

Kamil PRZYBYSZ

Polish Air Force University (Lotnicza Akademia Wojskowa)

AN ANALYSIS AND TESTING OF FUNCTIONAL AVAILABILITY MILITARY VEHICLES, IN THE ASPECT OF RELIABILITY

Badania gotowości funkcjonalnej pojazdów wojskowych w aspekcie niezawodności

Abstract: *The paper pertains to matters related to the quantification of functional availability of military vehicles, with reference to exploitation intensity and reliability aspects. The conducted exploitation research paved the way for elaborating methods of determining functional availability for military vehicles, in particular focusing on exploitation intensity and reliability. The essential research was conducted using the developed mathematical model based on the probabilistic, stochastic Markov process, which allowed modelling the process of changes in the exploitation states of military vehicles. In the course of the research, which enabled the authors to estimate the functional availability value, four-layered probes of the military vehicles were used (different types and makes), from the second exploitation phase, with varied mileage from the beginning of the exploitation and average mileage per year.*

Keywords: military vehicle, availability, reliability

Streszczenie: *Praca dotyczy zagadnień związanych z kwantyfikacją gotowości funkcjonalnej pojazdów wojskowych z uwzględnieniem intensywności eksploatacji i niezawodności. Przeprowadzone badania eksploatacyjne umożliwiły opracowanie metodyki wyznaczania gotowości funkcjonalnej pojazdów wojskowych, ze szczególnym uwzględnieniem intensywności eksploatacji i niezawodności. Zasadnicze badania przeprowadzono przy wykorzystaniu opracowanego modelu matematycznego, opartego na probabilistycznym modelu stochastycznym Markowa, za pomocą którego odwzorowano proces zmian stanów eksploatacyjnych pojazdu wojskowego. Do badań, które pozwoliły oszacować wartość gotowości funkcjonalnej wykorzystano cztery próby warstwowe pojazdów wojskowych różnych typów i marek, z drugiej fazy eksploatacji, ze zróżnicowanym przebiegiem od początku eksploatacji oraz średnim przebiegiem w roku.*

Słowa kluczowe: pojazd wojskowy, gotowość techniczna, niezawodność

1. Introduction

The availability of a technical object is a fundamental feature which shapes its operational quality. This feature is of special relevance in relation to military vehicles that are increasingly used in combat operations during peacekeeping missions. Military vehicles are essential military equipment used by land forces, affecting the implementation of a primary task (combat vehicles and other equipment mounted on platforms, i.e. military vehicles). It should also be noted that in all types of armed forces there is logistics troops support, whose core element relies on military vehicles. In the framework of a complex system of logistical support, vehicles assume a number of key roles (supply of goods and services, transport, reconnaissance, overhaul, technical evacuation and medical evaluation). The diversity of functions performed by vehicles in the armed forces reminds us of the importance of their availability in the functioning of each military unit.

However, the fulfilment of actual combat tasks or technical support involving vehicles, during overseas missions, proved all vehicle users and their superiors that the improvement in tactical and technical parameters of vehicles (fire power, speed, range, survivability) is not the only way to successful task accomplishment. A vital role in the execution of assigned tasks by military vehicles is their level of functional availability. Regrettably, the modernization of military vehicles due to technological progress does not always enhance their reliability, which translates directly onto functional availability. Modern technologies are often more unreliable in contact with specific operating conditions of military vehicles with regard to older technological solutions. The implementation of tasks by vehicles, especially in conflict areas requires maintaining high reliability equipment in order to ensure the required level of troops safety. The above requirements are determined by the nature of contemporary combat operations as well as demands faced by NATO armed forces.

Taking into account the above-mentioned issues, the paper deals with the methodology of estimating functional availability of military vehicles, using a selected vehicle probe. The results of the research also allowed assessing the influence of individual parameters which characterize the process of vehicle exploitation (intensity of exploitation, reliability) upon the value of functional availability. Based on the conducted analysis of the collected research findings, the authors developed and adopted a specific mathematical model for determining the functional availability of vehicles. The above model also made it possible to carry out further simulation testing that helped to estimate the impact of parameters which characterize the process of exploitation upon the values of functional availability, without conducting further performance tests.

2. Quantification of functional availability of military vehicles using a mathematical model

Functional availability in the available literature [5÷10] is defined as a set of operational states of a technical object to enable a proper operation in relation to beginning task implementation at any time t . Functional availability is expressed by momentary probability of an event which means that the object will be in a state of functional suitability. The above definition is expressed by the following the formula, presented in this paper [2]:

$$K_g(t) = P(X(t) = 1) \quad (1)$$

where $X(t)$ denotes the stochastic process with a set of states $S = \{0,1\}$, with 1 referring to the state of functional suitability of a technical object, and 0 denoting the opposite state.

In case when the time of operation of a technical object $t \rightarrow \infty$, the value of function $K_g(t)$ may move to the boundary value called the stationary value [2]:

$$K_g = \lim[t \rightarrow \infty] K_g(t) = \frac{ET}{ET+EU} \quad (2)$$

where:

ET – expected value of random variable of time of functional suitability of a technical object,

EU – expected value of random variable of time of unsuitability of a technical object.

This value is referred to as the index of stationary availability K_g , which is characteristic for systems with nonzero renewal time [2].

The core research that made it possible to estimate the value of the index of stationary availability was conducted on four-layered probes of military vehicles, of various types and makes, in the second phase of operation, with varied mileage from the beginning of exploitation and average mileage per year ranging from 621 km to 22,530 km, classified in accordance with average intensity of operation per year, determined over a period of four years for making the observations. The attempts are composed of the following numbers of vehicles with respective average mileage per year:

- first probe: 10 military vehicles, average mileage per year of individual vehicles of the probe ranging from 621 to 1,262 km (average mileage per year for the vehicle of the 891 km probe),

- second probe: 11 military vehicles, average mileage per year of individual vehicles of the probe ranging from 1,820 to 5,498 km (average mileage per year for the vehicle of the 3,364 km probe),
- third probe: 9 military vehicles, average mileage per year of individual vehicles of the probe ranging from 6,128 to 11,870 km (average mileage per year for the vehicle of the 9,527 km probe),
- fourth probe: 16 military vehicles, average mileage per year of individual vehicles of the probe ranging from 12,718 to 22,530 km (average mileage per year for the vehicle of the 16,912 km probe).

When analyzing the possibilities of estimating the index of stationary availability for a single military vehicle, it is necessary to remember that its value shapes the state of technical suitability at a given moment, referred to as the average availability. By referring to the operation of vehicles, it is clear that this condition is linked to the status of the waiting time of a vehicle for an operation (waiting for the execution of tasks which appear randomly). The state of technical efficiency can be defined as a probability measure, as a likelihood that a vehicle is operational to undertake an action, as illustrated in dependency (1).

Taking into account the existing operating data obtained in the course of the conducted investigation and assuming the availability of a military vehicle as a criterion of distinguishing states of exploitation to undertake tasks, it was found that the examined vehicle may occur in the following operational states [3]:

1. Work- s_1 , in which a vehicle should remain in full or partial technical efficiency for the execution of performing the assigned tasks;
2. Waiting for work - s_2 , in which it should maintain full or partial technical efficiency;
3. Maintenance- s_3 , during which a vehicle changes from the waiting state or work state, or a state of repair or a downtime state during repair, due to a partial loss of technical efficiency;
4. Repair- s_4 , to which the vehicle moves as a result of a partial or full loss of technical suitability, which prevents beginning or an execution of an undertaken task;
5. Downtime during repair - s_5 , to which the vehicle may pass from a state of operation and waiting for an operation (hidden incapacity), before and after maintenance or repair.

With the assumptions that

- these operational states of a vehicle, i.e. work and waiting for work as well as states of repair, maintenance and downtime during repair (in case of a

loss of technical suitability) are mutually independent (i.e. they cannot occur simultaneously),

- all transitions from state $i \in S$ to state $j \in S$, where S denotes a set of highlighted states of vehicle exploitation, are leap in their nature (described by leap random variable displacement),
- mean times of an object remaining in the highlighted state "and" before moving on to status "j" are described by a number or a random function,
- all possible transitions between highlighted states can be described with a graph of exploitation.

It can be assumed that the proper research model in this case will be the stochastic Markov model, which is discrete-states and continuous-time [11].

Bearing in mind the limitations of registered operational data during the conducted investigations and taking into account the specific nature of military vehicles service, it was adopted that the five-state model is burdened with minor estimation errors than more complex models, which was also confirmed in this article [1]. The transition between the highlighted states constitute a reducible, uniform and ergodic Markov chain, as shown in fig. 1 and they occur with a specific transition of probability p_{ij} .

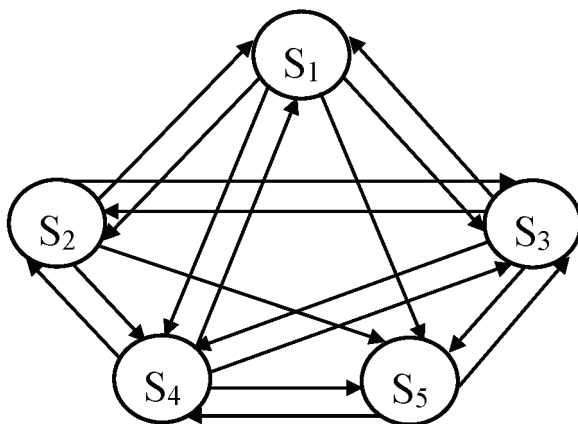


Fig. 1. Graph of vehicle operation

Using the above model of changes in vehicle operational states, it is possible to calculate the boundary probability p_j of a vehicle in operational states, as thoroughly described in study [3].

The index of stationary availability, expressed by momentary probability of an event, which means that a vehicle at any time t is ready to undertake work, which

is equivalent to the fact that at any time t it will be in a state of functional suitability, as expressed by the following formula:

$$K_g = \frac{p_1(t)+p_2(t)}{\sum_{j=1}^5 p_j(t)} \quad (3)$$

The relevant states in the presented model will be states s_1 and s_2 , therefore for the sake of computations of the stationary availability indicator, the authors take into account the probabilities of remaining in these states, i.e. $p_1(t)$ and $p_2(t)$.

The results of boundary calculations of a vehicle remaining in the highlighted operational states and the index of stationary availability, for example for the first and fourth probe of vehicles, i.e. groups of vehicles with the most varied levels of intensity of operation per year, have been depicted in tables 1 and 2.

Table 1

Results of calculations of the stationary availability index K_g for the second phase of the vehicle operation - first probe

Vehicle no	Values of boundary probabilities			K_g
	P_1	P_2	$P_3+ P_4+ P_5$	
1	0.442	0.439	0.119	0.881
2	0.487	0.487	0.027	0.973
3	0.496	0.496	0.008	0.992
4	0.473	0.472	0.055	0.945
5	0.479	0.479	0.041	0.959
6	0.496	0.496	0.008	0.992
7	0.493	0.493	0.014	0.986
8	0.496	0.496	0.008	0.992
9	0.487	0.487	0.026	0.974
10	0.496	0.496	0.009	0.991

Table 2

Results of calculations of stationary availability index K_g for the second phase of the operation vehicles - fourth probe

Vehicle no	Values of boundary probabilities			K_g
	P_1	P_2	$P_3 + P_4 + P_5$	
1.	0.458	0.456	0.086	0.914
2.	0.495	0.495	0.010	0.990
3.	0.494	0.494	0.012	0.988
4.	0.494	0.494	0.012	0.988
5.	0.492	0.492	0.015	0.985
6.	0.493	0.493	0.013	0.987
7.	0.497	0.497	0.007	0.993
8.	0.497	0.497	0.007	0.993
9.	0.495	0.495	0.010	0.990
10.	0.496	0.496	0.007	0.993
11.	0.492	0.492	0.016	0.984
12.	0.495	0.495	0.010	0.990
13.	0.495	0.495	0.010	0.990
14.	0.494	0.493	0.013	0.987
15.	0.488	0.488	0.023	0.977
16.	0.492	0.492	0.016	0.984

By analysing the mean values of the index of stationary availability K_g , see tables 1 and 2, it can be noticed that the values of the index in question are similar despite the fact that the vehicle probes, specified in the tables, represent the most extreme intensities of the examined vehicles, per year.

The examined values of the stationary availability index K_g , in the function of the number of trips made by the, are as below in fig. 2. For example, for one of the tested vehicle probes, one can see that the value of the index above increases along with the greater number of trips. It remains at a certain level and slightly changes despite increasing the intensity of exploitation, i.e. along with the increase in the number of trips.

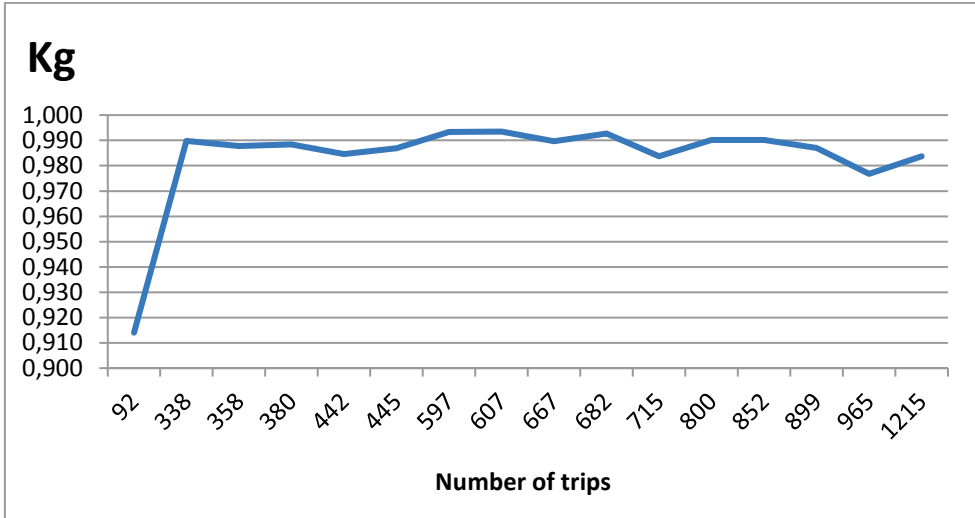


Fig. 2. Course of stationary availability index K_g - fourth probe

Similarly, when assessing the course of the numbers of all repairs in the function of trips made, for the same fourth probe of vehicles, see fig. 3 below, it can be observed that contrary to the expectations, increasing the intensity of use does not entail the growth in the number of repairs. Only a considerable increase in the number of trips to over 800, in a four-year period of research, leads to an increase in the number of repairs.

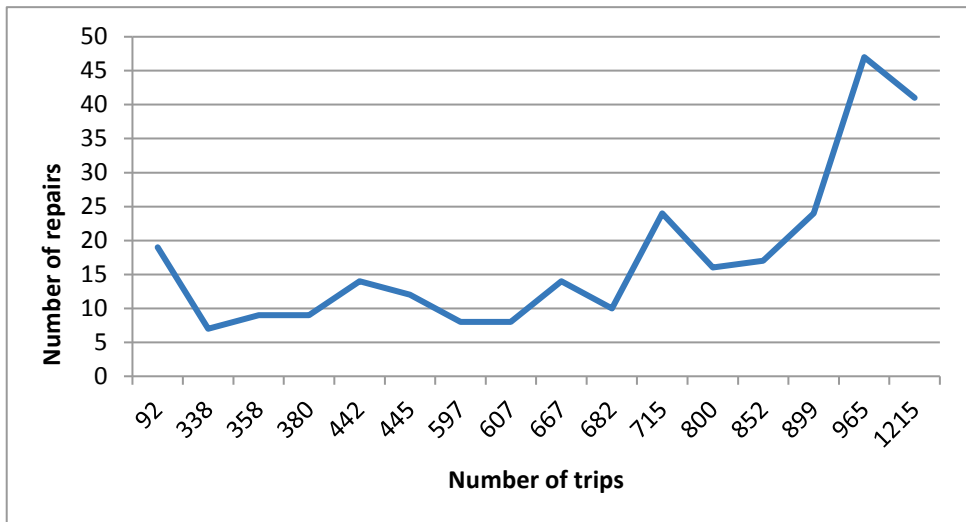


Fig. 3. Course of the number of repairs - fourth probe

3. Conclusion

The conducted research shows that it is possible to designate the functional availability of vehicles in terms of operational intensity, which can be taken into account by an appropriate selection of the examined layered probes, classified in accordance with mean intensity of use and by observation of changes in the stationary availability index along with an increase in the number of trips, reflecting the intensity of use. The stationary availability index can be determined in a number of ways, by using analytical dependencies, probability stochastic Markov models, as illustrated in this paper. Applying Markov models provides us with a great deal of additional options such as the possibility of simulation of a modification of exploitation states and making observations as well as their effects upon calculated availability indexes.

The conducted research and characteristics of functional availability, made on their basis, indicate that the intensity of using military vehicles does not significantly differentiate the level of availability and reliability. Only very low or very high intensity of operation results in a significant growth in the number of repairs, thereby reducing the value of the mileage in-between failures and a drop in the level of functional availability. However, it should be remembered that the mechanism of the emergence of damage is completely different for very low intensity of operation (predominant aging processes) and for very high intensity of use (predominant tribological processes).

In the analysis of functional availability of military vehicles, the computed values must not be referred to civil vehicles, e.g. buses owned by a civil transport company. One should bear in mind the fact that military vehicles are characterized by different qualities of exploitation, due to the fact that they have a much lower intensity of operation. The range of factors affecting a military vehicle in terms of availability is much wider than in case of a civil vehicle.

4. References

1. Borucka A.: Metoda analizy procesu eksploatacji pojazdów wojskowych w aspekcie gotowości. Phd thesis, Warszawa 2015.
2. Migawa K.: Sterowanie gotowością w systemach eksploatacji środków transportu. Habilitation dissertation, Bydgoszcz 2013.
3. Przybysz K.: Gotowość operacyjna dla pojazdów wojskowych w aspekcie niezawodności i intensywności eksploatacji. Phd thesis, Warszawa 2017.

4. Simiński P., Wardencki M., Kruk Z., Wójtowicz P., Brach J., Kowalski K., Janiszewski M.: *Rozwój środków transportu w SZRP*. BEL Studio Sp. z o.o., Warszawa 2013.
5. Woropay M., Lewandowski B., Żurek J.: *Gotowość operacyjna podsystemu wykonawczego systemu transportowego w cyklicznie zmieniających się fazach eksploatacji*. ZEM, z. 3 (139) 2004.
6. Żurek J.: *Modelowanie gotowości początkowej systemów wojskowych*. Konferencja Naukowo-Techniczna 25 lat ITWL, Warszawa 1978.
7. Żurek J.: *Metody analizy początkowej gotowości operacyjnej wojskowych systemów lotniczych*. WAT Warszawa 1981.
8. Żurek J.: *Gotowość operacyjna układu obiekt techniczny–ekipa operatorów*. Konferencja Cybernetyka w Gospodarce Morskiej, Gdańsk 1983.
9. Żurek J.: *Problemy gotowości techniki lotniczej*. Chapter 13 in: *Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej*, Volume 2, Wydawnictwo ITWL, Warszawa 1993.
10. Żurek J.: *Modelowanie symboliczne systemów bezpieczeństwa i niezawodności w transporcie lotniczym*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1998.
11. Żurek J., Mitkow Sz., Ziółkowski J.: *Metody oceny gotowości pojazdów*. XXXIV Zimowa Szkoła Niezawodności, Niekonwencjonalne metody oceny trwałości i niezawodności, 2006.

BADANIA GOTOWOŚCI FUNKCJONALNEJ POJAZDÓW WOJSKOWYCH W ASPEKCIE NIEZAWODNOŚCI

1. Wprowadzenie

Gotowość obiektu technicznego stanowi podstawową cechę kształtującą jego jakość eksploatacyjną. Cecha ta nabiera szczególnego znaczenia w odniesieniu do pojazdów wojskowych, które są coraz częściej eksploatowane w warunkach bojowych, w ramach misji stabilizacyjnych. Pojazdy wojskowe stanowią zasadniczy sprzęt wojskowy wykorzystywany w wojskach lądowych, który warunkuje wykonanie zadania głównego (wozy bojowe, inny sprzęt zamontowany na platformach, które stanowią pojazdy wojskowe). Należy także zauważyć, że we wszystkich rodzajach sił zbrojnych funkcjonuje zabezpieczenie logistyczne wojsk, którego głównym elementem są pojazdy wojskowe. W ramach złożonego systemu zabezpieczenia logistycznego pojazdy pełnią wiele kluczowych funkcji (dostarczanie towarów i usług, realizacja przewozów, rozpoznanie, remont i ewakuacja techniczna, przedsięwzięcia leczniczo-ewakuacyjne). Różnorodność pełnionych funkcji przez pojazdy w siłach zbrojnych uświadamia nam znaczenie ich gotowości w funkcjonowaniu każdej jednostki wojskowej.

Dopiero jednak realizacja rzeczywistych zadań bojowych czy zabezpieczenia technicznego z udziałem pojazdów, w trakcie misji poza granicami kraju, pokazała wszystkim użytkownikom pojazdów oraz ich przełożonym, że poprawa parametrów taktyczno-technicznych pojazdów (siły ognia, prędkości, zasięgu, odporności na środki rażenia przeciwnika) nie stanowi jedynej drogi do pomyślnej realizacji zadań. Istotną rolę w podejmowaniu przydzielonych zadań przez pojazdy wojskowe odgrywa poziom ich gotowości funkcjonalnej. Niestety modernizacja pojazdów wojskowych napędzana postępem technologicznym nie zawsze podnosi ich niezawodność, co bezpośrednio przekłada się na gotowość funkcjonalną. Nowoczesne technologie są często bardziej zawodne w zetknięciu ze specyficznymi warunkami użytkowania pojazdów wojskowych, w odniesieniu do starszych technologicznie rozwiązań. Realizacja zadań przez pojazdy zwłaszcza w rejonach konfliktów wymaga utrzymania wysokiej niezawodności sprzętu

w celu zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa żołnierzy. Powyższe wymagania są zdeterminowane przez charakter współczesnych działań bojowych oraz wymagania stawiane siłom zbrojnym przez NATO.

Biorąc pod uwagę powyższe, w niniejszej pracy opisano metodykę szacowania gotowości funkcjonalnej pojazdów wojskowych z wykorzystaniem wybranej próby pojazdów. Wyniki badań pozwoliły również na ocenę wpływu poszczególnych parametrów, które charakteryzują proces eksploatacji pojazdu (intensywność użytkowania, niezawodność), na wartość gotowości funkcjonalnej. Na podstawie dokonanej analizy zebranych wyników badań opracowano i przyjęto określony model matematyczny określania gotowości funkcjonalnej pojazdów. Powyższy model umożliwił również przeprowadzenie dodatkowych badań symulacyjnych, które umożliwiły oszacowanie wpływu wspomnianych parametrów charakteryzujących proces eksploatacji na wartość gotowości funkcjonalnej, bez przeprowadzania dodatkowych badań eksploatacyjnych.

2. Kwantyfikacja gotowości funkcjonalnej pojazdów wojskowych z wykorzystaniem modelu matematycznego

Gotowość funkcjonalna w literaturze [5÷10] definiowana jest jako zbiór stanów eksploatacyjnych obiektu technicznego, umożliwiających poprawne działanie w odniesieniu do rozpoczęcia realizacji zadania w dowolnej chwili t . Gotowość funkcjonalna jest wyrażana prawdopodobieństwem chwilowym zdarzenia polegającego na tym, że obiekt będzie się znajdować w stanie zdatności funkcjonalnej. Powyższa definicja została wyrażona następującym wzorem przedstawionym w pracy [2]:

$$K_g(t) = P(X(t) = 1) \quad (1)$$

gdzie $X(t)$ oznacza proces stochastyczny o zbiorze stanów $S = \{0, 1\}$, przy czym 1 oznacza stan zdatności funkcjonalnej obiektu technicznego, natomiast 0 stan przeciwny.

W przypadku gdy czas eksploatacji obiektu technicznego $t \rightarrow \infty$, wartość funkcji $K_g(t)$ może dążyć do wartości granicznej zwanej wartością stacjonarną [2]:

$$K_g = \lim_{t \rightarrow \infty} K_g(t) = \frac{ET}{ET + EU} \quad (2)$$

gdzie:

ET – wartość oczekiwana zmiennej losowej czasu zdatności funkcjonalnej obiektu technicznego,

EU – wartość oczekiwana zmiennej losowej czasu niezdatności obiektu technicznego.

Wielkość ta nazywana jest współczynnikiem gotowości stacjonarnej K_g charakteryzującym systemy z niezerowym czasem odnowy [2].

Zasadnicze badania, które pozwoliły oszacować wartość współczynnika gotowości stacjonarnej, przeprowadzono na czterech próbach warstwowych pojazdów wojskowych różnych typów i marek, z drugiej fazy eksploatacji, ze zróżnicowanym przebiegiem od początku eksploatacji oraz średnim przebiegiem w roku od 621 km do 22 530 km, sklasyfikowanych według średniej intensywności użytkowania w roku, ustalonej w czasie czterech lat obserwacji. Przedmiotowe próby tworzą następujące liczby pojazdów z odpowiednio średnim przebiegiem w roku:

- pierwsza próba: 10 pojazdów wojskowych, średni przebieg w roku poszczególnych pojazdów próby 621–1262 km (średni przebieg w roku dla pojazdu próby 891 km),
- druga próba: 11 pojazdów wojskowych, średni przebieg w roku poszczególnych pojazdów próby 1820–5498 km (średni przebieg w roku dla pojazdu próby 3364 km),
- trzecia próba: 9 pojazdów wojskowych, średni przebieg w roku poszczególnych pojazdów próby 6128–11870 km (średni przebieg w roku dla pojazdu próby 9527 km),
- czwarta próba: 16 pojazdów wojskowych, średni przebieg w roku poszczególnych pojazdów próby 12718–22530 km (średni przebieg w roku dla pojazdu próby 16 912 km).

Analizując możliwości oszacowania współczynnika gotowości stacjonarnej dla pojedynczego pojazdu wojskowego, należy sobie uświadomić, że jego wartość kształtuje stan zdatności technicznej na dowolną chwilę, określaną jako przeciętna dostępność/gotowość techniczna (ang. *availability*). Odnosząc się do eksploatacji pojazdów, łatwo jest zauważyć, że stan ten związany jest ze stanem wyczekiwania pojazdu na pracę (oczekiwanie na realizację zadań, które pojawiają się w losowych chwilach czasu. Stan zdatności technicznej możemy określać miarą probabilistyczną jako prawdopodobieństwo, że pojazd jest zdalny technicznie do podjęcia działania, jak przedstawiono w zależności (1).

Biorąc pod uwagę posiadane dane eksploatacyjne pozyskane w trakcie prowadzonych badań oraz przyjmując za kryterium wyróżnienia stanów eksploatacyjnych ustalenie zdolności pojazdu wojskowego do podejmowania

zadań, ustalono, że badany pojazd może występować w następujących stanach eksploatacyjnych [3]:

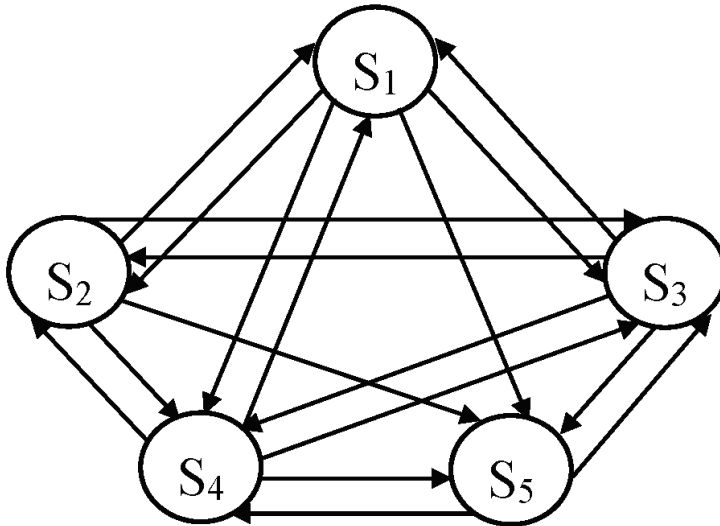
1. pracy – s_1 , w którym powinien być w stanie pełnej lub częściowej zdatności technicznej umożliwiającej wykonanie przydzielonych zadań,
2. wyczekiwania na pracę – s_2 , w którym powinien podobnie jak w stanie s_1 utrzymywać pełną lub częściową zdatność techniczną,
3. obsługi – s_3 , do którego przechodzi ze stanu wyczekiwania lub pracy, bądź ze stanu naprawy oraz postoju w naprawie, w wyniku częściowej utraty zdatności technicznej,
4. naprawy – s_4 , do którego przechodzi w wyniku utraty częściowej lub pełnej utraty zdatności technicznej, która uniemożliwia podjęcie lub wykonanie podjętego zadania,
5. postoju w naprawie – s_5 , do którego może przechodzić zarówno ze stanu pracy, jak i wyczekiwania na pracę (niezdadność utajniona) oraz przed i po obsłudze lub naprawie.

Przy założeniach, że:

- wymienione stany eksploatacyjne pojazdu, tj. pracy i wyczekiwania na pracę, oraz stany: naprawy, obsługi i postoju w naprawie (w przypadku utraty zdatności technicznej) są wzajemnie niezależne (tzn. nie mogą zachodzić równocześnie),
- wszystkie przejścia ze stanu $i \in S$ do stanu $j \in S$, gdzie S oznacza zbiór wyróżnionych stanów eksploatacyjnych pojazdów, mają charakter skokowy (opisywane zmienną losową skokową),
- średnie czasy przebywania obiektu w wyróżnionym stanie i przed przejściem do stanu j są opisane liczbą lub funkcją losową,
- wszystkie możliwe przejścia między wyróżnionymi stanami można opisać za pomocą grafu eksploatacyjnego,

można przyjąć, że właściwym modelem badawczym w tym przypadku będzie model stochastyczny procesu Markowa, dyskretny w stanach i ciągły w czasie [11].

Mając na uwadze ograniczenia wynikające z rejestrowanych danych eksploatacyjnych w czasie prowadzonych badań oraz uwzględniając specyfikę eksploatacji pojazdów wojskowych, przyjęto, że model 5-stanowy obciążony jest mniejszymi błędami estymacji niż modele bardziej rozbudowane, co potwierdzono także w pracy [1]. Przejścia pomiędzy wyróżnionymi stanami stanowią przywiedlny, jednorodny i ergodyczny łańcuch Markowa, jak przedstawiono na rys. 1 i występują z określonym prawdopodobieństwem przejścia p_{ij} .



Rys. 1. Graf eksploatacji pojazdu

Wykorzystując przedstawiony powyżej model zmian stanów eksploatacyjnych pojazdu, można obliczyć prawdopodobieństwa graniczne p_j przebywania pojazdu w wyróżnionych stanach eksploatacyjnych, co szeroko opisano w pracy [3].

Wskaźnik gotowości stacjonarnej wyrażony prawdopodobieństwem chwilowym zdarzenia polegającego na tym, że pojazd w dowolnej chwili t jest gotowy do podjęcia zadania, co jest równoznaczne z tym, że w dowolnej chwili t będzie znajdował się w stanie zdadności funkcjonalnej, można wyrazić następującym wzorem:

$$K_g = \frac{p_1(t)+p_2(t)}{\sum_{j=1}^5 p_j(t)} \quad (3)$$

Istotnymi stanami w prezentowanym modelu będą stany s_1 oraz s_2 , dlatego też do obliczeń wskaźnika gotowości stacjonarnej uwzględniamy prawdopodobieństwa przebywania właśnie w tych stanach, czyli $p_1(t)$ oraz $p_2(t)$.

Wyniki obliczeń prawdopodobieństw granicznych przebywania pojazdu w wyróżnionych stanach eksploatacyjnych oraz wskaźnika gotowości stacjonarnej, na przykład dla pierwszej i czwartej próby pojazdów, czyli grup pojazdów o najbardziej zróżnicowanym poziomie intensywności użytkowania w roku, przedstawiono odpowiednio w tabelach 1 i 2.

Tabela 1

Wyniki obliczeń wskaźnika gotowości stacjonarnej K_g dla pojazdów z drugiej fazy eksploatacji – pierwsza próba

Nr pojazdu	Wartości prawdopodobieństw granicznych			K_g
	P_1	P_2	$P_3+ P_4+ P_5$	
1	0,442	0,439	0,119	0,881
2	0,487	0,487	0,027	0,973
3	0,496	0,496	0,008	0,992
4	0,473	0,472	0,055	0,945
5	0,479	0,479	0,041	0,959
6	0,496	0,496	0,008	0,992
7	0,493	0,493	0,014	0,986
8	0,496	0,496	0,008	0,992
9	0,487	0,487	0,026	0,974
10	0,496	0,496	0,009	0,991

Tabela 2

Wyniki obliczeń wskaźnika gotowości stacjonarnej K_g dla pojazdów z drugiej fazy eksploatacji – czwarta próba

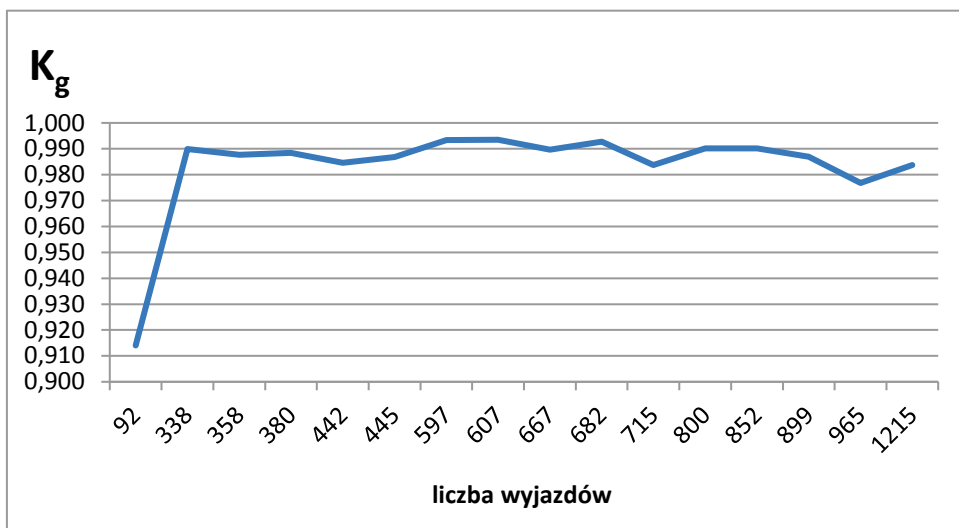
Nr pojazdu	Wartości prawdopodobieństw granicznych			K_g
	P_1	P_2	$P_3+ P_4+ P_5$	
1	0,458	0,456	0,086	0,914
2	0,495	0,495	0,010	0,990
3	0,494	0,494	0,012	0,988
4	0,494	0,494	0,012	0,988
5	0,492	0,492	0,015	0,985
6	0,493	0,493	0,013	0,987
7	0,497	0,497	0,007	0,993
8	0,497	0,497	0,007	0,993
9	0,495	0,495	0,010	0,990
10	0,496	0,496	0,007	0,993
11	0,492	0,492	0,016	0,984
12	0,495	0,495	0,010	0,990

cd tabeli 2

13	0,495	0,495	0,010	0,990
14	0,494	0,493	0,013	0,987
15	0,488	0,488	0,023	0,977
16	0,492	0,492	0,016	0,984

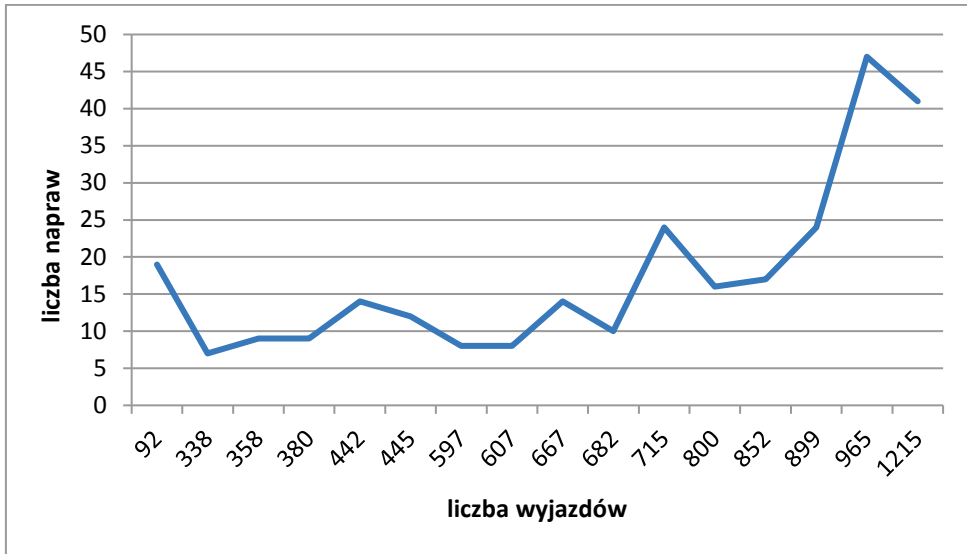
Analizując średnie wartości wskaźnika gotowości stacjonarnej K_g przedstawione w tabelach 1 i 2, można zauważyć, że są zbliżone, pomimo że wyszczególnione w prezentowanych tabelach próby pojazdów reprezentują najbardziej skrajne intensywności użytkowania w roku z badanych pojazdów.

Natomiast wartości wskaźnika gotowości stacjonarnej K_g w funkcji liczby wyjazdów badanych pojazdów, przykładowo przedstawione na rys. 2, wzrastają ze zwiększaniem się liczby wyjazdów, po czym ustalają się na określonym poziomie i nieznacznie zmieniają pomimo zwiększania intensywności użytkowania, czyli ze wzrostem liczby wyjazdów.



Rys. 2. Przebieg wskaźnika gotowości stacjonarnej K_g – czwarta próba

Podobnie oceniając przebieg liczebności wszystkich napraw w funkcji liczby wyjazdów dla tej samej, czwartej próby pojazdów, co przedstawiono poniżej na rys. 3, można zauważyć, że wbrew oczekiwaniom zwiększanie intensywności użytkowania nie pociąga ze sobą wzrostu liczby napraw. Dopiero znaczne zwiększenie liczby wyjazdów do ponad 800, w czteroletnim okresie badawczym, powoduje zwiększenie liczby napraw.



Rys. 3. Przebieg liczby napraw – czwarta próba

3. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazują, że można wyznaczyć gotowość funkcjonalną pojazdów w aspekcie intensywności użytkowania, którą można uwzględniać poprzez odpowiedni dobór badanych prób warstwowych, sklasyfikowanych według średniej intensywności użytkowania oraz poprzez obserwację zmian wskaźnika gotowości stacjonarnej ze zwiększaniem liczby wyjazdów, które odwzorowują intensywność użytkowania. Przedmiotowy wskaźnik gotowości stacjonarnej możemy wyznaczać różnymi sposobami, stosując zależności analityczne bądź wykorzystując probabilistyczne modele stochastyczne Markowa, jak w niniejszej pracy. Zastosowanie modeli markowskich dostarcza wielu dodatkowych opcji, jak np. możliwość symulacji zmian stanów eksploatacyjnych pojazdu i prowadzenia obserwacji ich wpływu na obliczane wskaźniki gotowości.

Zrealizowane badania i sporządzone na ich podstawie charakterystyki gotowości funkcjonalnej pokazują, że intensywność użytkowania pojazdów wojskowych nie różnicuje znacząco poziomu gotowości i niezawodności. Tylko bardzo niska lub bardzo wysoka intensywność użytkowania powoduje znaczny wzrost liczby napraw, co powoduje zmniejszenie wartości przebiegu między uszkodzeniami i spadek poziomu gotowości funkcjonalnej. Należy jednak sobie uświadomić, że mechanizm powstawania tych uszkodzeń jest zupełnie odmienny

dla bardzo niskiej intensywności użytkowania (przewaga procesów starzenia) oraz dla bardzo wysokiej intensywności użytkowania (przewaga procesów tribologicznych).

Analizując gotowość funkcjonalną pojazdów wojskowych, nie można odnosić obliczanych wartości do pojazdów cywilnych, np. autobusów cywilnej firmy transportowej. Należy pamiętać o tym, że pojazdy wojskowe mają inną charakterystykę eksploatacji, a szczególnie dużo niższą średnią intensywność użytkowania. Wachlarz czynników oddziałujących na pojazd wojskowy w aspekcie gotowości jest dużo szerszy niż dla pojazdu cywilnego.

4. Literatura

1. Borucka A.: Metoda analizy procesu eksploatacji pojazdów wojskowych w aspekcie gotowości. Rozprawa doktorska, Warszawa 2015.
2. Migawa K.: Sterowanie gotowością w systemach eksploatacji środków transportu. Rozprawa habilitacyjna, Bydgoszcz 2013.
3. Przybysz K.: Gotowość operacyjna dla pojazdów wojskowych w aspekcie niezawodności i intensywności eksploatacji. Rozprawa doktorska, Warszawa 2017.
4. Simiński P., Wardencki M., Kruk Z., Wójtowicz P., Brach J., Kowalski K., Janiszewski M.: Rozwój środków transportu w SZRP. BEL Studio Sp. z o.o., Warszawa 2013.
5. Woropay M., Lewandowski B., Żurek J.: Gotowość operacyjna podsystemu wykonawczego systemu transportowego w cyklicznie zmieniających się fazach eksploatacji. ZEM, z. 3 (139) 2004.
6. Żurek J.: Modelowanie gotowości początkowej systemów wojskowych. Konferencja Naukowo-Techniczna 25 lat ITWL, Warszawa 1978.
7. Żurek J.: Metody analizy początkowej gotowości operacyjnej wojskowych systemów lotniczych. WAT, Warszawa 1981.
8. Żurek J.: Gotowość operacyjna układu obiekt techniczny – ekipa operatorów. Konferencja Cybernetyka w Gospodarce Morskiej, Gdańsk 1983.
9. Żurek J.: Problemy gotowości techniki lotniczej. Rozdział 13 w: Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej, tom 2, Wydawnictwo ITWL, Warszawa 1993.
10. Żurek J.: Modelowanie symboliczne systemów bezpieczeństwa i niezawodności w transporcie lotniczym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1998.
11. Żurek J., Mitkow Sz., Ziółkowski J.: Metody oceny gotowości pojazdów. XXXIV Zimowa Szkoła Niezawodności, Niekonwencjonalne metody oceny trwałości i niezawodności, 2006.

