

Jarosław SMOCZEK¹
Janusz SZPYTKO²

ZASTOSOWANIE LOGIKI ROZMYTEJ DO WYZNACZANIA GOTOWOŚCI ZAUTOMATYZOWANEGO SYSTEMU TRANSPORTU BLISKIEGO

Od zautomatyzowanych środków transportu bliskiego oczekuje się coraz wyższej gotowości do wykonania zadań transportowych. Wiąże się to z coraz wyższymi wymaganiami dotyczącymi niezawodności i obsługiwalności, a zarazem jakości działania podsystemów urządzenia transportowego, w tym podsystemu sterowania. W artykule zaproponowana została metoda oceny gotowości zautomatyzowanego systemu transportowego z zastosowaniem heurystycznych wskaźników wag będących funkcją wymagań stawianych systemowi i jego elementom. Przedstawiono przykład zastosowania logiki rozmytej do estymacji gotowości urządzenia transportowego, suwnicy pomostowej.

FUZZY LOGIC APPROACH TO ESTIMATING AVAILABILITY OF AUTOMATED MATERIAL HANDLING SYSTEM

In automated manufacturing processes, where transportation operations are realized by cranes, the safety, precise and fast transfer of materials is more and more frequently required to raise efficiency and productivity of manufacturing process. The attention in the paper is focused on an availability of automated material handling device, which refers to capability of a device to realize transportation operations with expected quality. The method of availability estimation, proposed in the paper, was based on fuzzy logic, and illustrated by example regarding to the overhead traveling crane system.

1. WSTĘP

Skuteczność, sprawność, niezawodność i bezpieczeństwo są ważnymi wskaźnikami eksploatacyjnymi urządzeń i systemów transportu bliskiego, przed którymi stawiane są coraz większe wymagania w zautomatyzowanych procesach produkcyjnych. Od urządzeń transportowych oczekuje się zachowania wysokiego wskaźnika gotowości, będącego głównym elementem skuteczności działania E_d . Gotowość systemu definiowana jest jako

¹Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, tel. +48 12 617-31-04, e-mail: smoczek@agh.edu.pl

²Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, tel. +48 12 617-31-03, e-mail: szpytko@agh.edu.pl

prawdopodobieństwo, że system w dowolnym losowym czasie, będzie zdolny zrealizować ustalony zbiór zadań w sposób poprawny, przez co należy rozumieć spełnienie przez system określonych wymagań. Współczynnik gotowości związany jest z czasem pracy i przestojów systemu, najczęściej wyrażanych jako średni czas pomiędzy uszkodzeniami (*MTBF* – Mean Time Between Failure), średni czas naprawy (*MTTR* – Mean Time To Repair), średni czas pomiędzy obsługami (*MTBM* – Mean Time Between Maintenance), średni czas obsługi (*MDT* – Mean Down-Time), aktywny czas obsługi ($\bar{M}$) [1, 4, 6, 9, 10]. Gotowość właściwa (A_i - ingent availability), przy rozpatrywaniu której brane są pod uwagę jedynie działania naprawcze, z pominięciem działań prewencyjnych, wyrażona jest formułą [1]:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

Gotowość osiągnięta (A_a - achieved availability) odnosząca się do działań obsługowych (działania naprawcze i prewencyjne), ale pomijająca opóźnienia logistyczne i administracyjne jest wyrażona wzorem [1]:

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} \quad (2)$$

W przypadku gdy rozważany jest całkowity czas działań korygujących, zapobiegawczych, logistycznych i organizacyjnych (*down-time*), w literaturze przyjęto sformułowanie gotowości operacyjnej (A_o - operational availability) [1]:

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (3)$$

Rozpatrując gotowość systemu (A_s), złożonego z n elementów o znanych współczynnikach gotowości, o szeregowej strukturze niezawodnościowej (stan sprawności występuje tylko i wyłącznie w przypadku sprawności wszystkich elementów systemu) (4) lub równoległej (rezerwowanie) (5), wszystkie elementy spełniają równorzędną funkcję w systemie, w tym samym stopniu wpływając na jakość realizowanych zadań.

$$A_s = \prod_{i=1}^n A_i \quad (4)$$

$$A_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) \quad (5)$$

W ujęciu klasycznym gotowość jest więc kryterium sprawności systemu do naprawy odnoszącym się do danych zebranych przez użytkowników w procesie eksploatacyjnym

systemu (czasów pracy i przestojów). Brak uwzględnienia przy estymacji tego parametru niepewności zebranych danych, a także oczekiwanego poziomu jakości i sprawności działania poszczególnych elementów systemu w celu realizacji, czasem zróżnicowanych zadań wymagających różnej skuteczności działania od poszczególnych podsystemów, prowadzi do niepewności otrzymanego wyniku. Zastosowanie inteligentnych metod obliczeniowych, w szczególności metod heurystycznych czy metaheurystycznych opartych na wiedzy o rozpatrywanym obiekcie może poprawić proces estymacji wskaźników eksploatacji obiektu czy systemu, czy też wspomóc proces ich optymalizacji już na poziomie projektowania struktury systemu [7, 8]. Przykładem jest zastosowanie między innymi algorytmów genetycznych w problemie optymalizacji wskaźników niezawodności i gotowości systemów szeregowo-równoległych [2, 3, 5].

W artykule podjęto próbę zastosowania do oceny wskaźnika gotowości metod heurystycznych opartych na wiedzy użytkownika systemu o jakości działania poszczególnych elementów systemu będących funkcją wymagań sformułowanych na podstawie zadań realizowanych przez system. Zaproponowany został algorytm estymacji wartości współczynnika gotowości systemu oparty na rozmytym modelu wnioskowania. Przedstawiony został także przykład rozmytego modelu gotowości suwnicy pomostowej wykonującej zautomatyzowane zadania transportowe

2. ROZMYTY MODEL GOTOWOŚCI SYSTEMU

W poniższych rozważaniach przyjęto założenie, że gotowość systemu jest nie tylko funkcją gotowości poszczególnych elementów tego systemu, ale także funkcją wymagań stawianych systemowi, na podstawie których możliwa jest ocena wskaźnika wymaganej sprawności i skuteczności działania danego elementu do zrealizowania określonych zadań. Przyjęto, że dla zbioru wymagań $\mathbf{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, których spełnienie determinuje poprawność wykonania przez system zbioru zadań $\mathbf{Z}$, można określić dla każdego z elementów systemu wskaźnik $h_i \in \langle 0, 1 \rangle$ będący współczynnikiem wagi danego elementu w systemie, odnoszącym się do stopnia sprawności i skuteczności działania wymaganej w celu zrealizowania przez system postawionych zadań.

$$A_s = f(\mathbf{A}, \mathbf{H}) \quad (6)$$

gdzie:

$$\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\},$$

$$\mathbf{H} = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}.$$

Dla przyjętych założeń, gotowość systemu o strukturze szeregowej złożonej z n elementów o znanej gotowości można przedstawić w postaci iloczynu gotowości poszczególnych elementów systemu podniesionych do potęgi równej współczynnikowi wagowemu h_i danego elementu:

$$A_s = \prod_{i=1}^n (A_i^{h_i}) \quad \forall h_i \in \langle 0,1 \rangle \quad (7)$$

W przypadku gotowości systemu o strukturze równoległej wskaźnik ten można przedstawić zależnością:

$$A_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i^{h_i}) \quad \forall h_i \in \langle 0,1 \rangle \quad (8)$$

Zbiór wymagań może być sformułowany w sposób nieostry, jak również w sposób rozmyty może być sformułowana relacja pomiędzy stawianymi przed systemem i jego komponentami oczekiwaniami, a prawdopodobieństwem, że zostaną one spełnione. Ocena (współczynnik wagowy h_i), że dany element systemu spełni stawiane przed systemem wymagania przy określonym poziomie sprawności, może być realizowana na podstawie wiedzy heurystycznej o systemie oraz danych zebranych z monitoringu procesu eksploatacyjnego systemu. Model gotowości systemu można więc przedstawić w postaci systemu wnioskowania rozmytego, w którym wiedza o strukturze niezawodnościowej systemu ujęta jest w postaci rozmytych implikacji jeżeli-to, przedstawiających zależność pomiędzy sformułowanymi w sposób nieostro (rozmyty) wymaganiami odnośnie zadań realizowanych przez system transportowy, a gotowością systemu i jego elementów do zrealizowania tych zadań sformułowaną w postaci następnika funkcyjnego zależnego od struktury systemu, w przypadku szeregowej (7), lub równoległej (8).

Jeżeli c_1 jest $LM(c_1)$ i c_2 jest $LM(c_2)$ i ... c_m jest $LM(c_m)$ To $A_{sk} = f_k(\mathbf{A}, \mathbf{H})$ (9)

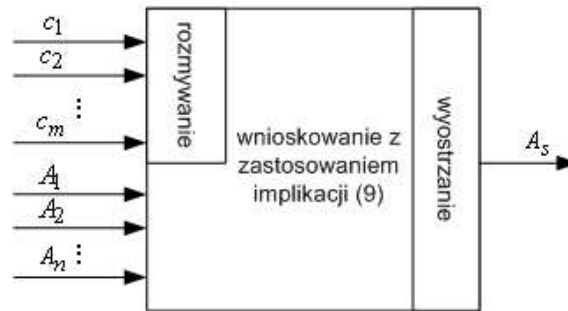
gdzie:

$c_1, c_2, \dots, c_m \in \mathbf{C}$ - zbiór wymagań stawianych dla systemu odnośnie realizowanych przez niego zadań,
 $LM(c_j)$ - zbiór rozmyty, do którego stopień przynależności zmiennej c_j określony jest poprzez funkcję przynależności.

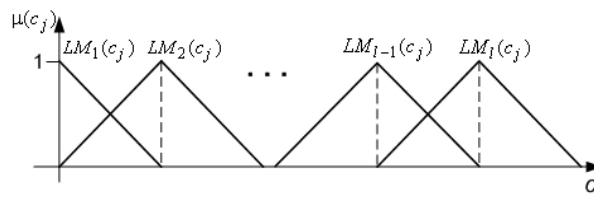
W strukturze rozmytego modelu gotowości (rys. 1) można wyróżnić proces rozmywania zmiennych wejściowych należących do zbioru $\mathbf{C}$, wnioskowania realizowanego na podstawie implikacji (9) wyrażających relacje pomiędzy zmiennymi wejściowymi i gotowością systemu, oraz wyostrzania prowadzącego do obliczenia zmiennej wyjściowej A_s .

Kształt i rozkład funkcji przynależności zastosowanych w procesie rozmywania, jak również struktura bazy wiedzy złożonej z rozmytych implikacji zależne są od wiedzy o rozpatrywanym systemie. Na rysunku 2 przedstawiono przykład rozmywania zmiennych wejściowych modelu rozmytego z zastosowaniem trójkątnych funkcji przynależności

określających stopień przynależności $\mu(c_j)$ zmiennej wejściowej do danego zbioru rozmytego $LM(c_j)$.



Rys. 1. Rozmyty model gotowości systemu



Rys.2. Przykład rozmywania zbioru zmiennych wejściowych C z zastosowaniem trójkątnych funkcji przynależności

Waga reguły, oznaczona jako w_k , obliczana może być jako iloczyn współczynników przynależności zmiennej wejściowej c_j do zbiorów rozmytych poprzednika implikacji (9).

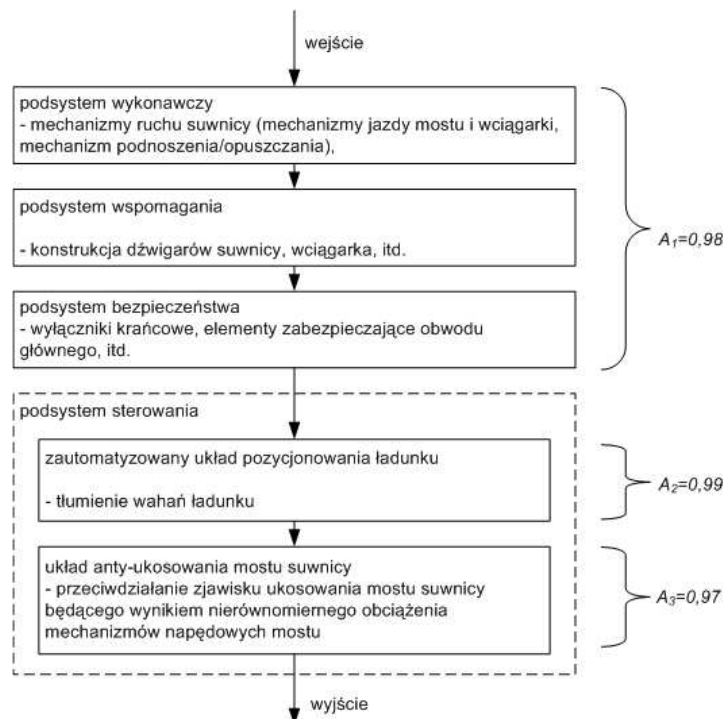
$$w_k = \prod_{j=1}^m \mu_j(c_j) \quad (10)$$

Wartość wyjściowa modelu A_s obliczana jest w postaci średniej ważonej wartości otrzymanych z N implikacji rozmytych:

$$A_s = \frac{\sum_{k=1}^N A_{sk} \cdot w_k}{\sum_{k=1}^N w_k} \quad (11)$$

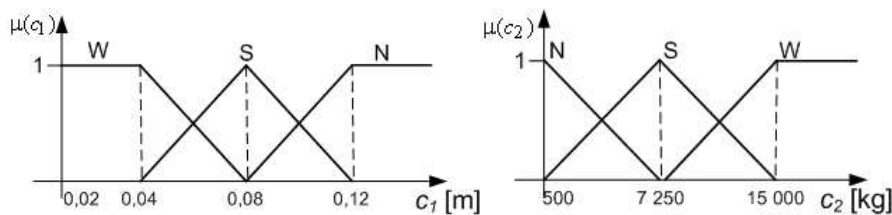
3. PRZYKŁAD MODELU GOTOWOŚCI ŚRODKA TRANSPORTU BLISKIEGO

Gotowość zautomatyzowanego systemu transportu bliskiego rozpatrywana jest w poniższym przykładzie jako prawdopodobieństwo spełnienia przez urządzenia transportowe wymagań odnośnie jakości realizowanych zadań transportowych, jak również bezpieczeństwa otoczenia i samego urządzenia oraz jakości eksploatacji środka transportowego. Jako obiekt rozważań w poniższym przykładzie przyjęto suwnice pomostową o udźwigu $Q=15\,000$ [kg] i rozpiętości dźwigarów mostu $L=16$ [m], pracującą w zautomatyzowanym systemie transportu bliskiego. Urządzenie transportowe zostało potraktowane jako system szeregowy, złożony z podsystemów realizujących funkcje wykonawcze, wspomagania i bezpieczeństwa, oraz z podsystemu sterowania, w którym można wyróżnić zautomatyzowany układ pozycjonowania ładunku, realizujący zadania tłumienia wahań ładunku powstających w stanach nieustalonych pracy mechanizmów ruchu suwnicy, oraz układ przeciwdziałający ukosowaniu mostu suwnicy, pojawiającego się przy nierównomiernym obciążeniu mechanizmów napędowych mostu, co niekorzystnie wpływa na eksploatację elementów układu koło-szyna (rys. 3). Gotowość podsystemów wykonawczego, wspomagania i bezpieczeństwa wyrażona jest wartością $A_1 = 0,98$, natomiast dla układów podsystemu sterowania wynosi, dla układu pozycjonowania $A_2 = 0,99$ i układu anty-ukosowania $A_3 = 0,97$.



Rys. 3. Przykład dekompozycji systemu transportowego (suwnica pomostowa)

Wymagania odnośnie jakości działania systemu/urządzenia zostały zdefiniowane w sposób rozmyty, poprzez zbiory rozmyte, dla których sformułowano terminy lingwistyczne *Niski*, *Średni*, *Wysoki* (rys. 4), w postaci wymagań dotyczących dokładności pozycjonowania ładunku $c_1 = f(e_{xyz})$ (gdzie e_{xyz} - tolerancja uchybu statycznego pozycji ładunku względem osi przyjętego układu odniesienia *OXYZ*), oraz wymaganej skuteczności działania układu anty-ukosowania, zdeterminowanej poziomem zagrożenia ukosowaniem mostu suwnicy, wyrażonego funkcją masy przemieszczanych ładunków $c_2 = f(m)$.



Rys. 4. Funkcje przynależności (*N* - *Niski*, *S* - *Średni*, *W* - *Wysoki*) zdefiniowane dla zmiennych c_1 i c_2

Przedstawiony rozmyty model gotowości urządzenia transportowego jest zbiorem dziewięciu modeli o strukturze szeregowej złożonej z podsystemów o znanej gotowości A_1 , A_2 i A_3 . Wymagania stawiane tym podsystemom, zdefiniowane w sposób rozmyty jako zmienne c_1 i c_2 , odnoszą się do stopnia wymaganej skuteczności zautomatyzowanych operacji wykonywanych przez układy sterowania. Współczynnik gotowości systemu jest więc wyrażony zakresem $A_s = \langle A_{s9}, A_{s1} \rangle = \langle 0,98, 0,9411 \rangle$ zależnym od poziomu wymagań stawianych urządzeniu transportowemu (Tabela 1).

Baza wiedzy rozmytego modelu gotowości systemu złożona jest z dziewięciu implikacji, w których następniki wyrażone zostały funkcją (7):

Jeżeli c_1 jest {*Niski*, *Średni*, *Wysoki*} i c_2 jest {*Niski*, *Średni*, *Wysoki*}

$$\text{To } A_{sk} = \prod_{i=1}^n A_i^{h_{ik}} \quad (12)$$

gdzie:

$$k = 1, 2, \dots, 9$$

W tabeli 1 przedstawione zostały przyjęte na podstawie wymagań c_1 i c_2 współczynniki wagowe wyrażające stopień wymaganej skuteczności działania i sprawności podsystemów w celu realizacji przez urządzenie zadań określonymi wymaganiami c_1 i c_2 , oraz wartości gotowości systemu A_{sk} obliczone na podstawie (12) dla przyjętych wag (13).

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} h_{1k} \\ h_{2k} \\ h_{3k} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Tabela 1. Przedstawienie bazy reguł rozmytego modelu gotowości urządzenia transportowego – suwnicy pomostowej

		c_1 (wymagany poziom dokładności realizowanych zadań transportowych)		
		Niski	Średni	Wysoki
c_2 (poziom zagrożenia ukosowaniem mostu suwnicy)	Niski	$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $A_{s1} = 0,98$	$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,5 \\ 0 \end{bmatrix}$, $A_{s2} = 0,9751$	$\mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $A_{s3} = 0,9702$
	Średni	$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0,5 \end{bmatrix}$, $A_{s4} = 0,9652$	$\mathbf{H}_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,5 \\ 0,5 \end{bmatrix}$, $A_{s5} = 0,9603$	$\mathbf{H}_6 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0,5 \end{bmatrix}$, $A_{s6} = 0,9555$
	Wysoki	$\mathbf{H}_7 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $A_{s7} = 0,9506$	$\mathbf{H}_8 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,5 \\ 1 \end{bmatrix}$, $A_{s8} = 0,9458$	$\mathbf{H}_9 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$, $A_{s9} = 0,9411$

Rozpatrując przykład zbioru operacji transportowych wykonywanych przez suwnice, dla których wymagania zostały sformułowane w postaci wymaganej dokładności pozycjonowania $c_1 = 0,04[m]$ i stopnia zagrożenia ukosowaniem mostu suwnicy wyrażonym wartością średniej masy przemieszczanych ładunków $c_2 = 3875[kg]$, stopień przynależności zmiennych c_1 i c_2 do zbiorów *średni* i *wysoki* rozpatrywanego rozmytego modelu gotowości wynosi $\mu_{S(e_1)} = \mu_{W(e_1)} = \mu_{S(e_2)} = \mu_{W(e_2)} = 0,5$. Dla znanej gotowości poszczególnych podsystemów i układów (rys. 3) gotowość systemu jest średnią ważoną gotowości wynikającej z czterech reguł A_{s5} , A_{s6} , A_{s8} i A_{s9} (Tabela 1), których wagi (10) wynoszą $w_5 = w_6 = w_8 = w_9 = 0,25$. Zgodnie więc z wyrażeniem (7) całkowita gotowość urządzenia do wykonania określonych przez zmienne c_1 i c_2 zadań wynosi:

$$A_s(c_1 = 0,04[m], c_2 = 3875[kg]) = 0,9507$$

4. WNIOSKI

W klasycznej ocenie jakości eksploatacji systemu, gotowość rozumiana jest jako kryterium sprawności systemu do przywrócenia jego zdolności do wykonania swoich funkcji. Parametr ten, odnoszący się jedynie do czasów i intensywności przestojów, wyznaczany jest (w szczególności dla struktury szeregowej) z tą samą wagą dla wszystkich elementów składowych systemu.

Przedmiotem rozważań w artykule jest system realizujący zadania, od których oczekuje się różnego poziomu jakości i sprawności działania elementów tego systemu w celu ich poprawnego wykonania. Prawdopodobieństwo przystąpienia przez elementy systemu do poprawnego wykonania określonych przez użytkownika zadań może być więc funkcją, nie tylko gotowości poszczególnych elementów systemu, ale też poziomu wymagań odnośnie ich jakości i sprawności działania. Wynikiem tak zdefiniowanej heurystycznej funkcji może być wskaźnik wagowy danego elementu systemu określający poziom wymaganej gotowości. Przykładem złożonej struktury modelu gotowości może być system transportu wykonujący zadania o zróżnicowanym poziomie wymagań stawianych podsystemom i układom sterowania. Wymagana jakość działania tych układów zdeterminowana jest poziomem zautomatyzowania, oczekiwanej dokładności i czasu realizowanych zadań transportowych. Model gotowości zautomatyzowanego systemu transportowego wyrażony być może w postaci rozmytego algorytmu, w którym struktura modelu systemu sformułowana jest w postaci zależności jeżeli-to, a gotowość systemu zdefiniowana jest w postaci zakresu wartości, uwzględniającego niepewność wiedzy o systemie.

Podziękowanie

Praca badawcza sfinansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2008-2011

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Blanchard B.S.: *System engineering management*. 4th edition, John Wiley & Sons, USA, 2008
- [2] Coit D.W., Smith A.E.: *Reliability optimization of series-parallel systems using a genetic algorithm*. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 45, No. 2, 1996, pp. 254-266.
- [3] Hamersma B., Chodos, M. S.: *Availability and maintenance considerations in telecommunication network design and the use of simulation*. Proceedings of AFRICON 1992 Conference, pp. 267–270.
- [4] Ireson W.G., Coombs Jr. C.F., Moss R.Y.: *Handbook of reliability engineering and management*. 2nd edition, McGraw-Hill, 1996.
- [5] Juang Y.S., Lin S.S., Kao H.P.: *A knowledge management system for series-parallel availability optimization and design*. Expert Systems with Applications, No. 34, 2008, pp. 181-193.
- [6] Kececioglu D.: *Maintainability, Availability, & Operational Readiness Engineering*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 1995.
- [7] Szpytko J.: *Integrated decision making supporting the exploitation and control of transport devices*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.

- [8] Szpytko J.: *Kształtowanie procesu eksploatacji środków transportu bliskiego*. Seria wydawnicza: Biblioteka Problemów Eksploatacji. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Kraków-Radom 2004.
- [9] Szpytko J., Kocerba A.: *Wybrane aspekty bezpieczeństwa i niezawodności rozproszonych środków transportu*. Seria wydawnicza: Biblioteka Problemów Eksploatacji. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Kraków-Radom, 2008.
- [10] Wang W., Kececioglu D.B.: *Confidence limits on the availability of equipment*. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000, pp. 162-168.