

Kamil PRZYBYSZ, Sławomir DYGNOTOWSKI, Norbert GRZESIK
 Polish Air Force University (Lotnicza Akademia Wojskowa)

AN ANALYSIS OF RELIABILITY OF MILITARY VEHICLES

Analiza niezawodności pojazdów wojskowych

Abstract: *The paper describes issues related to reliability of military vehicles based on recorded operational events. Seeking the quantification of reliability for exploiting vehicles in military units, an extensive analysis of factors shaping the reliability level was made, taking into consideration all phases of military vehicles existence and a peculiar character of the exploitation process of military vehicles. The importance of reliability research in the decision process optimization was emphasized, controlling the efficiency and availability of the exploitation system.*

Keywords: military vehicle, availability, reliability

Streszczenie: *Praca dotyczy zagadnień związanych z wyznaczaniem niezawodności pojazdów wojskowych na podstawie rejestrowanych zdarzeń eksploatacyjnych. Dążąc do oszacowania niezawodności pojazdów eksploatowanych w jednostkach wojskowych, przeprowadzono szczegółową analizę czynników kształtujących poziom niezawodności tych pojazdów, uwzględniając wszystkie fazy istnienia pojazdów mechanicznych oraz specyfikę procesu eksploatacji pojazdów wojskowych. Podkreślono także znaczenie badań niezawodnościowych w optymalizacji procesów decyzyjnych, które sterują efektywnością i gotowością systemu eksploatacji.*

Słowa kluczowe: pojazd wojskowy, gotowość techniczna, niezawodność

1. Introduction

The implementation of combat tasks in the areas of armed conflicts with components detached from the Polish Armed Forces demonstrated the suitability of the task suitability of arms and military equipment, particularly in relation to military vehicles. The core equipment of Land Forces is combat vehicles or other equipment mounted on platforms, i.e. military vehicles. It needs to be noted that military vehicles are an essential element of the system of logistical support which accompanies any troop actions. The implementation of combat tasks requires maintaining high reliability of military equipment, not only in terms of achieving set military purposes but also in terms of ensuring an adequate level of soldiers' safety.

Despite the fact that it is vitally important to be acquainted with shaping operational availability and effective exploitation of military vehicles, research in this area is fairly limited. The main reason for this phenomenon is the lack of data on the damage rate of vehicles exploited in military units. Unfortunately, the guidelines for conducting operational documentation do not take into account the reliability analyses, which plays a tremendous role in numerous aspects. The currently implemented IT system, Integrated Multilevel Information Technology System of the Ministry of National Defence (the so-called ZWSI RON), which is to support the operation process of military vehicles, does not facilitate an analysis of vehicle reliability and availability, stored in the system's database.

The reliability tests are particularly important with regard to military vehicles, which are often used in various external conditions, in a variety of terrain and weather conditions.

2. Analysis of factors affecting reliability

The identification of factors affecting the reliability boils down to finding the causes of the damage of the vehicles.

As it has already been noticed, searching for the underlying causes of damage to military vehicles should not be limited only to the exploitation phase, which is the last stage of the existence of a vehicle. Paper [12] lists particular phases of the life of a motor vehicle, i.e.:

- needs,
- design and construction,
- manufacture,
- operation.

In the light of the above article, it appears that errors committed in each phase of the object's existence is a source of potential future damage to vehicles.

The first errors are committed already in the first phase of defining needs. The main source of these errors is improperly developed tactical and technical assumptions. The requirements set out in the above assumptions to meet for each vehicle systems and the whole vehicle and the system of its exploitation are not always adequate to real operating conditions, in which a vehicle is to be used.

A common phenomenon is also a problem concerning quantification of specific needs. The requirements, which cannot be quantified, are disregarded in the documentation. The most important reliability requirements for military vehicles that largely shape the operational availability level of vehicles are treated in the subject documentation in a too general manner. They are described with an insufficient number of reliability indicators, both operational-tactical and technical ones, listed in defence standards, and thus do not fully specify the requirements for operational efficiency, reliability and basic properties (non-damage, repairability, durability and survivability).

As for the second phase of military vehicles existence, related to the design-construction process, article [12] provides fundamental design-construction errors, which also contribute to an increased number of vehicle failures during its operation i.e.:

- concept of an object,
- investigating models and prototypes
- selection of materials,
- selection of manufacture technology,
- thermal treatment,
- fitting,
- surface roughness,
- shape errors: perpendicularity, parallelism, disparity, ovalization
- and other.

The manufacturing phase also generates errors which have a significant impact on the reliability of the object in its future operation, as presented in fig. 1. The dominant factor during this phase of vehicle existence is errors committed during the assembly, discussed later in this study [9]. The authors of this study have specified the following errors caused by an improper assembly of a vehicle:

- insufficiently equipped facility
- improper mounting of assemblies and subassemblies,
- leaks in assemblies,
- improper adjustment of elements,
- defects in screw, riveted and welding joints,
- malfunctioning of propulsion systems, assemblies, subassemblies and mechanisms.

the conditions of exploitation, and in particular the intensity of occurring damage and vehicle availability to conduct tasks in accordance with the intended purpose.

The phase of operation is the most crucial phase of life of the object in relation to the verification of the assumptions made at the stage of design and construction. Any shortcomings and errors committed earlier, in the previous phases of existence, are revealed in the phase of operation. Variable operating conditions, typical for military vehicles, cause damage, thus signalling a need for modernization, replacement or upgrades in the functioning of various elements of their construction. The phase of operation is characterized by a large number of factors affecting a vehicle with various intensity, in its particular states of exploitation.

The aging process and physical wear and tear of vehicle parts exerts a destructive influence upon its technical condition, causing an increase in occurring failures. A commensurate impact of these processes under randomly variable load conditions, determined by operational tasks performed by vehicles, causes a loss of technical suitability of its individual components or of the whole vehicle, in situations which are sometimes difficult to predict. These processes are caused by overlapping of numerous factors, acting simultaneously, which result from operating conditions, exploitation errors and the entire operating environment.

Taking into account the causes of damage, the inducing factors can be generally divided into three groups [9], i.e.:

- working factors (internal), acting at the time of vehicle operation,
- external factors resulting from environmental conditions, operating independently of the operating state of the vehicle (use, repair, or downtime),
- anthropotechnical factors, resulting from human activity during operation and servicing.

All the above mentioned groups of factors are interrelated, as depicted in fig. 2. The emergence of one factor induces the existence or intensification of another one. When considering the origin of their emergence, usually the anthropotechnical factors or external ones lead to an increase in internal factors, directly contributing to damage. A mutual influence of the above-mentioned factors is significant to such an extent that the cause of damage cannot be considered in relation to merely one group of factors to be able to fully explain the reason for the loss of technical suitability. Internal factors that are directly related to the working processes in various systems of a vehicle result from its operation in accordance with the intended use. These include all processes that are destructive, causing physical aging of its individual components such as mechanical (inertia forces, gas forces), chemical, thermal and electrical processes.

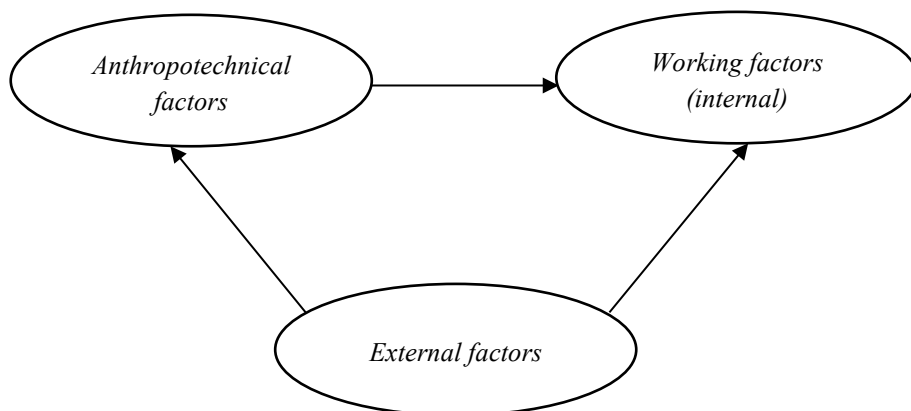


Fig. 2. Graphic illustration of relationships between groups of factors which induce damage

3. The designation of the reliability function for military vehicles

The fundamental research which allows estimating the reliability of military vehicles was performed using Jelcz vehicles of different types: S662-D.43, P662 models D.34 and D.43, C642 D35, P862 D.43, operated daily in a military unit, and thus in real exploitation conditions, typical for military vehicles. The above probe is composed of 37 vehicles, produced in the years 2003–2013, being in the second phase of operation, i.e. during a period of normal wear and tear. The average annual mileage for a vehicle forming part of the probe at stake was equal to 10,777 km, which reflects the level of a mean mileage of this type of vehicles in the general population, exploited in military units.

When using the data from the probe of vehicles, described above by a non-parameter method, it was possible to determine an empirical function of reliability of vehicles, included in the probe under scrutiny, using the following dependency:

$$R^*(s) = \frac{n-m(s)}{n} \quad (1)$$

where:

- n – size of probe,
- m (s) – number of damaged vehicles until reaching mileage s (excluding the moment of reaching this mileage),
- n – m (s) – number of non-damaged vehicles until reaching mileage s.

The time of maintaining a vehicle in a state of suitability was registered when investigating the size of mileage in-between failures, estimated in kilometres, therefore an argument of the reliability function is mileage s , is expressed in km, rather than in time units.

The characteristics of reliability, obtained as a result of the research presented in fig. 3, proves that vehicles in the second phase of operation, exploited in military units, have a logarithmic distribution of reliability in the function of mileage.

The above function can be approximated by a logarithmic function to the following form:

$$R(s) = -0,199 \ln(s) + 0,806 \quad (2)$$

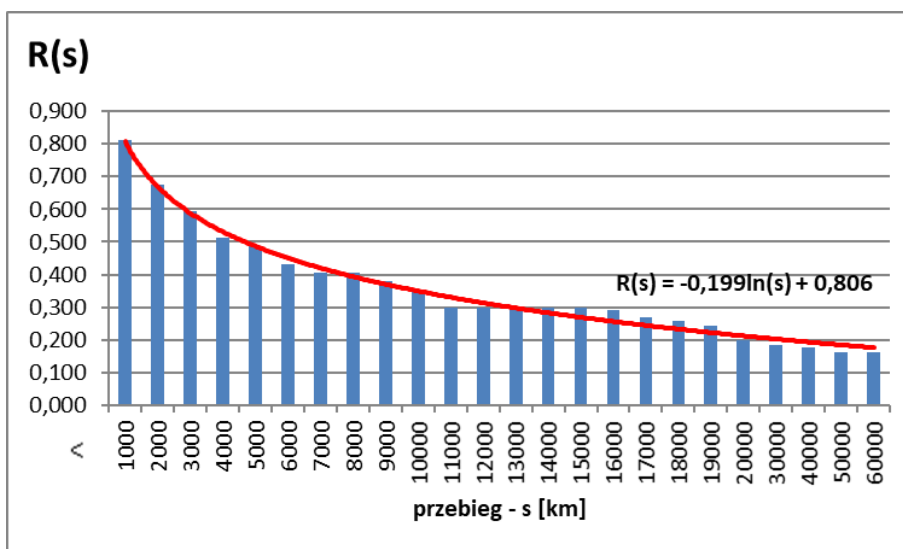


Fig. 3. Empirical function of reliability for military vehicles in the second phase of operation

Similarly, a function of failure, i.e. an empirical cumulative distribution function $F(s)$ of the random variable S (vehicle mileage to its first damage), in accordance with the following formula:

$$F^*(s) = \frac{m(s)}{n} \quad (3)$$

where:

- n – size of probe,
- $m(s)$ – number of damaged vehicles before reaching mileage p .

When analyzing the distribution of the designated function of failure, shown in fig. 4, it is easy to observe that for mileages below 10 000 km, failure, i.e. failure probability rapidly increases, and then it is set at 0,703 level, in the range of 10 000-18 000, and again it rises and remains at the value of 0,838, in the range of large mileages (20 000-60 000).

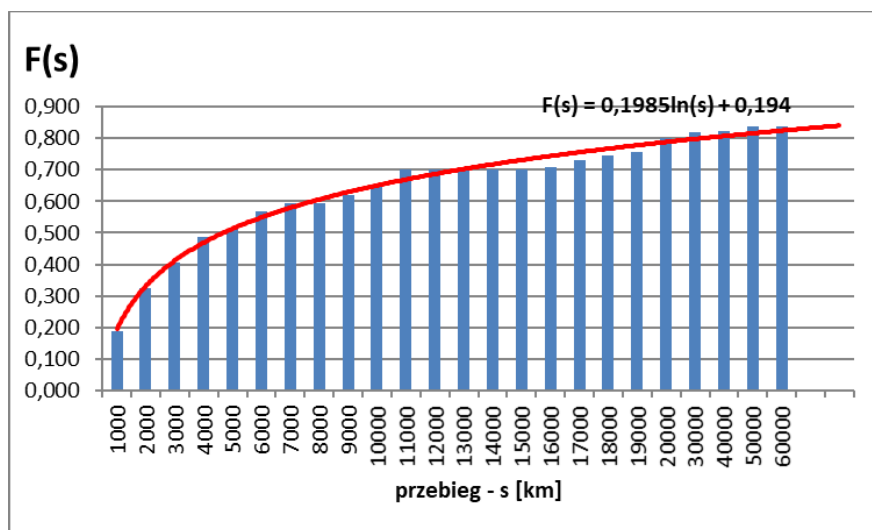


Fig. 4. Empirical function of reliability for military vehicles in the second phase of operation

4. Conclusion

The results of reliability research, conducted for the probe of vehicles, composed of military vehicles in the second phase of the operation, shows that the fastest growth in failure or the likelihood of damage can be anticipated for mileage under 10 000 km from the moment when the vehicle was fully operational. In the range of (10 000–18 000) km mileage, the failure is very high (0,703), however it remains on the same level. Only at considerable mileages, above 20 000 km, there is a further growth in failure.

The above results of reliability tests of military vehicles, operated daily in military units, should be taken into account in order to modify the adopted operational strategy, which in relation to military vehicles, is created by a planned-preventive operation system. Ensuring the required level of availability and effectiveness of the vehicle operational system requires appropriate monitoring of the above system through optimizing the decision-making processes. A prerequisite

for the optimization of this process is to possess appropriate reliability analyses that might allow:

- optimizing the frequency and scope of maintenance and repairs,
- assessing the reliability of individual components, assemblies, systems, or the entire vehicle,
- determining the distribution of the intensity of use of individual items of equipment.

A significant issue in operating military vehicles is also estimating the wear and tear of spare parts, taking into account both the economic aspect as well as ensuring a proper level of the availability index to vehicles which had been damaged.

5. References

1. Braasch A., Althaus D., Meyna A.: Influence of the mileage distribution on reliability prognosis models. ESREL'08, ISBN 978-0-415-48513-5, Taylor & Francis Group, London 2009.
2. Cygan Z., Zięba S.: Badania systemów eksploatacyjnych. Wydawnictwo PAN, Wrocław 1984.
3. Cygan Z., Zięba S.: Modelowanie i symulacja systemów eksploatacji maszyn. PWN, Warszawa 1987.
4. Girtler J.: Możliwości zastosowania i przydatność procesów semimarkowskich jako modeli procesów eksploatacji maszyn. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1996.
5. Girtler J.: Operation of diesel engines as the index of their reliability and safety. Journal of KONES, International Combustion Engines, vol. 10, Warszawa 2003.
6. Girtler J., Ślęzak M.: Application of the theory of semi-Markov processes to the development of a reliability model of an Automotive vehicle. Politechnika Gdańska, Przemysłowy Instytut Motoryzacji, 2012.
7. Grabski F.: Semi-Markov processes: Applications in system reliability and maintenance. Elsevier, Amsterdam 2014.
8. Grabski F.: Analiza ryzyka w decyzyjnych semi-markowskich modelach procesu eksploatacji. XXXVIII Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2010.
9. Hebda M., Janicki D.: Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1977.
10. Niziński St.: Eksploatacja obiektów technicznych. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa-Sulejówek-Olsztyn-Radom 2002.
11. Niziński St., Kolator B.: Ocena efektywności i funkcjonowania systemów eksploatacji pojazdów i maszyn z wykorzystaniem procesów Markowa, MOTROL, 2006.
12. Niziński St., Kupicz W., Mikołajczak P., Rychlik A., Szczygłak P., Wierzbicki S.: Systemy diagnostyczne wojskowych pojazdów mechanicznych. Instytut Technologii Eksploatacji-PIB, Sulejówek-Radom 2011.

13. Młyńczak M.: Preventive maintenance simulation of continuous operation process with random stops. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, ESREL '01, Turyn 2001.
14. Młyńczak M.: *Metodyka badań eksploatacyjnych obiektów mechanicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
15. Nowakowski T.: *Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
16. Ornatowski D.: *Obsługiwanie techniczne uzbrojenia i sprzętu wojskowego w cyklu życia obiektu technicznego*, [in:] *Problemy obsługiwanania techniki lądowej w Siłach Zbrojnych RP*, ed. by K. Kowalskiego. Wyższa Oficerska Szkoła Wojsk Lądowych, Wrocław 2006.
17. Zwierzycki W.: *Prognozowanie niezawodności zużywających się elementów maszyn*, ITE, Radom 2000.
18. Żurek J., Tomaszewska J.: Analysis of the equipment operation system in terms of availability, *Journal of KONBiN*, vol. 40, Warszawa 2016, DOI:10.1515/jok-2016-0038.

ANALIZA NIEZAWODNOŚCI POJAZDÓW WOJSKOWYCH

1. Wstęp

Prowadzenie zadań bojowych w rejonach konfliktów zbrojnych z udziałem komponentów wydzielanych z Sił Zbrojnych RP, uświadomiły nam znaczenie utrzymania zdatności zadaniowej uzbrojenia i sprzętu wojskowego, szczególnie w odniesieniu do pojazdów wojskowych. Zasadniczy sprzęt jednostek wojskowych lądowych to wozy bojowe, bądź inny sprzęt montowany na platformach, które stanowią pojazdy wojskowe. Należy również zauważyć, że pojazdy wojskowe są zasadniczym elementem systemu zabezpieczenia logistycznego, towarzyszący wszelkim działaniom wojsk. Wykonywanie zadań bojowych wymaga utrzymania wysokiej niezawodności sprzętu wojskowego, nie tylko w aspekcie osiągnięcia założonych celów militarnych, ale także w aspekcie zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa żołnierzy.

Pomimo tak dużego znaczenia znajomości niezawodności w kształtowaniu gotowości operacyjnej i efektywnej eksploatacji pojazdów wojskowych, badania w tym zakresie są dość ograniczone. Głównym problemem jest brak danych odnośnie uszkodzalności pojazdów eksploatowanych w jednostkach wojskowych. Wytyczne do prowadzenia dokumentacji eksploatacyjnej niestety nie uwzględniają analiz niezawodnościowych, której znajomość jak zauważono wcześniej ma ogromne znaczenie w wielu aspektach. Zaimplementowany obecnie w Siłach Zbrojnych RP system informatyczny Zintegrowany Wieloszczeblowy System Informatyczny Resortu Obrony Narodowej (ZWSI RON), mający wspierać również proces eksploatacji pojazdów wojskowych. Nie umożliwia on analizy niezawodności i gotowości pojazdów, będących w ewidencji bazy danych przedmiotowego systemu.

Badania niezawodnościowe są istotne zwłaszcza w odniesieniu do pojazdów wojskowych, które są często użytkowane w zmiennych warunkach zewnętrznych, różnorodnych warunkach terenowych i atmosferycznych.

2. Analiza czynników wpływających na niezawodność

Ustalenie czynników wpływających na niezawodność sprowadza się do ustalenia przyczyn występowania uszkodzeń pojazdów.

Dotychczas już zauważono, że poszukiwań pierwotnych przyczyn uszkodzeń wojskowych pojazdów mechanicznych nie należy ograniczać tylko do fazy eksploatacji, która stanowi ostatnią fazę istnienia pojazdu. W pracy [12] wyszczególniono fazy życia pojazdu mechanicznego, tj.:

- potrzeby,
- projektowania i konstruowania,
- wytwarzania,
- eksploatacji.

Stwierdzono, że błędy popełnione w każdej fazie istnienia obiektu stanowią źródło potencjalnych przyszłych uszkodzeń pojazdów.

Pierwsze błędy zostają popełniane już w pierwszej fazie na etapie definiowania potrzeb. Zasadniczym źródłem tych błędów są niewłaściwie opracowane założenia taktyczno-techniczne. Wymagania określone w przedstawionych założeniach do spełnienia dla poszczególnych układów pojazdu oraz całego pojazdu i systemu jego eksploatacji, nie zawsze są adekwatne do rzeczywistych warunków użytkowania, w jakich będzie wykorzystywany pojazd.

Częstym zjawiskiem jest również problem dotyczący kwantyfikacji określonych potrzeb. Wymagania, których nie można określić ilościowo są pomijane w dokumentacji. Najbardziej istotne dla pojazdów wojskowych wymagania niezawodnościowe, które głównie kształtują poziom gotowości operacyjnej pojazdów, w przedmiotowej dokumentacji są ujmowane zbyt ogólnie. Opisywane małą ilością wskaźników niezawodności, zarówno operacyjno-taktycznych, jak i wskaźników technicznych, wyszczególnionych w normach obronnych, w niedostatecznym stopniu precyzują wymagania odnośnie efektywności pracy, czy podstawowe właściwości niezawodnościowe (nieuszkodzalność, naprawialność, trwałość i przechowywalność).

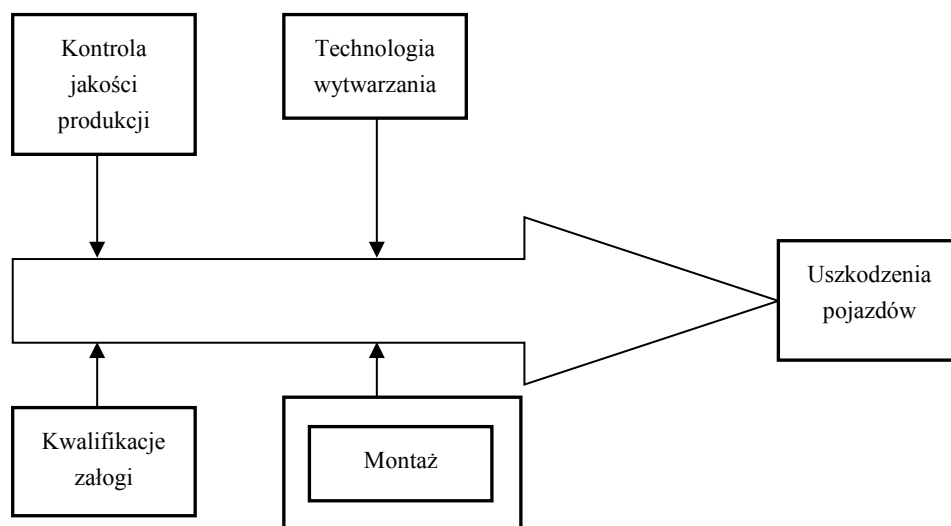
Odnośnie drugiej fazy życia wojskowych pojazdów, związanej z procesem projektowo-konstrukcyjnym w pracy [12] przedstawiono podstawowe błędy projektowo-konstrukcyjne, które też przyczyniają się do zwiększonej liczby uszkodzeń pojazdu w czasie eksploatacji, tj.:

- koncepcja obiektu,
- badania modeli i prototypów,
- dobór materiałów,
- dobór technologii wytwarzania,
- obróbka cieplna,

- pasowania,
- chropowatość powierzchni,
- błędy kształtu: prostopadłość, równoległość, niewspółmierność, owalizacja,
- inne.

Faza wytwarzania również generuje błędy, mające istotny wpływ na niezawodność obiektu w dalszej eksploatacji, które zostały przedstawione na rys. 1. Dominującym czynnikiem w tej fazie życia pojazdu są błędy popełnione w trakcie montażu, co zostało wyeksponowane w pracy [9]. W niniejszym opracowaniu wyszczególniono następujące błędy spowodowane niewłaściwym montażem pojazdu:

- niekompletne wyposażenie zakładu,
- niewłaściwe montowanie zespołów i podzespołów,
- nieuszczelność zespołów,
- niewłaściwa regulacja elementów,
- wady połączeń gwintowych, nitowych i spawalnych,
- nieprawidłowe funkcjonowanie układów zespołów, podzespołów i mechanizmów.



Rys. 1. Ilustracja graficzna czynników fazy wytwarzania mających istotny wpływ na generację uszkodzeń wojskowych pojazdów mechanicznych [9]

Projektowanie i konstruowanie pojazdu musi być oparte o: badania modeli oraz prototypów, wykorzystanie baz danych, wiedzy eksperckiej i dotychczasowych doświadczeń z eksploatacji podobnych obiektów, a także innych danych

o charakterze aposteriorycznym, co zyskuje potwierdzenie w licznych opracowaniach naukowych [1-8, 10, 11, 13-18]. Badania pojazdów wojskowych powinny mieć charakter procesu rozciągniętego na wszystkie fazy ich istnienia. Dogłębna analiza uszkodzenia elementu danego obiektu technicznego wymaga prześledzenia potencjalnych przyczyn we wszystkich etapach jego powstawania oraz eksploatacji. Wykonując badania należy też zadbać o jak największy poziom ich efektywności tak, aby cel użyteczny badań był w jak największym stopniu zrealizowany, dlatego też istotna jest przyjęta metodyka badań, na co zwrócono uwagę w pracy [14]. Niestety częstym zjawiskiem w Siłach Zbrojnych RP są limity finansowe na prace badawcze, co znacznie ogranicza zakres badań i przyczynia się do późnego wykrycia wad i usterek, dopiero w fazie eksploatacji w jednostkach wojskowych.

Powyżej przedstawiono wszystkie zasadnicze czynniki wpływające na intensywność uszkodzeń wojskowych pojazdów mechanicznych pochodzenia konstrukcyjnego i technologicznego oraz inne nie związane z procesem eksploatacji. Na powyższe czynniki użytkownik nie ma żadnego wpływu, ponieważ cechy obiektu zostały już wcześniej określone przez konstruktora, a także technologa.

W dalszej części tego rozdziału zostaną przedstawione czynniki wpływające na niezawodność związane z fazą eksploatacji, w której udział użytkownika ma decydujący wpływ na warunki eksploatacji, a tym samym intensywność występowania uszkodzeń i gotowość pojazdu do wykonywania zadań zgodnie z przeznaczeniem.

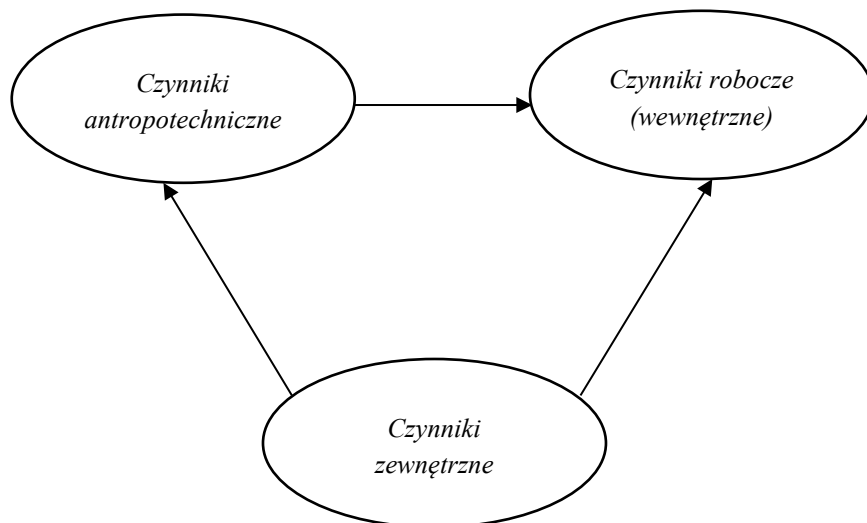
Faza eksploatacji jest najbardziej istotną fazą życia obiektu, w odniesieniu do weryfikacji założeń przyjętych na etapie projektowania i konstruowania. Wszelkie niedociągnięcia i błędy popełniane wcześniej w poprzednich fazach istnienia są ujawniane w fazie eksploatacji. Zmienne warunki eksploatacji, typowe dla pojazdów wojskowych generują uszkodzenia, sygnalizując potrzeby modernizacji, wymiany lub udoskonalień w funkcjonowaniu poszczególnych elementów ich konstrukcji. Faza eksploatacji charakteryzuje się dużą liczbą czynników oddziaływujących na pojazd z różnym natężeniem, w poszczególnych jego stanach eksploatacyjnych.

Proces starzenia fizycznego i zużycia elementów pojazdu wpływa destrukcyjnie na jego stan techniczny, powodując nasilenie występowania uszkodzeń. Współmierne oddziaływanie tych procesów w warunkach losowo zmiennych obciążeń, zdeterminowanych przez wykonywane zadania operacyjne przez pojazd, powoduje utratę zdolności technicznej poszczególnych jego elementów, bądź całości pojazdu, w chwilach trudnych czasami do przewidzenia. Procesy te są wywołane nakładaniem się wielu czynników działających jednocześnie, które wynikają z warunków eksploatacji, błędów eksploatacyjnych oraz całego otoczenia eksploatacyjnego.

Uwzględniając przyczyny powstawania uszkodzeń czynniki wymuszające możemy podzielić ogólnie na trzy grupy [9], tj.:

- czynniki robocze (wewnętrzne), działające w czasie użytkowania pojazdu,
- czynniki zewnętrzne, wynikające z warunków otoczenia, działające niezależnie od stanu eksploatacyjnego pojazdu (użytkowania, naprawy, bądź postoju),
- czynniki antropotechniczne, wynikające z działalności człowieka w trakcie użytkowania i obsługi.

Wszystkie powyższe grupy czynników są ze sobą powiązane relacjami, jak zobrazowano na rys. 2. Pojawienie się jednych wymusza zaistnienie, bądź nasilenie drugich. Rozpatrując genezę ich powstawania, najczęściej czynniki antropotechniczne, czy zewnętrzne powodują nasilenie się czynników wewnętrznych, przyczyniających się bezpośrednio do uszkodzenia. Wzajemny wpływ jest na tyle istotny, że nie można rozpatrywać przyczyny uszkodzenia w odniesieniu tylko do jednej grupy, aby w pełni wyjaśnić przyczynę utraty zdolności technicznej. Czynniki wewnętrzne związane są bezpośrednio z procesami roboczymi, które zachodzą w poszczególnych układach pojazdu w wyniku jego funkcjonowania zgodnie z przeznaczeniem. Należą do nich wszelkie procesy niszczące, wymuszające starzenie fizyczne jego poszczególnych elementów, takie jak: procesy mechaniczne (siły bezwładności, gazowe), chemiczne, cieplne i elektryczne.



Rys. 2. Ilustracja graficzna relacji między grupami czynników wymuszających uszkodzenia

3. Wyznaczenie funkcji niezawodności dla pojazdów wojskowych

Zasadnicze badania pozwalające oszacować niezawodność pojazdów wojskowych wykonano przy wykorzystaniu próby pojazdów marki Jelcz różnych typów: S662 – D.43, P662 odmiany D.34 i D.43, C642 D.35, P862 D.43, eksploatowanych na co dzień w jednostce wojskowej, a więc w rzeczywistych warunkach eksploatacji, typowych dla pojazdów wojskowych. Powyższą próbę stanowi 37 pojazdów, ich rok produkcji to lata 2003–2013, będących w drugiej fazie eksploatacji, czyli w okresie normalnego zużycia. Średni przebieg w roku dla pojazdu wchodzącego w skład przedmiotowej próby wyniósł 10 777 km, co odzwierciedla poziom średniego przebiegu tych typów pojazdów w populacji generalnej, eksploatowanych w jednostkach wojskowych.

Wykorzystując dane z próby pojazdów opisanej powyżej, metodą nieparametryczną wyznaczono empiryczną funkcję niezawodności pojazdów wchodzących w skład przedmiotowej próby, według zależności:

$$R^*(s) = \frac{n-m(s)}{n} \quad (1)$$

gdzie:

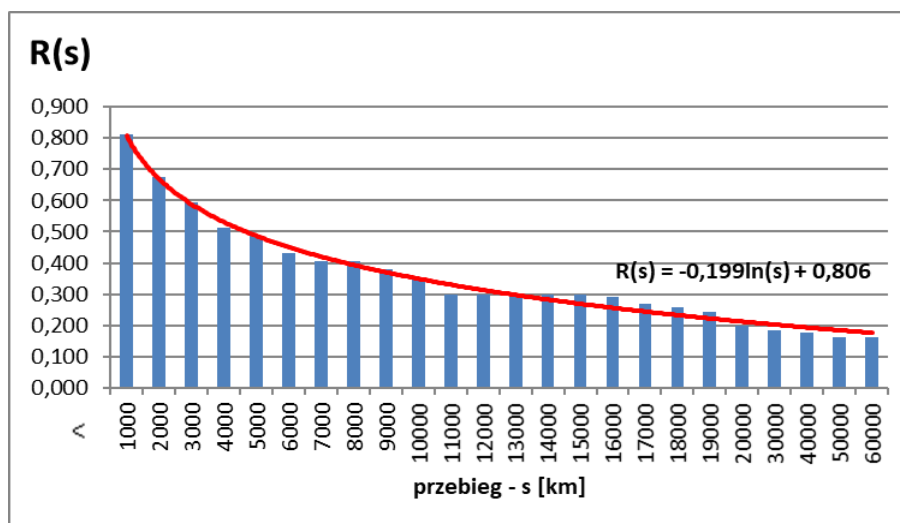
- n – liczność próby,
- $m(s)$ – liczba uszkodzonych pojazdów do czasu osiągnięcia przebiegu s , (wyłączywszy moment osiągnięcia tego przebiegu),
- $n-m(s)$ – liczba pojazdów nie uszkodzonych do czasu osiągnięcia przebiegu s .

Czas utrzymania pojazdu w stanie zdatności rejestrowany był w czasie badań wielkością przebiegu między uszkodzeniami, szacowanym w kilometrach, dlatego argumentem funkcji niezawodności jest przebieg s , wyrażony w km, a nie w jednostkach czasu.

Otrzymana w wyniku badań prezentowanej próby charakterystyka niezawodnościowa przedstawiona na rys. 3 dowodzi, że pojazdy z drugiej fazy eksploatacji użytkowane w jednostkach wojskowych mają logarytmiczny rozkład niezawodności w funkcji przebiegu.

Powyższą funkcję można aproksymować funkcją logarytmiczną do postaci:

$$R(s) = -0,199 \ln(s) + 0,806 \quad (2)$$



Rys. 3. Empiryczna funkcja niezawodności dla pojazdów wojskowych z drugiej fazy eksploatacji

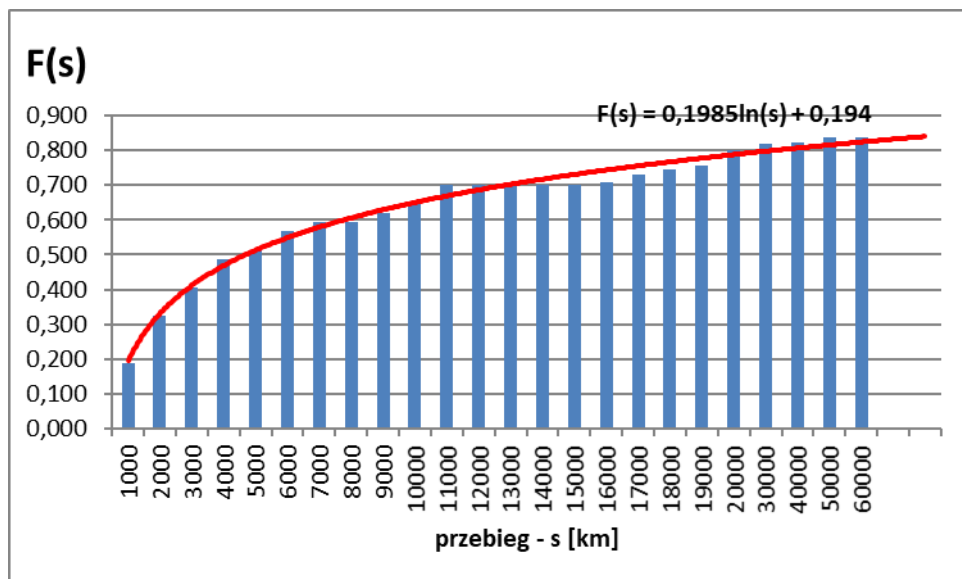
Podobnie wyznaczono funkcję zawodności, czyli dystrybuantę empiryczną $F(s)$ zmiennej losowej S (przebiegu pojazdu do pierwszego uszkodzenia) według następującego wzoru:

$$F^*(s) = \frac{m(s)}{n} \quad (3)$$

gdzie:

- n – licznosc próby,
- $m(s)$ – liczba pojazdów, które uległy uszkodzeniu przed osiągnięciem przebiegu s .

Analizując rozkład wyznaczonej funkcji zawodności przedstawionej na rys. 4 łatwo jest zauważyć, że dla przebiegów mniejszych od 10 000 km zawodność, czyli prawdopodobieństwo awarii gwałtownie rośnie, po czym ustala się na poziomie 0,703 w przedziale 10 000-18 000, po czym ponownie wzrasta i ustala się do wartości 0,838 w przedziale dużych przebiegów (20 000-60 000).



Rys. 4. Empiryczna funkcja niezawodności dla pojazdów wojskowych z drugiej fazy eksploatacji

4. Podsumowanie

Wyniki badań niezawodnościowych przeprowadzonych dla przedmiotowej próby pojazdów, w której skład wchodzi pojazdy wojskowe z drugiej fazy eksploatacji pokazują, że najszybszego wzrostu zawodności, czyli prawdopodobieństwa uszkodzenia, należy się spodziewać dla przebiegu mniejszego niż 10 000 km od momentu kiedy pojazd był w pełnej zdolności technicznej. W przedziale (10 000-18 000) km przebiegu zawodność jest bardzo wysoka (0,703), ale pozostaje na tym samym poziomie. Dopiero przy znacznych przebiegach, powyżej 20 000 km następuje dalszy wzrost zawodności.

Powyższe wyniki badań niezawodnościowych pojazdów wojskowych, eksploatowanych na co dzień w jednostkach wojskowych, powinny być uwzględniane w celu modyfikacji przyjętej strategii eksploatacji, którą w odniesieniu do pojazdów wojskowych tworzy planowo-zapobiegawczy system eksploatacji. Zapewnienie wymaganego poziomu gotowości i efektywności systemu eksploatacji pojazdów wymaga odpowiedniego sterownia powyższym systemem poprzez optymalizację procesów decyzyjnych. Warunkiem koniecznym do optymalizacji tego procesu jest posiadanie odpowiednich analiz niezawodnościowych, które pozwolą nam:

- zoptymalizować częstość i zakres obsług technicznych i napraw,
- ocenić niezawodność poszczególnych elementów, zespołów, układów, czy całego pojazdu,
- wyznaczyć rozkład intensywności użytkowania poszczególnych egzemplarzy sprzętu.

Istotny problem w eksploatacji pojazdów wojskowych stanowi również określenie prognozy zużycia części wymiennych, biorąc pod uwagę zarówno aspekt ekonomiczny, jak i zapewnienie odpowiedniego poziomu wskaźnika gotowości pojazdów po uszkodzeniach.

5. Literatura

1. Braasch A., Althaus D., Meyna A.: Influence of the mileage distribution on reliability prognosis models. ESREL'08, ISBN 978-0-415-48513-5, Taylor & Francis Group, London 2009.
2. Cygan Z., Zięba S.: Badania systemów eksploatacyjnych. Wydawnictwo PAN, Wrocław 1984.
3. Cygan Z., Zięba S.: Modelowanie i symulacja systemów eksploatacji maszyn. PWN, Warszawa 1987.
4. Girtler J.: Możliwości zastosowania i przydatność procesów semimarkowskich jako modeli procesów eksploatacji maszyn. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1996.
5. Girtler J.: Operation of diesel engines as the index of their reliability and safety. Journal of KONES, International Combustion Engines, vol. 10, Warszawa 2003.
6. Girtler J., Ślęzak M.: Application of the theory of semi-Markov processes to the development of a reliability model of an Automotive vehicle. Politechnika Gdańska, Przemysłowy Instytut Motoryzacji, 2012.
7. Grabski F.: Semi-Markov processes: Applications in system reliability and maintenance. Elsevier, Amsterdam 2014.
8. Grabski F.: Analiza ryzyka w decyzyjnych semi-markowskich modelach procesu eksploatacji. XXXVIII Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2010.
9. Hebda M., Janicki D.: Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1977.
10. Niziński St.: Eksploatacja obiektów technicznych. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa-Sulejówek-Olsztyn-Radom 2002.
11. Niziński St., Kolator B.: Ocena efektywności i funkcjonowania systemów eksploatacji pojazdów i maszyn z wykorzystaniem procesów Markowa. MOTROL, 2006.
12. Niziński St., Kupicz W., Mikołajczak P., Rychlik A., Szczyglak P., Wierzbiński S.: Systemy diagnostyczne wojskowych pojazdów mechanicznych. Instytut Technologii Eksploatacji-PIB, Sulejówek-Radom 2011.

13. Młyńczak M.: Preventive maintenance simulation of continuous operation process with Random Stops. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, ESREL '01, Turyn 2001.
14. Młyńczak M.: Metodyka badań eksploatacyjnych obiektów mechanicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
15. Nowakowski T.: Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
16. Ornatowski D.: Obsługiwanie techniczne uzbrojenia i sprzętu wojskowego w cyklu życia obiektu technicznego, [w:] Problemy obsługiwania techniki lądowej w Siłach Zbrojnych RP, pod red. K. Kowalskiego. Wyższa Oficerska Szkoła Wojsk Lądowych, Wrocław 2006.
17. Zwierzycki W.: Prognozowanie niezawodności używających się elementów maszyn, ITE, Radom 2000.
18. Żurek J., Tomaszewska J.: Analysis of the equipment operation system in terms of availability, Journal of KONBiN, vol. 40, Warszawa 2016, DOI:10.1515/jok-2016-0038.