

Mirosław SIERGIEJCZYK, Adam ROSIŃSKI
Warsaw University of Technology (Politechnika Warszawska)

ANALYSIS OF THE OPERATION PROCESS OF VEHICLES EQUIPPED WITH TELEMATIC ON-BOARD SYSTEMS

Analiza procesu eksploatacji pojazdów wyposażonych w telematyczne systemy pokładowe

Abstract: Modern vehicles are equipped with telematic on-board systems, which connect electronic devices between them. The sent data are among others used to control systems and devices. They also have a certain operational potential. They can, indeed, also be used to rationalize the technical service of the vehicle fleet. This publication presents the author's graph of the operation process, including the monitoring of the vehicle fleet. The application of the presented approach will contribute to the improvement of the value of certain vehicle reliability and operation indicators.

Keywords: transport telematics systems, operation, reliability

Streszczenie: Współczesne pojazdy są wyposażone w telematyczne systemy pokładowe, które łączą pomiędzy sobą urządzenia elektroniczne. Przesyłane dane są m.in. wykorzystywane do sterowania układami i urządzeniami. Mają one także określony potencjał eksploatacyjny. Mogą zatem być również wykorzystane do racjonalizacji obsługi technicznej floty pojazdów. W publikacji przedstawiono autorski graf procesu eksploatacji uwzględniający monitorowanie floty pojazdów. Zastosowanie przedstawionego podejścia przyczyni się do poprawy wartości określonych wskaźników niezawodnościowo-eksploatacyjnych pojazdów.

Słowa kluczowe: systemy telematyki transport, eksploatacja, niezawodność

1. Introduction

Transport telematics systems integrate information technology with telecommunications in applications for the needs of various transport systems. The use of advanced technical solutions, as well as modern telecommunications and IT systems allow to implement modern services [16, 20] that are applied in the process of using and maintaining means of transport. Therefore, the efficiency of using the transport infrastructure and the means of transport increase, but at the same time, the safety level of travellers, vehicles and facilities implementing transport tasks [13, 18, 19] improves. The use of specialised IT applications that utilise the data obtained from the transport telematics systems within the area of widely understood transport resulted in the implementation of Intelligent Transport Systems (ITS). These are currently the most advanced systems [27].

The increase in the level of safety and timeliness of transport in road traffic can be achieved, among others, through the implementation of the modern intelligent transport systems [29]. The applied means of road transport should be characterised by certain values of reliability and operation indicators [5, 10, 26]. The reliability of vehicles is affected by the reliability of components and the applied redundant structures [2, 4]. The first solution prevents damage, although the second one leads to the system expansion, but it allows for tolerating the occurring damage (states of partial fitness). Redundancy may apply to the device components, vehicle's modules, as well as, e.g. control computers. When analysing the solutions applied in the vehicles, the quality of information obtained by systems from sensors [30] is also important. The functioning of vehicles is also significantly affected by oscillations [3]. An important issue is also the correct power supply of electronic devices used in the vehicle and electromagnetic compatibility [23, 28].

Modern vehicles are equipped with telematic on-board systems which connect the electronic devices with each other [11]. The sent data are, among others, applied to control the systems and devices. They also have a certain operational potential (e.g. it is possible to detect negative effects, such as, e.g. a great number of ascent and descent slopes in the mountain area with the improper use of various braking methods, the vehicle operation in the upper engine speed range with too low coolant temperature) [7]. Therefore, they can also be used to rationalise the technical service of the vehicle fleet.

2. Modelling of the operation process of means of transport

Maintenance can be divided into *preventive maintenance* and *corrective maintenance* [15, 22].

The purpose of the preventive maintenance is to perform preventive maintenance, as a result of which the probability of damage or deterioration of the vehicle functioning occurs. The preventive maintenance can be divided into *condition based maintenance* and *predetermined maintenance*.

The condition based maintenance requires monitoring the vehicle's condition and performance of its maintenance when the possibility of losing the state of fitness occurs. The predetermined maintenance requires the implementation of preventive maintenance at predetermined times, where the time periods between subsequent maintenance of the vehicle are determined as a result of the reliability analysis or/and operational experience.

The corrective maintenance is carried out after identifying the vehicle damage. The purpose of activities is then the repair restoring the state of fitness. In the corrective maintenance, it is possible to distinguish two ways of action. The first one includes taking *immediate corrective maintenance* – then, the repair is carried out immediately after the damage detection. The second one includes *deferred corrective maintenance* – then, the repair is delayed in accordance with the adopted rules of conduct.

The implementation of modern solutions in the field of transport telematics systems and intelligent transport systems results in a significant increase in the amount of operational information. Thus, they can be used in order to rationalise the vehicle operation process. Thus, the term “maintenance” can be distinguished and defined as the maintenance concept of vehicles, in which they are monitored and managed with the use of means of transport telematics. Such an approach allows for the current assessment of the vehicle degradation and undertaking measures to counteract adverse changes in their technical condition.

By summing up the presented considerations, it can be concluded that the concept of maintenance began to evolve from traditional “*fail and fix*” maintenance practices through successive proactive solutions to those that can be determined by the statement “*predict and prevent*” [12].

The evolution of the approach in the vehicle management and operation has led to the creation of PHM (*Prognostics and Health Management/Monitoring*) [1, 14, 21]. They can be defined as forecasting tools for managing the usability potential of technical objects, in particular, for means of transport (including vehicles). The use of the PHM systems is aimed at predicting future operational events, means of transport, their assessment of the usability potential and RUL (*Remaining Useful Life*). For this purpose, the diagnostic information, which allows to determine the current state of the object, is used. Therefore, it is also possible to forecast the past operational states.

Currently, the implementation of solutions in the field of the PHM systems is possible because the vehicles are equipped with the complex telematics systems. Thus, access to data from many sensors constituting the equipment of means of transport is obtained. This information is sent by modern transmission systems and then analysed with the use, among others, of cloud computing [24], artificial neural networks [8, 9], and fuzzy logic. At the earliest, the PHM systems were implemented in air transport, and currently, they are more often used in other transport modes (especially, rail transport [6, 17, 25]).

3. Modelling of the operation process of vehicles equipped with telematic on-board systems

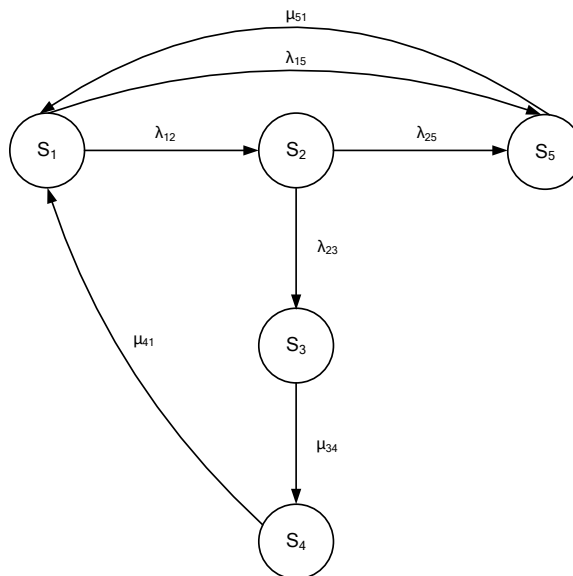
Figure 1 presents a model of the operation process of vehicles equipped with telematic on-board systems allowing for monitoring. The object staying in the state S_1 is fit and can implement transport tasks. In this state, the object is monitored, and the diagnosis is formulated. The positive diagnosis allows to continue the use of the vehicle.

If the object is in the state S_1 and its degradation occurs, it is transferred with the intensity λ_{12} to the state of partial fitness S_2 . Then, with the intensity λ_{23} , it goes to the state of diagnosis S_3 , from which it goes to the maintenance state S_4 with the diagnosis formulation intensity μ_{34} .

Being in the state S_4 , it is subject to the maintenance process, and then, with the preventive maintenance intensity μ_{41} , it goes to the state of fitness S_1 .

It is also possible for the object to go from the state of fitness S_1 to the state of unfitness S_5 . Such a situation occurs in case of sudden (catastrophic) damage with the intensity λ_{15} . The occurrence of this kind of damage can also take place when the object is in the state S_2 . Then, with the intensity of damage λ_{25} , it also goes to the state S_5 .

The object staying in the state S_5 is subject to the corrective maintenance, and after the repair, with the intensity μ_{51} , it goes to the state of fitness S_1 . Then, it can start the transport task implementation.



Rys. 1. Model of the operation process of the fleet allowing for monitoring. S_1 – state of fitness, S_2 – state of partial fitness, S_3 – state of diagnosis, S_4 – state of maintenance, S_5 – state of unfitness.

A characteristic feature of this model is the fact that the object can be used only when it is in the state of fitness. In case of degradation and transition to the state of partial fitness, it is subject to the preventive maintenance, previously passing through the state of diagnosis, which allows to determine the range of the necessary maintenance activities.

The operation process model presented in fig. 1 can be described with the following Chapman-Kolmogorov equations:

$$\begin{aligned}
 S_1'(t) &= -\lambda_{15} \cdot S_1(t) + \mu_{51} \cdot S_5(t) - \lambda_{12} \cdot S_1(t) + \mu_{41} \cdot S_4(t) \\
 S_2'(t) &= \lambda_{12} \cdot S_1(t) - \lambda_{25} \cdot S_2(t) - \lambda_{23} \cdot S_2(t) \\
 S_3'(t) &= -\mu_{34} \cdot S_3(t) + \lambda_{23} \cdot S_2(t) \\
 S_4'(t) &= -\mu_{41} \cdot S_4(t) + \mu_{34} \cdot S_3(t) \\
 S_5'(t) &= \lambda_{15} \cdot S_1(t) + \lambda_{25} \cdot S_2(t) - \mu_{51} \cdot S_5(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Assuming the baseline conditions:

$$\begin{aligned}
 S_1(0) &= 1 \\
 S_2(0) &= S_3(0) = S_4(0) = S_5(0) = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

and applying the Laplace transform, it is possible to obtain the following system of equations:

$$\begin{aligned}
 (s + \lambda_{15} + \lambda_{12}) \cdot S_1^*(s) - \mu_{51} \cdot S_5^*(s) - \mu_{41} \cdot S_4^*(s) &= 1 \\
 (s + \lambda_{25} + \lambda_{23}) \cdot S_2^*(s) - \lambda_{12} \cdot S_1^*(s) &= 0 \\
 (s + \mu_{34}) \cdot S_3^*(s) - \lambda_{23} \cdot S_2^*(s) &= 0 \\
 (s + \mu_{41}) \cdot S_4^*(s) - \mu_{34} \cdot S_3^*(s) &= 0 \\
 (s + \mu_{51}) \cdot S_5^*(s) - \lambda_{15} \cdot S_1^*(s) - \lambda_{25} \cdot S_2^*(s) &= 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

The probabilities of the system staying in the distinguished functional states from the symbolic (Laplace's) perspective have the following form:

$$\begin{aligned}
 S_1^*(s) &= -\frac{b \cdot c \cdot d \cdot e}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e} \\
 S_2^*(s) &= -\frac{c \cdot d \cdot e \cdot \lambda_{12}}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e} \\
 S_3^*(s) &= -\frac{d \cdot e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23}}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e} \\
 S_4^*(s) &= -\frac{e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{34}}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e} \\
 S_5^*(s) &= -\frac{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25}}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e}
 \end{aligned} \tag{4}$$

where:

$$\begin{aligned}
 a &= s + \lambda_{15} + \lambda_{12} \\
 b &= s + \lambda_{25} + \lambda_{23} \\
 c &= s + \mu_{34} \\
 d &= s + \mu_{41} \\
 e &= s + \mu_{51}
 \end{aligned} \tag{5}$$

The solution of the presented set of equations in the field of time is the next stage of the analysis and it is not discussed in this article.

By conducting the further mathematical analysis, the relationships that allow to determine the probabilities of the system staying in the distinguished states are obtained.

4. Conclusions

The article presents the author's graph of the operation process including the vehicle fleet monitoring. The application of the presented approach will contribute to the improvement of the value of certain reliability and operation indicators of the vehicles.

In further studies of this area, the authors plan to use operating data received via telematics interface from the vehicle for the purpose of the rolling stock profiling. It will involve the distinction of individual vehicles or their sets in terms of their reliability and operation properties. It allows for the rolling stock operation specification that provides the

opportunity to rationalise the operation and maintenance. The application of such an approach will contribute to the further improvement of the value of reliability and operation indicators of the vehicle fleet

5. References

1. Atamuradov V., Medjaher K., Dersin P., Lamoureux B., Zerhouni N.: Prognostics and Health Management for Maintenance Practitioners - Review, Implementation and Tools Evaluation. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 8 (31), 2017.
2. Będkowski L., Dąbrowski T.: Podstawy eksploatacji, cz. II Podstawy niezawodności eksploatacyjnej. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2006.
3. Burdzik R., Konieczny Ł., Figlus T.: Concept of on-board comfort vibration monitoring system for vehicles. In: the monograph *Activities of Transport Telematics, TST 2013*, J. Mikulski (Ed.), Vol. 395, Springer, Heidelberg 2013.
4. Caban D., Walkowiak T.: Dependability analysis of hierarchically composed system-of-systems. In: *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX*, Zamojski W., Mazurkiewicz J., Sugier J., Walkowiak T., Kacprzyk J. (eds.). Springer 2019.
5. Chrzan M., Kornaszewski M., Ciszewski T.: Renovation of marine telematics objects in the process of exploitation. In: *Management Perspective for Transport Telematics, TST 2018, Communications in Computer and Information Science*, J. Mikulski (Ed.), Vol. 897. Springer, Cham 2018.
6. Chudzikiewicz A., Bogacz R., Kostrzewski M., Konowrocki R.: Condition monitoring of railway track systems by using acceleration signals on wheelset axle-boxes. *Transport*, 33(2), 2018.
7. Dąbrowski T.: *Diagnozowanie systemów antropotechnicznych w ujęciu potencjałowo-efektowym*. Wyd. WAT, Warszawa 2001.
8. Duer S., Duer R., Mazuru S.: Determination of the expert knowledge base on the basis of a functional and diagnostic analysis of a technical object. *Romanian Association of Nonconventional Technologies, Romanian*, June 2016, 6/2016, Vol. XX, No 2.
9. Duer S., Zajkowski K., Płochka I., Duer R.: Training of an artificial neural network in the diagnostic system of a technical object. *Neural Computing & Applications*, Vol. 22, No. 7, 2013.
10. Dyduch J., Paś J., Rosiński A.: *Podstawy eksploatacji transportowych systemów elektronicznych*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2011.
11. Frei M.: *Samochodowe magistrale danych w praktyce warsztatowej*. WKŁ, Warszawa 2016.
12. Galar D., Wandt K., Karim R., Berges L.: The evolution from e(lectronic) Maintenance to i(ntelligent) Maintenance. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 54(8), 2012.

13. Janusova L., Cimancova S.: Improving safety of transportation by using intelligent transportation systems. 9th International Scientific Conference Transbaltica 2015, Procedia Engineering 134, 2016.
14. Jia X., Huang B., Feng J., Cai H., Lee J.: A review of PHM Data Competitions from 2008 to 2017: Methodologies and Analytics. Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2018, Philadelphia, USA, 2018.
15. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S.: Analysis of maintenance models' parameters estimation for technical systems with delay time. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, Vol. 16, No. 2, 2014.
16. Kasprzyk Z., Rychlicki M.: Analysis of physical layer model of WLAN 802.11g data transmission protocol in wireless networks used by telematic systems. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 286. Springer International Publishing 2014.
17. Kour R., Karim R., Tretten P.: eMaintenance solutions for railway maintenance decisions. In: Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. 1, London, UK, 2014.
18. Lewiński A., Perzyński T., Toruń A.: The analysis of open transmission standards in railway control and management. *Telematics in the Transport Environment. TST 2012. Communications in Computer and Information Science*, Vol. 329, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2012.
19. Losurdo F., Dileo I., Siergiejczyk M., Krzykowska K., Krzykowski M.: Innovation in the ICT infrastructure as a key factor in enhancing road safety: a multi-sectoral approach. Proceedings 25th International Conference on Systems Engineering ICSEng 2017, eds.: H. Selvaraj, G. Chmaj, D. Zydek, IEEE Computer Society Conference Publishing Services (CPS), Las Vegas, Nevada, USA, 2017.
20. Łubkowski P., Laskowski D.: Selected issues of reliable identification of object in transport systems using video monitoring services. In: „Communication in Computer and Information Science”, J. Mikulski (Ed.), Vol. 471, Springer, Berlin Heidelberg 2015.
21. Mesgarpour M., Landa-Silva D., Dickinson I.: Overview of telematics-based prognostics and health management systems for commercial vehicles. In: *Communications in Computer and Information Science*, vol. 395, Activities of Transport Telematics, TST 2013, J. Mikulski (Ed.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013.
22. Nowakowski T., Tubis A., Werblińska-Wojciechowska S.: Evolution of technical maintenance approaches – review and a case study. *Intelligent Systems in Production and Maintenance, ISPEM 2018, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 835, Springer, Cham 2019.
23. Paś J.: *Eksploatacja elektronicznych systemów transportowych*. Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Radom 2015.

24. Reddig K., Dikunow B., Krzykowska K.: Proposal of big data route selection methods for autonomous vehicles. *Internet Technology Letters*, 1(36), 2018.
25. Restel F.J.: The Markov reliability and safety model of the railway transportation system. *Safety and Reliability: Methodology and Applications - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2014*.
26. Rosiński A.: *Modelowanie procesu eksploatacji systemów telematiki transportu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.
27. Siergiejczyk M., Krzykowska K., Rosiński A., Grieco L.A.: Reliability and viewpoints of selected ITS system. *Proceedings 25th International Conference on Systems Engineering ICSEng 2017*, eds.: H. Selvaraj, G. Chmaj, D. Zydek, IEEE Computer Society Conference Publishing Services (CPS), Las Vegas, Nevada, USA, 2017.
28. Siergiejczyk M., Paś J., Rosiński A.: Modeling of process of maintenance of transport systems telematics with regard to electromagnetic interferences. In: *Tools of Transport Telematics*, Mikulski J. (ed.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2015.
29. Siergiejczyk M.: Efektywność eksploatacyjna systemów telematiki transportu. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport*, Nr 67, Warszawa 2009.
30. Stawowy M., Kasprzyk Z.: Identifying and simulation of status of an ICT system using rough sets. In: *Proceedings of the Tenth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX*, given as the monographic publishing series – „Advances in intelligent systems and computing”, Vol. 365. Springer 2015.

ANALIZA PROCESU EKSPLOATACJI POJAZDÓW WYPOSAŻONYCH W TELEMATYCZNE SYSTEMY POKŁADOWE

1. Wprowadzenie

Systemy telematyki transportu integrują informatykę z telekomunikacją w zastosowaniach dla różnych systemów transportowych. Zastosowanie zaawansowanych rozwiązań technicznych oraz nowoczesnych systemów telekomunikacyjnych i informatycznych pozwala na wdrożenie nowoczesnych usług [16, 20], które są wykorzystane w procesie użytkowania i utrzymania środków transportu. Dzięki temu wzrasta efektywność wykorzystania infrastruktury transportowej i środków transportu, a także zwiększa się poziom bezpieczeństwa podróży, pojazdów i obiektów realizujących zadania transportowe [13, 18, 19]. Zastosowanie w obszarze szeroko rozumianego transportu wyspecjalizowanych aplikacji informatycznych, które wykorzystują dane z systemów telematyki transportu, skutkowało wdrożeniem Inteligentnych Systemów Transportowych (ITS – ang. Intelligent Transport System). Są to obecnie najbardziej zaawansowane systemy [27].

Zwiększanie poziomu bezpieczeństwa i terminowości przewozów w ruchu drogowym można uzyskać m.in. poprzez wdrażanie nowoczesnych inteligentnych systemów transportowych [29]. Zastosowane środki transportu drogowego powinny cechować się określonymi wartościami wskaźników niezawodnościowo-eksploatacyjnych [5, 10, 26]. Na niezawodność pojazdów wpływa niezawodność elementów składowych i zastosowane struktury nadmiarowe [2, 4]. Pierwsze rozwiązanie zapobiega uszkodzeniom, zaś drugie prowadzi co prawda do rozbudowy systemu, ale umożliwia tolerowanie występujących uszkodzeń (stany częściowej zdatności). Nadmiarowość może dotyczyć zarówno podzespołów urządzenia, modułów pojazdu, jak też np. komputerów sterujących. Podczas analizy rozwiązań stosowanych w pojazdach istotna jest również jakość informacji, jaką otrzymują systemy z czujników [30]. Na funkcjonowanie pojazdów wpływ mają też drgania [3]. Ważną kwestią jest też prawidłowe zasilanie urządzeń elektronicznych zastosowanych w pojeździe i kompatybilność elektromagnetyczna [23, 28].

Współczesne pojazdy są wyposażone w telematyczne systemy pokładowe, które łączą pomiędzy sobą urządzenia elektroniczne [11]. Przesyłane dane są m.in. wykorzystywane do sterowania układami i urządzeniami. Mają one także określony potencjał eksploatacyjny (np. możliwe jest wykrycie negatywnych zjawisk, takich jak np. dużo podjazdów i zjazdów w terenie górzystym przy niewłaściwym stosowaniu różnych sposobów hamowania, praca

pojazdu w górnym zakresie obrotów silnika przy zbyt małej temperaturze płynu chłodzącego) [7]. Zatem mogą być również wykorzystane do racjonalizacji obsługi technicznej floty pojazdów.

2. Modelowanie procesu eksploatacji środków transportu

Utrzymanie (ang. *maintenance*) można podzielić na utrzymanie profilaktyczne (ang. *preventive maintenance*) i utrzymanie naprawcze (ang. *corrective maintenance*) [15, 22].

Celem utrzymania profilaktycznego jest dokonywanie obsług zapobiegawczych, w wyniku których następuje zmniejszenie prawdopodobieństwa uszkodzenia lub pogorszenia funkcjonowania pojazdu. Utrzymanie profilaktyczne można podzielić na utrzymanie w oparciu o stan (ang. *condition based maintenance*) i utrzymanie okresowe (ang. *predetermined maintenance*).

Utrzymanie w oparciu o stan wymaga monitorowania stanu pojazdu i wykonania jego obsługi w chwili stwierdzenia wystąpienia możliwości utraty stanu zdatności. Utrzymanie okresowe wymaga realizowania obsług profilaktycznych w z góry ustalonych momentach, gdzie okresy pomiędzy kolejnymi obsługami pojazdu są ustalone w wyniku analizy niezawodnościowej lub/i doświadczeń eksploatacyjnych.

Utrzymanie naprawcze przeprowadzane jest po zidentyfikowaniu uszkodzenia pojazdu. Celem działań jest wówczas dokonanie naprawy przywracającej stan zdatności. W utrzymaniu naprawczym można wyróżnić dwa sposoby działania. Pierwszym z nich jest podjęcie działań natychmiastowych (ang. *immediate corrective maintenance*) – wówczas naprawa następuje bezzwłocznie po wykryciu uszkodzenia. Drugim jest działanie odroczone (ang. *deferred corrective maintenance*) – wówczas naprawa następuje z opóźnieniem zgodnym z przyjętymi zasadami postępowania.

Wdrażanie nowoczesnych rozwiązań z obszaru systemów telematyki transportu i inteligentnych systemów transportowych skutkuje znacznym zwiększeniem ilości informacji eksploatacyjnych. Tym samym można je wykorzystać w celu racjonalizacji procesu eksploatacji pojazdów. Zatem można wyróżnić pojęcie „eUtrzymanie” i zdefiniować je jako koncepcję utrzymania pojazdów, w której są one monitorowane i zarządzane z wykorzystaniem środków telematyki transportu. Takie podejście pozwala na bieżącą ocenę degradacji pojazdów i podejmowanie działań przeciwdziałających niekorzystnym zmianom ich stanu technicznego.

Podsumowując, można stwierdzić, iż koncepcja utrzymania zaczęła ewoluować od tradycyjnych praktyk utrzymaniowych typu „uszkodzenie i naprawa” (ang. *fail and fix*), poprzez kolejne rozwiązania proaktywne do takich, które można określić stwierdzeniem „przewidywanie i zapobieganie” (ang. *predict and prevent*) [12].

Ewolucja podejścia w zarządzaniu i eksploatacji pojazdów doprowadziło do powstania systemów PHM (ang. *Prognostics and Health Management/Monitoring*) [1, 14, 21]. Można je określić jako narzędzia prognostyczne do zarządzania potencjałem użytkowym obiektów technicznych, a w szczególności środków transportu (w tym

pojazdów). Stosowanie systemów PHM ma na celu przewidywanie przyszłych zdarzeń eksploatacyjnych środków transportu, ich ocenę potencjału użytkowego i pozostałego okresu użytkowania RUL (ang. *Remaining Useful Life*). W tym celu są wykorzystywane informacje diagnostyczne, które pozwalają określić bieżący stan obiektu. Dzięki temu można również prognozować przyszłe stany eksploatacyjne.

Obecnie wdrażanie rozwiązań z zakresu systemów PHM jest możliwe, ponieważ pojazdy są wyposażone w rozbudowane systemy telematyczne. Dzięki temu uzyskuje się dostęp do danych z wielu czujników stanowiących wyposażenie środków transportu. Informacje te są przesyłane przez nowoczesne systemy transmisji, a następnie analizowane z wykorzystaniem m.in. przetwarzania w chmurze [24], sztucznych sieci neuronowych [8, 9], logiki rozmytej. Systemy PHM najwcześniej zostały wdrożone w transporcie lotniczym, a obecnie znajdują coraz częstsze zastosowania w innych gałęziach transportu (zwłaszcza kolejowego [6, 17, 25]).

3. Modelowanie procesu eksploatacji pojazdów wyposażonych w telematyczne systemy pokładowe

Na rys. 1 przedstawiono model procesu eksploatacji pojazdów wyposażonych w telematyczne systemy pokładowe z uwzględnieniem monitorowania. Obiekt, przebywając w stanie S_1 , jest zdalny i może realizować zadania przewozowe. W stanie tym obiekt jest monitorowany i formułowana jest diagnoza. Diagnoza pozytywna umożliwia kontynuowanie użytkowania pojazdu.

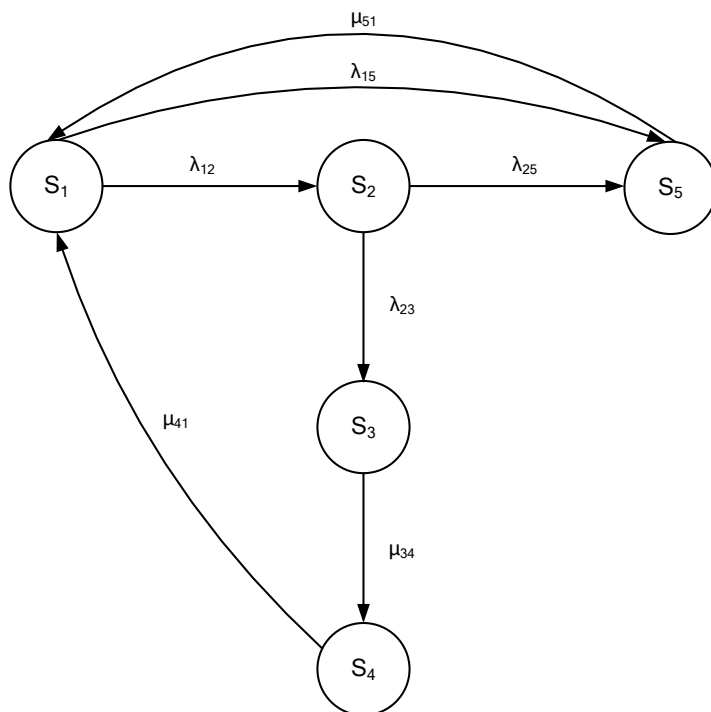
Jeśli obiekt jest w stanie S_1 i wystąpi jego degradacja, to przechodzi z intensywnością λ_{12} do stanu częściowej zdalności S_2 . Następnie z intensywnością λ_{23} przechodzi do stanu diagnozowania S_3 , z którego przechodzi do stanu obsługiwanego S_4 z intensywnością formułowania diagnozy μ_{34} .

Będąc w stanie S_4 , poddawany jest procesowi obsługi, a następnie z intensywnością obsługi profilaktycznej μ_{41} przechodzi do stanu zdalności S_1 .

Możliwe jest też przejście obiektu ze stanu zdalności S_1 do stanu niezdalności S_5 . Sytuacja taka występuje w przypadku zaistnienia uszkodzeń nagłych (katastroficznych) z intensywnością λ_{15} . Tego rodzaju uszkodzenia mogą również wystąpić, gdy obiekt przebywa w stanie S_2 . Wówczas z intensywnością uszkodzeń λ_{25} przechodzi też do stanu S_5 .

Obiekt, przebywając w stanie S_5 , podlega obsłudze korekcyjnej i po dokonaniu naprawy przechodzi z intensywnością μ_{51} do stanu zdalności S_1 . Wówczas może rozpocząć realizację zadania przewozowego.

Cechą charakterystyczną tego modelu jest to, iż obiekt może być użytkowany tylko wtedy, gdy jest w stanie zdalności. W przypadku wystąpienia degradacji i przejścia do stanu częściowej zdalności podlega on obsłudze profilaktycznej przechodząc uprzednio przez stan diagnozowania co umożliwi określenie zakresu koniecznych działań obsługowych.



Rys. 1. Model procesu eksploatacji floty z uwzględnieniem monitorowania. S1 – stan zdatności, S2 – stan częściowej zdatności, S3 – stan diagnozowania, S4 – stan obsługiwanego, S5 – stan niezdatności

Model procesu eksploatacji przedstawiony na rys. 1 może być opisany następującymi równaniami Kołmogorowa-Chapmana:

$$\begin{aligned}
 S_1'(t) &= -\lambda_{15} \cdot S_1(t) + \mu_{51} \cdot S_5(t) - \lambda_{12} \cdot S_1(t) + \mu_{41} \cdot S_4(t) \\
 S_2'(t) &= \lambda_{12} \cdot S_1(t) - \lambda_{25} \cdot S_2(t) - \lambda_{23} \cdot S_2(t) \\
 S_3'(t) &= -\mu_{34} \cdot S_3(t) + \lambda_{23} \cdot S_2(t) \\
 S_4'(t) &= -\mu_{41} \cdot S_4(t) + \mu_{34} \cdot S_3(t) \\
 S_5'(t) &= \lambda_{15} \cdot S_1(t) + \lambda_{25} \cdot S_2(t) - \mu_{51} \cdot S_5(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Przyjmując warunki początkowe:

$$\begin{aligned}
 S_1(0) &= 1 \\
 S_2(0) &= S_3(0) = S_4(0) = S_5(0) = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

i stosując przekształcenie Laplace'a otrzymujemy następujący układ równań:

$$\begin{aligned}
 (s + \lambda_{15} + \lambda_{12}) \cdot S_1^*(s) - \mu_{51} \cdot S_5^*(s) - \mu_{41} \cdot S_4^*(s) &= 1 \\
 (s + \lambda_{25} + \lambda_{23}) \cdot S_2^*(s) - \lambda_{12} \cdot S_1^*(s) &= 0 \\
 (s + \mu_{34}) \cdot S_3^*(s) - \lambda_{23} \cdot S_2^*(s) &= 0 \\
 (s + \mu_{41}) \cdot S_4^*(s) - \mu_{34} \cdot S_3^*(s) &= 0 \\
 (s + \mu_{51}) \cdot S_5^*(s) - \lambda_{15} \cdot S_1^*(s) - \lambda_{25} \cdot S_2^*(s) &= 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

Prawdopodobieństwa przebywania systemu w wyróżnionych stanach funkcjonalnych w ujęciu symbolicznym (Laplace'a) mają postać następującą:

$$\begin{aligned}
 S_1^*(s) &= -\frac{b \cdot c \cdot d \cdot e}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e} \\
 S_2^*(s) &= -\frac{c \cdot d \cdot e \cdot \lambda_{12}}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e} \\
 S_3^*(s) &= -\frac{d \cdot e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23}}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e} \\
 S_4^*(s) &= -\frac{e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{34}}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e} \\
 S_5^*(s) &= -\frac{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25}}{b \cdot c \cdot d \cdot \lambda_{15} \cdot \mu_{51} + c \cdot d \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{25} \cdot \mu_{51} + e \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} \cdot \mu_{34} - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e}
 \end{aligned} \tag{4}$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
 a &= s + \lambda_{15} + \lambda_{12} \\
 b &= s + \lambda_{25} + \lambda_{23} \\
 c &= s + \mu_{34} \\
 d &= s + \mu_{41} \\
 e &= s + \mu_{51}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Rozwiązanie przedstawionego zestawu równań w dziedzinie czasu jest kolejnym etapem analizy i nie jest w niniejszym artykule omawiane.

Przeprowadzając dalszą analizę matematyczną otrzymuje się zależności pozwalające na wyznaczenie prawdopodobieństw przebywania systemu w wyróżnionych stanach.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono autorski graf procesu eksploatacji uwzględniający monitorowanie floty pojazdów. Zastosowanie przedstawionego podejścia przyczyni się do poprawy wartości określonych wskaźników niezawodnościowo-eksploatacyjnych pojazdów.

W dalszych badaniach z tego obszaru autorzy planują wykorzystać dane eksploatacyjne otrzymywane poprzez interfejs telematyczny z pojazdu w celu profilowania taboru. Polegać ono będzie na wyróżnieniu poszczególnych pojazdów lub ich zbiorów ze względu na ich właściwości niezawodnościowo-eksploatacyjne. Umożliwia to specyfikację eksploatacji taboru dającą możliwość racjonalizacji użytkowania i obsługiwan. Zastosowanie takiego podejścia przyczyni się do dalszej poprawy wartości określonych wskaźników niezawodnościowo-eksploatacyjnych floty pojazdów.

5. Literatura

1. Atamuradov V., Medjaher K., Dersin P., Lamoureux B., Zerhouni N.: Prognostics and Health Management for Maintenance Practitioners - Review, Implementation and Tools Evaluation. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 8 (31), 2017.
2. Będkowski L., Dąbrowski T.: *Podstawy eksploatacji, cz. II Podstawy niezawodności eksploatacyjnej*. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2006.
3. Burdzik R., Konieczny Ł., Figlus T.: Concept of on-board comfort vibration monitoring system for vehicles. In: the monograph *Activities of Transport Telematics, TST 2013*, J. Mikulski (Ed.), Vol. 395, Springer, Heidelberg 2013.
4. Caban D., Walkowiak T.: Dependability analysis of hierarchically composed system-of-systems. In: *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX*, Zamojski W., Mazurkiewicz J., Sugier J., Walkowiak T., Kacprzyk J. (eds.). Springer 2019.
5. Chrzan M., Kornaszewski M., Ciszewski T.: Renovation of marine telematics objects in the process of exploitation. In: *Management Perspective for Transport Telematics, TST 2018, Communications in Computer and Information Science*, J. Mikulski (Ed.), Vol. 897. Springer, Cham 2018.
6. Chudzikiewicz A., Bogacz R., Kostrzewski M., Konowrocki R.: Condition monitoring of railway track systems by using acceleration signals on wheelset axle-boxes. *Transport*, 33(2), 2018.

7. Dąbrowski T.: Diagnostowanie systemów antropotechnicznych w ujęciu potencjałowo-efektowym. Wyd. WAT, Warszawa 2001.
8. Duer S., Duer R., Mazuru S.: Determination of the expert knowledge base on the basis of a functional and diagnostic analysis of a technical object. Romanian Association of Nonconventional Technologies, Romanian, June 2016, 6/2016, Vol. XX, No 2.
9. Duer S., Zajkowski K., Płocha I., Duer R.: Training of an artificial neural network in the diagnostic system of a technical object. Neural Computing & Applications, Vol. 22, No. 7, 2013.
10. Dyduch J., Paś J., Rosiński A.: Podstawy eksploatacji transportowych systemów elektronicznych. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2011.
11. Frei M.: Samochodowe magistrale danych w praktyce warsztatowej. WKŁ, Warszawa 2016.
12. Galar D., Wandt K., Karim R., Berges L.: The evolution from e(lectronic) Maintenance to i(ntelligent) Maintenance. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 54(8), 2012.
13. Janusova L., Cicmancova S.: Improving safety of transportation by using intelligent transportation systems. 9th International Scientific Conference Transbaltica 2015, Procedia Engineering 134, 2016.
14. Jia X., Huang B., Feng J., Cai H., Lee J.: A review of PHM Data Competitions from 2008 to 2017: Methodologies and Analytics. Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2018, Philadelphia, USA, 2018.
15. Jodejko-Pietruczuk A, Werbińska-Wojciechowska S.: Analysis of maintenance models' parameters estimation for technical systems with delay time. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, Vol. 16, No. 2, 2014.
16. Kasprzyk Z., Rychlicki M.: Analysis of physical layer model of WLAN 802.11g data transmission protocol in wireless networks used by telematic systems. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 286. Springer International Publishing 2014.
17. Kour R., Karim R., Tretten P.: eMaintenance solutions for railway maintenance decisions. In: Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. 1, London, UK, 2014.
18. Lewiński A., Perzyński T., Toruń A.: The analysis of open transmission standards in railway control and management. Telematics in the Transport Environment. TST 2012. Communications in Computer and Information Science, Vol. 329, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2012.
19. Losurdo F., Dileo I., Siergiejczyk M., Krzykowska K., Krzykowski M.: Innovation in the ICT infrastructure as a key factor in enhancing road safety: a multi-sectoral approach. Proceedings 25th International Conference on Systems Engineering ICSEng 2017, eds.: H. Selvaraj, G. Chmaj, D. Zydek, IEEE Computer Society Conference Publishing Services (CPS), Las Vegas, Nevada, USA, 2017.

20. Lubkowski P., Laskowski D.: Selected issues of reliable identification of object in transport systems using video monitoring services. In: „Communication in Computer and Information Science”, J. Mikulski (Ed.), Vol. 471, Springer, Berlin Heidelberg 2015.
21. Mesgarpour M., Landa-Silva D., Dickinson I.: Overview of telematics-based prognostics and health management systems for commercial vehicles. In: Communications in Computer and Information Science, vol. 395, Activities of Transport Telematics, TST 2013, J. Mikulski (Ed.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013.
22. Nowakowski T., Tubis A., Werblińska-Wojciechowska S.: Evolution of technical maintenance approaches – review and a case study. Intelligent Systems in Production and Maintenance, ISPEM 2018, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 835, Springer, Cham 2019.
23. Paś J.: Eksploatacja elektronicznych systemów transportowych. Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Radom 2015.
24. Reddig K., Dikunow B., Krzykowska K.: Proposal of big data route selection methods for autonomous vehicles. Internet Technology Letters, 1(36), 2018.
25. Restel F.J.: The Markov reliability and safety model of the railway transportation system. Safety and Reliability: Methodology and Applications - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2014.
26. Rosiński A.: Modelowanie procesu eksploatacji systemów telematiki transportu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.
27. Siergiejczyk M., Krzykowska K., Rosiński A., Grieco L.A.: Reliability and viewpoints of selected ITS system. Proceedings 25th International Conference on Systems Engineering ICSEng 2017, eds.: H. Selvaraj, G. Chmaj, D. Zydek, IEEE Computer Society Conference Publishing Services (CPS), Las Vegas, Nevada, USA, 2017.
28. Siergiejczyk M., Paś J., Rosiński A.: Modeling of process of maintenance of transport systems telematics with regard to electromagnetic interferences. In: Tools of Transport Telematics, Mikulski J. (ed.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2015.
29. Siergiejczyk M.: Efektywność eksploatacyjna systemów telematiki transportu. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport, Nr 67, Warszawa 2009.
30. Stawowy M., Kasprzyk Z.: Identifying and simulation of status of an ICT system using rough sets. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, given as the monographic publishing series – „Advances in intelligent systems and computing”, Vol. 365. Springer 2015.

