 4.1), gdzie pojazd traktowano jako obiekt monolityczny, w niniejszym rozdziale przyjęto jego dekompozycję na siedem podsystemów funkcjonalnych: silnik, układ przeniesienia napędu, układ hamulcowy, układ kierowniczy, zawieszenie, instalację elektryczną i nadwozie. Analiza została oparta na danych empirycznych z 575 interwałami międzyuszkodzeniowymi oraz 647 obserwacjami, pozyskanymi dla 55 pojazdów marki Honker 2000 z pięcioletniego okresu eksploatacji.

Zastosowano zaawansowaną metodę statystyczną opartą na dwuwymiarowych kopulach archimedesowskich (Frank, Clayton, Gumbel), umożliwiającą modelowanie współzależności pomiędzy czasem eksploatacji a przebiegiem. Analiza wykazała, że najlepsze dopasowanie do danych empirycznych uzyskano dla kopul Clayтона, co potwierdziły wyniki testu Cramera-von Misesa. Na podstawie tych modeli wyznaczono funkcje niezawodności dla każdego z podsystemów pojazdu, umożliwiając porównanie ich właściwości eksploatacyjnych w dwuwymiarowej przestrzeni czasu i dystansu.

W dalszej części rozdziału zaprezentowano model pojazdu jako systemu szeregowego, w którym niezawodność całkowita wynika z iloczynu niezawodności jego komponentów. Otrzymana funkcja niezawodności systemu wykazała szybki spadek prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy, szczególnie przy wzroście przebiegu powyżej 5000 km oraz czasu powyżej 500 dni.

Do oceny istotności poszczególnych podsystemów wykorzystano mierniki ważności: Birnbauma (BIM), krytyczności (CIM) oraz Barlowa-Proschana (BPIM). Wyniki uzyskane dla 35 punktów pomiarowych wykazały, że najbardziej awaryjnymi komponentami systemu są silnik i instalacja elektryczna, natomiast najmniejszą zawodność wykazano dla zawieszenia i układu hamulcowego. Najwyższą wartość wskaźnika BPIM uzyskał silnik (0,3434), co jednoznacznie wskazuje na jego dominujący wpływ na ogólną niezawodność pojazdu.

Rozdział kończy się wnioskami praktycznymi, wśród których wskazano m.in. możliwość wykorzystania opracowanego modelu do identyfikacji „słabych ogniw” systemu oraz optymalizacji harmonogramu obsługi technicznych. Przedstawione metody i wyniki stanowią oryginalny wkład w rozwój badań nad niezawodnością systemów technicznych pojazdów wojskowych i mogą stanowić podstawę do dalszych prac aplikacyjnych w obszarze logistyki technicznej.

**Rozdział 6** stanowi realizację celu szczegółowego [C6] niniejszej rozprawy doktorskiej, który dotyczył wyznaczenia gotowości pojazdu jako komponentu wojskowego systemu transportowego oraz oceny wpływu parametrów niezawodnościowych na efektywność funkcjonowania systemu.

W pierwszej części rozdziału zidentyfikowano system transportowy jako redundantną strukturę progową typu  $k$  z  $n$ , w której system spełnia swoje funkcje, o ile liczba zdalnych komponentów jest większa lub równa wymaganej liczbie  $k$ . Analiza empiryczna wykazała wysoki poziom redundancji, przy jednoczesnym relatywnie niskim wykorzystaniu floty. Model niezawodnościowy opracowano na podstawie procesu Markowa dla systemu złożonego z jednorodnych komponentów pracujących w trybie gorącej rezerwy (*hot standby*), z przyjętymi parametrami intensywności uszkodzeń i napraw opartymi o dane eksploatacyjne.

W dalszej części rozdziału przedstawiono dwa podejścia do wyznaczania gotowości systemu: analityczne (probabilistyczne) i symulacyjne (Monte Carlo). Wykorzystano również zaadaptowany z wojsk amerykańskich wskaźnik efektywności funkcjonalnej TPM (Technical Performance Measure), obrazujący stopień realizacji zadań transportowych w warunkach ograniczonej dostępności pojazdów. Oba podejścia wykazały wysoką zgodność obliczeniową, a minimalna liczba pojazdów potrzebna do zapewnienia gotowości na poziomie 0,95 została określona na 10 jednostek.

Następnie przeprowadzono analizę wrażliwości systemu na zmiany parametrów intensywności uszkodzeń i napraw. Wykazano, że system cechuje się wysoką odpornością na wzrost awaryjności, o ile zachowana zostaje odpowiednia zdolność remontowa. Ekstremalne scenariusze (np. wielokrotne obniżenie intensywności napraw) prowadzą do spadku gotowości i efektywności, ale ich prawdopodobieństwo jest niskie.

Końcowym etapem rozdziału była analiza kosztowa, uwzględniająca roczne nakłady na zakup i eksploatację pojazdów. Wykazano, że możliwa jest znacząca (ok. 47%) redukcja kosztów przy zachowaniu wysokich poziomów gotowości i efektywności systemu, co wskazuje na istotne znaczenie opracowanego modelu również w kontekście ekonomicznym i planistycznym.

**Rozdział 7** stanowi syntetyczne podsumowanie całokształtu badań przeprowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej, której nadrzędnym celem było opracowanie i wdrożenie modeli probabilistycznych oraz symulacyjnych do kompleksowej analizy niezawodności i gotowości wojskowych pojazdów ciężarowo-osobowych. Badania oparto na bogatym materiale empirycznym, obejmującym dane eksploatacyjne dla łącznie 74 pojazdów Honker 2000, co czyni je unikatowym przedsięwzięciem badawczym w krajowych warunkach.

Wszystkie cele szczegółowe [C1]–[C6] zostały w pełni zrealizowane:

- **[C1]** Estymacja funkcji niezawodności z wykorzystaniem estymatora Kaplana-Meiera, uwzględniającego dane cenzorowane, pozwoliła określić oczekiwany przebieg między uszkodzeniami w zależności od przyjętego modelu (wykładniczy: 4255,32 km; Weibulla: 4686,22 km).
- **[C2, C3]** Opracowano i wdrożono modele semi-Markowa o trój-, cztero- i dziewięciostanowej przestrzeni stanowej. Modele te umożliwiły odwzorowanie procesu eksploatacji pojazdów i wyznaczenie funkcji niezawodności oraz wartości wskaźników gotowości, które osiągały poziom 0,90–0,91.
- **[C4]** W ramach podejścia symulacyjnego z zastosowaniem metody Monte Carlo opracowano model uwzględniający cztery stany eksploatacyjne pojazdu. Wykazano, że nawet niewielkie zwiększenie dziennego przebiegu obniża wskaźniki gotowości, co pozwala na analizę wpływu intensyfikacji użytkowania.
- **[C5]** Ujęcie pojazdu jako złożonego systemu technicznego umożliwiło opracowanie dwuwymiarowych funkcji niezawodności bazujących na kopulach Claytona. Zidentyfikowano „słabe ogniwa” systemu (silnik, instalacja

elektryczna), oraz podsystemy najbardziej niezawodne (zawieszenie, układ hamulcowy).

- **[C6]** Analiza gotowości systemu transportowego w strukturze progowej  $k$  z  $n$  umożliwiła optymalizację liczby pojazdów (z 19 do 10) przy zachowaniu wskaźników gotowości i efektywności powyżej 0,95. Wykazano odporność systemu na wzrost intensywności uszkodzeń, o ile zachowane są odpowiednie zdolności remontowe.

W aspekcie naukowym rozprawa wniosła szereg elementów nowatorskich do dyscypliny inżynierii mechanicznej:

- po raz pierwszy w literaturze krajowej dokonano formalnej analizy niezawodnościowej wojskowych pojazdów ciężarowo-osobowych na podstawie danych rzeczywistych;
- zaimplementowano modele semi-Markowa o różnej granularności stanowej, umożliwiające precyzyjne odwzorowanie procesów eksploatacyjnych;
- opracowano model symulacyjny pozwalający prognozować wpływ intensywności użytkowania na gotowość pojazdów, uwzględniający deterministyczne cykle obsługowe;
- rozwinęto zastosowanie dwuwymiarowych kopul probablistycznych w analizie niezawodności podsystemów pojazdów oraz zaproponowano rozszerzenie miar ważności (BIM, CIM, BPIM) do przestrzeni dwuwymiarowej;
- sformułowano metodykę do analizy gotowości i efektywności systemów technicznych obsługujących zmienne strumienie zadań, co pozwala na adaptację modelu do różnych klas pojazdów i systemów transportowych.

Opracowane modele mają potencjalne zastosowanie praktyczne w Siłach Zbrojnych RP, w szczególności w zakresie wsparcia decyzji logistycznych w systemach informatycznych typu PWE ZWSI RON. Wdrożenie proponowanych rozwiązań może zwiększyć efektywność zarządzania zasobami technicznymi, zredukować koszty oraz poprawić gotowość operacyjną jednostek wojskowych.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

Rozprawa doktorska ma wyraźnie charakter aplikacyjny i praktyczny, co należy uznać za jej kluczowy atut. Skoncentrowana została na rozwiązaniu istotnego problemu techniczno-eksploatacyjnego, związanego z analizą niezawodności

i gotowości wojskowych pojazdów ciężarowo-osobowych w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Przedmiot pracy posiada bezpośrednie znaczenie operacyjne dla Sił Zbrojnych RP, a zaproponowane rozwiązania mogą być implementowane w systemach wsparcia eksploatacji (PWE ZWSI RON), co czyni rozprawę nie tylko naukowo wartościową, ale i strategicznie użyteczną.

Autor umiejętnie łączy podejście teoretyczne z praktyką inżynierską. Dobór narzędzi badawczych – w tym modeli semi-Markowa, kopuł probabilistycznych i metod symulacyjnych Monte Carlo – został przeprowadzony w sposób świadomy i przemyślany. Autor nie tylko wykazał się doskonałą znajomością narzędzi matematycznych i statystycznych, lecz również potrafił zaadaptować je do skomplikowanych warunków wojskowej eksploatacji sprzętu. Zastosowane podejście wielopoziomowe (modele 3-, 4- i 9-stanowe, modele  $k$  z  $n$ , różne metody estymacji i weryfikacji) świadczy o dojrzałości metodologicznej doktoranta i jego dużych kompetencjach w dziedzinie inżynierii mechanicznej.

Do najważniejszych osiągnięć autora rozprawy należy zaliczyć:

- Rozwinięcie metod probabilistycznych i symulacyjnych do modelowania niezawodności pojazdów jako systemów technicznych – z uwzględnieniem zarówno przebiegu, jak i czasu eksploatacji. W szczególności należy wyróżnić zastosowanie dwuwymiarowych kopuł Clayтона, które umożliwiły dokładne odwzorowanie funkcji niezawodności podsystemów oraz identyfikację tzw. „słabych ogniw”.
- Zbudowanie modeli semi-Markowa o różnej liczbie stanów do analizy gotowości, co pozwoliło uzyskać precyzyjne wartości wskaźników niezawodności i ocenić wpływ czynników eksploatacyjnych na niezawodność techniczną pojazdów.
- Opracowanie i walidacja modelu transportowego o strukturze „ $k$  z  $n$  z” wykorzystaniem zarówno podejścia analitycznego, jak i symulacyjnego. Szczególną wartością dodaną jest włączenie dynamicznego strumienia zadań, co odzwierciedla realia wojskowe.
- Zaprojektowanie metodyki optymalizacji poziomu redundancji oraz oszacowanie wpływu liczby pojazdów na gotowość i efektywność, przy jednoczesnej analizie kosztów. Umożliwia to racjonalizację decyzji zakupowych i remontowych w wojskowej logistyce technicznej.

### **Zastrzeżenia i uwagi:**

- Struktura rozprawy jest poprawna, jednak wstęp i zakończenie mogłyby być bardziej wyraziste i syntetyczne. Zwłaszcza cel główny i cele szczegółowe pojawiają się dopiero w toku analizy, a nie są jednoznacznie zaznaczone na początku.
- Duża szczegółowość niektórych fragmentów analitycznych – w szczególności wyprowadzeń wzorów oraz prezentacji funkcji niezawodności – może stanowić trudność dla czytelnika spoza wąskiej specjalizacji. Warto byłoby rozważyć wprowadzenie dodatkowych tabel syntetyzujących wyniki.
- Brakuje szerszej dyskusji wyników w kontekście literatury międzynarodowej. Autor rzadko odnosi się do porównań z innymi modelami występującymi w literaturze, co osłabia naukową konfrontację uzyskanych wyników.
- Mimo doskonałego opracowania matematycznego, elementy wizualne (np. wykresy, schematy modeli) mogłyby być bardziej zróżnicowane i czytelne – zwłaszcza w rozdziałach dotyczących symulacji i analizy czułości.

### **Podsumowanie**

Rozprawa Pana kpt. mgr. inż. Mateusza Oszczypały jest dojrzałą, dobrze skonstruowaną pracą naukowo-badawczą, która łączy wysoki poziom merytoryczny z praktycznym potencjałem wdrożeniowym. Dobór metod badawczych, zakres przeprowadzonych analiz oraz wyciągnięte wnioski potwierdzają znajomość przedmiotu, umiejętności analityczne i inżynierskie doktoranta oraz jego oryginalny wkład w rozwój dyscypliny inżynierii mechanicznej.

Rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z art. 187 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, a także z § 11 rozporządzenia w sprawie studiów doktoranckich i stopni naukowych. Rekomenduję dopuszczenie jej do dalszego etapu przewodu doktorskiego.

### **4. Uwagi szczegółowe**

Analiza treści rozprawy rodzi szereg pytań szczegółowych, które wymagają doprecyzowania. Proszę o ich omówienie podczas publicznej obrony:

1. W jaki sposób dobrano typy rozkładów granicznych (Weibulla, wykładniczy, gamma) dla poszczególnych podsystemów pojazdu? Czy rozważano zastosowanie bardziej złożonych lub nieliniowych rozkładów dla lepszego dopasowania do danych empirycznych?

2. Czy zastosowanie kopul Clayтона dla wszystkich podsystemów wynikało z najlepszego dopasowania empirycznego, czy także z innych przesłanek (np. interpretacyjnych, praktycznych)? Czy testowano inne rodziny kopul, np. Gaussian czy t-Studenta?
3. W modelu niezawodności przyjęto strukturę szeregową systemu. Czy nie rozważano innych topologii (np. mieszanego układu szeregowo-równoległego), które mogłyby bardziej realistycznie oddać rzeczywistą funkcjonalność pojazdu?
4. Czy wartości parametrów intensywności uszkodzeń i napraw ( $\lambda$ ,  $\mu$ ) były estymowane na podstawie wszystkich danych historycznych, czy ograniczono się do określonych zakresów czasowych lub operacyjnych? Jak wpływało to na stabilność modelu?
5. W analizie gotowości systemu przyjęto stałą intensywność uszkodzeń. Czy rozważano wpływ sezonowości, różnic w warunkach eksploatacji lub zużycia technicznego na zmienność tych parametrów w czasie?
6. Na jakiej podstawie określono funkcję zapotrzebowania na transport w danym dniu eksploatacji? Czy histogram (rys. 6.1) oparty był na pełnym spektrum misji i zadań, czy tylko na danych wybranych jednostek?
7. W jaki sposób przeprowadzono walidację modeli semi-Markowa i kopul? Czy sprawdzano trafność prognoz niezawodnościowych na danych niezależnych lub dla innych typów pojazdów?

#### **Dodatkowe spostrzeżenia i rekomendacje redakcyjne:**

Pomimo wysokiej wartości merytorycznej rozprawy, analiza tekstu wykazała kilka aspektów, które mogłyby zostać dopracowane w kolejnych wersjach lub publikacjach opartych na tej pracy:

- W wielu miejscach pojawiają się skomplikowane wzory i zależności matematyczne bez wystarczającego komentarza interpretacyjnego, co może utrudniać zrozumienie ich znaczenia czytelnikowi spoza wąskiej specjalizacji. Dotyczy to m.in. wzorów w rozdziałach 5.1 i 5.3.
- Niektóre dane wejściowe do symulacji Monte Carlo (np. wartości parametrów rozkładu logistycznego dla strumienia zadań) nie zostały dostatecznie

uzasadnione – brakuje odniesień do źródeł lub statystycznej charakterystyki rozrzutu danych.

- W rozdziale dotyczącym miar ważności niezawodnościowej (BIM, CIM, BPIM) nie podano intuicyjnych interpretacji wyników – czytelnik musi sam wyciągnąć wnioski na podstawie wykresów. Warto byłoby uzupełnić je komentarzem liczbowym lub porównaniem rankingowym podsystemów.
- Schematy i wykresy (np. Rys. 5.2, 6.5, 6.8) są liczne i merytoryczne, ale często wymagają bardziej jednoznacznych opisów osi oraz legendy, szczególnie w przypadku danych syntetycznych lub przekształconych (np. map cieplnych).
- W rozdziale 6 przy prezentacji wyników analizy wrażliwości, brakuje tabelarycznego podsumowania skrajnych przypadków – np. jakie konkretnie wartości intensywności powodowały istotne zmiany w gotowości systemu.
- Choć wnioski w rozdziale 7 są trafne i klarowne, można by je bardziej pogłębić, dodając odniesienia do zagranicznych badań nad flotami wojskowymi lub systemami logistycznymi w NATO, co zwiększyłoby międzynarodową perspektywę pracy.
- Ostatni rozdział w bardzo zwięzły sposób porusza możliwość implementacji modeli w PWE ZWSI RON, jednak brakuje planu lub propozycji etapów wdrożenia (np. prototyp, walidacja, adaptacja w środowisku informatycznym).

Podsumowując, wskazane uwagi nie obniżają merytorycznej wartości rozprawy, a jedynie sugerują możliwe jej dopracowanie na etapie obrony lub w przyszłych publikacjach. Dysertacja stanowi **dojrzałe i nowatorskie opracowanie o dużym znaczeniu praktycznym i potencjale wdrożeniowym**, a także istotny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej w zastosowaniach wojskowych.

## 5. Wniosek końcowy oceny rozprawy

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa, mimo przedstawionych wcześniej uwag redakcyjnych i pytań szczegółowych, które nie podważają zasadniczego dorobku Autora, została wykonana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym. Wyznaczone przez kpt. mgr. inż. Mateusza OSZCZYPAŁĘ cele badawcze zostały w pełni zrealizowane, a postawiona teza potwierdzona w oparciu o rzetelnie zgromadzone dane empiryczne oraz adekwatnie dobrane metody analizy probabilistycznej i symulacyjnej.

Dokonując oceny całości rozprawy, wyrażam opinię, iż stanowi ona oryginalne i wartościowe rozwiązanie problemu naukowego w zakresie modelowania niezawodności i gotowości wojskowych systemów transportowych, wykazując zdolność do krytycznego i analitycznego spojrzenia na złożone zagadnienia techniczno-eksploatacyjne. Autor wykazał się samodzielnością w prowadzeniu badań, dużą znajomością przedmiotu, jak również biegłością w wykorzystaniu zaawansowanych narzędzi matematycznych i obliczeniowych.

Rozprawa mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a jej wyniki mają nie tylko wymiar teoretyczny, ale i praktyczny – możliwy do zastosowania w systemach logistycznych Sił Zbrojnych RP, co dodatkowo podnosi jej znaczenie aplikacyjne.

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa kpt. mgr. inż. Mateusza OSZCZYPAŁY pt. *„Modelowanie niezawodności i gotowości pojazdów ciężarowo-osobowych funkcjonujących w wojskowych systemach transportowych”* spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) oraz kryteria stawiane rozprawom doktorskim w zakresie oryginalności, poprawności metodologicznej i wartości naukowej.

**Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej przedstawionej do recenzji i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Dodatkowo wnioskuję o nadanie wyróżnienia rozprawy doktorskiej.**



/Paweł Gołda/