

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Semi-markowskie podejście do modelowania niezawodności pojazdów ciężarowo-osobowych

Mateusz Oszczypała, Jarosław Ziółkowski, Jerzy Małachowski

Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wojskowa Akademia Techniczna  
email: mateusz.oszczypala@wat.edu.pl, jaroslaw.ziolkowski@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W artykule przedstawiono problematykę modelowania niezawodności pojazdów ciężarowo-osobowych funkcjonujących w wojskowych systemach transportowych. Efektywności działania systemu transportowego wymaga utrzymywania środków transportowych na odpowiednim poziomie gotowości technicznej. Każda awaria pojazdu skutkuje znaczącym obniżeniem zdolności przewozowych, co może prowadzić do braku możliwości realizacji zaplanowanych zadań. Zarządzanie procesem eksploatacji pojazdów wymaga posiadania zaawansowanych metod i narzędzi matematycznych. Jedną z podstawowych charakterystyk eksploatacyjnym jest wskaźnik gotowości technicznej. Do wyznaczenia jego wartości opracowano model stochastyczny bazujący na teorii procesów semi-Markowa. Zidentyfikowano przestrzeń fazową procesu liczącą trzy główne stany eksploatacyjne: użytkowanie, obsługiwane okresowe oraz naprawę. Dane empiryczne z 3 lat eksploatacji posłużyły do estymacji charakterystyk czasowych. Na podstawie transformat Laplace'a wyznaczono prawdopodobieństwa chwilowe przebywania pojazdu w stanach eksploatacyjnych. Natomiast prawdopodobieństwa ergodyczne posłużyły do wyznaczenia wartości wskaźnika gotowości.

**SŁOWA KLUCZOWE:** proces semi-Markowa, niezawodność, eksploatacja

#### 1. Wprowadzenie

Celem wojskowych systemów transportowych jest zapewnienie zdolności przewozowych odpowiadającym istniejącym potrzebom. Determinantem poziomu potrzeb transportowych są działania bojowe, plany szkolenia oraz bieżąca działalność jednostek wojskowych. Flota niezawodnych pojazdów jest jednym z głównych czynników determinujących wysoką jakość i terminowość realizacji procesów w nowoczesnych systemach transportowych. Warunkiem efektywnego działania systemu jest utrzymywanie środków transportowych w stanie sprawności technicznej i gotowości do realizacji zadań [1]. Spełnienie tego warunku jest możliwe poprzez organizację systemów eksploatacji, posiadających odpowiednie zasoby techniczne do realizacji procesów diagnozowania, obsługiwania i naprawy pojazdów. Wraz ze wzrostem intensywności użytkowania środków transportowych, znacząco rośnie zapotrzebowanie na paliwo i inne materiały eksploatacyjne, szczególnie w przypadku pojazdów wojskowych przemieszczających się poza obszarem dróg publicznych.

Wojskowe systemy eksploatacji w znacznym stopniu są oparte na planowo- zapobiegawczej strategii obsługiwania, której celem jest maksymalizacja gotowości technicznej obiektów [2-4]. Założeniem tej strategii jest realizacja obsługiwania o określonej pracochłonności, zgodnie z wymaganym zakresem. Wytyczne dotyczące czynności obsługowych, interwałów czasowych oraz wielkości rezerwu pomiędzy obsługami określone są na podstawie specyfikacji technicznej producenta, a także wiedzy i doświadczenia specjalistów zajmujących się planowaniem

i normowaniem eksploatacji na poszczególnych szczeblach zarządzania. Do zasadniczych wad tej strategii zalicza się kosztochłonność oraz małą elastyczność.

#### 2. Metodologia

Rzeczywiste procesy eksploatacji stanowią kompozycję podprocesów deterministycznych oraz losowych. Składowe losowe są z reguły interpretowane jako procesy stochastyczne  $X(t)$  odzwierciedlające zmiany stanów eksploatacyjnych badanego obiektu w czasie dyskretnym lub ciągłym. W procesach eksploatacji w losowej chwili  $t$  obiekt znajduje się bowiem tylko w jednym ze stanów zidentyfikowanych w przestrzeni fazowej  $S = X(t)$ . Założenie to wymaga precyzyjnego określenia wszystkich możliwych stanów eksploatacyjnych, w których pojazdy mogą znajdować się podczas realizacji procesu eksploatacji. Istotnymi w aspekcie aplikacyjności są procesy stochastyczne spełniające własność Markowa. Zgodnie z teorią Markowa warunkowe prawdopodobieństwa osiągnięcia przyszłych stanów  $X(t_{n+1})$  wynikają wyłącznie ze stanu bieżącego  $X(t_n)$  [5].

Podstawową charakterystyką procesu semi-Markowa jest macierz jądra odnowy  $Q(t)$ , której elementy stanowią iloczyn prawdopodobieństwa  $p_{ij}$  przejścia pomiędzy stanami  $S_i$  i  $S_j$  oraz dystrybuanty warunkowego rozkładu czasu trwania stanu  $S_i$  przed przejściem do  $S_j$ , zgodnie z zależnością (1) [6, 7]:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}(t) & \cdots & Q_{1(k-1)}(t) & Q_{1k}(t) \\ Q_{21}(t) & 0 & \cdots & Q_{2(k-1)}(t) & Q_{2k}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Q_{(k-1)1}(t) & Q_{(k-1)2}(t) & \cdots & 0 & Q_{(k-1)k}(t) \\ Q_{k1}(t) & Q_{k2}(t) & \cdots & Q_{k(k-1)}(t) & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

przy czym (2):

$$Q_{ij}(t) = p_{ij} \cdot F_{ij}(t) \quad (2)$$

gdzie  $p_{ij}$  oznacza prawdopodobieństwo przejścia ze stanu  $S_i$  do stanu  $S_j$ , a  $F_{ij}(t)$  to dystrybuanta czasu przebywania w stanie  $S_i$  przed przejściem do stanu  $S_j$ .

Dla procesu semi-Markowa w czasie ciągłym formułuje się włożony łańcuch Markowa, który przedstawia zmiany stanu procesu bez uwzględnienia czasów przebywania w poszczególnym stanach.

Włożony łańcuch Markowa zakłada możliwość przejścia ze stanu  $S_i$  do stanu  $S_j$  przy założeniu, że  $i \neq j$ . Macierz prawdopodobieństw przejść międzystanowych dla takiego łańcucha może posiadać niezerowe elementy tylko poza główną przekątną, co można zapisać za pomocą wzoru (3):

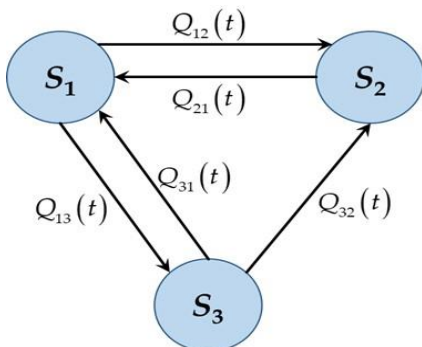
$$P = \begin{bmatrix} 0 & p_{12} & \cdots & p_{1(k-1)} & p_{1k} \\ p_{21} & 0 & \cdots & p_{2(k-1)} & p_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_{(k-1)1} & p_{(k-1)2} & \cdots & 0 & p_{(k-1)k} \\ p_{k1} & p_{k2} & \cdots & p_{k(k-1)} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

pod warunkiem spełnienia następującej zależności (4):

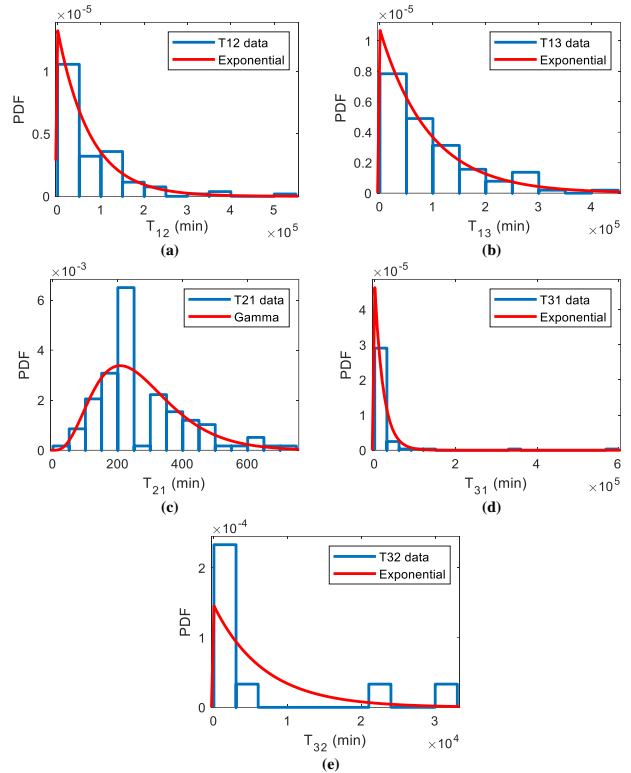
$$\sum_{j=1}^k p_{ij} = 1 \quad (4)$$

### 3. Wyniki

Studium przypadku prowadzonych badań stanowi próba pojazdów ciężarowo-osobowych (light utility vehicles) marki Honker, stanowiąca flotę pojazdów systemu transportowego jednostki wojskowej. Analizowane obiekty techniczne realizują zadania związane z transportem ludzi i niewielkich ładunków o masie do 1000 kg. Na podstawie danych empirycznych opracowano 3-stanowy model eksploatacji przedstawiony na rys. 1, dla którego estymację parametrów przedstawia rys. 2.



Rys. 1. Skierowany graf przejść międzystanowych



Rys. 2. Estymacja dystrybuant charakterystyk czasowych.

### 4. Podsumowanie

Zaproponowana metoda pozwala na szczegółową analizę eksploatacji pojazdów jako procesu stochastycznego ze skończoną liczbą stanów.

- 1) Na podstawie prawdopodobieństw chwilowych wyznacza się przebieg funkcji niezawodności.
- 2) Prawdopodobieństwa ergodyczne umożliwiają określenie gotowości technicznej pojazdów.

### Literatura

- [1] Oszczypała M, Ziółkowski J, Małachowski J. Reliability Analysis of Military Vehicles Based on Censored Failures Data. *Applied Sciences* 2022;12:1-25. <https://doi.org/10.3390/app12052622>.
- [2] Wang L, Yang Q, Tian Y. Reliability Analysis of 6-Component Star Markov Repairable System with Spatial Dependence. *Mathematical Problems in Engineering* 2017;2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9728019>.
- [3] Galiev IF, Sabitov AE, Galiev IF. Analysis of the Reliability and Efficiency of Local Power Supply Systems at Major International Events. *Lecture Notes in Civil Engineering* 2022;190:269-78. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86047-9\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86047-9_28).
- [4] Ziółkowski J, Małachowski J, Oszczypała M, Szkutnik-Rogoż J, Lęgas A. Modelling of the Military Helicopter Operation Process in Terms of Readiness. *Defence Science Journal* 2021;71:602-11. <https://doi.org/10.14429/dsj.71.16422>.
- [5] Wang Y, Xie B, E S. Adaptive relevance vector machine combined with Markov-chain-based importance sampling for reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 2022;220:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108287>.
- [6] Migawa K. Availability control for means of transport in decisive semi-markov models of exploitation process. *Archives of Transport* 2012;24:497-508. <https://doi.org/10.2478/v10174-012-0030-4>.
- [7] Ivanchenko O, Kharchenko V, Moroz B, Kabak L, Smoktii K. Semi-Markov availability model considering deliberate malicious impacts on an Infrastructure-as-a-Service Cloud. 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2018, p. 570-3. <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336266>.