

Maciej WOROPAY  
Piotr BOJAR  
Łukasz MUŚLEWSKI

### **ANALIZA WPLYWU USZKODZEŃ WYBRANEGO PODSYSTEMU ŚRODKA TRANSPORTU NA NIEZAWODNOŚĆ I BEZPIECZEŃSTWO REALIZACJI ZADANIA PRZEWOZOWEGO**

*Transport miejski jest szczególnym rodzajem drogowego transportu zbiorowego, obejmuje on również tereny podmiejskie, znajdujące się poza granicami administracyjnymi miasta, lecz spełniające analogiczne funkcje jak dzielnice miasta. Najpopularniejszą komunikacją w transporcie miejskim jest komunikacja autobusowa, w której do przewozów pasażerów wykorzystuje się istniejącą infrastrukturę drogową, bez konieczności budowania dodatkowych trakcji.*

*Pomimo zalet charakteryzujących komunikację autobusową jest ona źródłem różnego rodzaju zagrożeń, wynikających z oddziaływania czynników wymuszających (robotycznych, zewnętrznych i antropotechnicznych). W pracy podjęto próbę oceny wpływu oddziaływania czynników robotycznych na niezawodność i bezpieczeństwo realizowanych zadań przewozowych.*

### **ANALYSIS OF INFLUENCE OF DAMAGE TO A CHOSEN SUBSYSTEM OF TRANSPORT MEANS ON RELIABILITY AND SAFETY OF TRANSPORT TASK ACCOMPLISHMENT**

*Municipal transport is a kind of public road transport which also covers suburban areas lying outside the city administrative borders but performing functions the same as those performed by the city quarters. The most popular kind of municipal transport is bus transport which takes advantage of the existing road infrastructure without having to build new routes.*

*Although bus transport has many advantages it also poses many different threats resulting from existence of outside factors (operational, external and anthropotechnical). In this work there has been made an attempt to assess the influence of operational factors on safety of transport tasks accomplishment.*

## **1. WPROWADZENIE**

Zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa w systemie osobowego transportu miejskiego, stanowiącego ogół środków i działań związanych z przemieszczaniem się osób,

jest problemem nadrzędnym. Problem ten wynika z dużej liczby osób przewożonych środkami transportu, dużego natężenia ruchu oraz niewłaściwej infrastruktury dróg po których realizowane są zadania przewozowe.

Szczególnie dotyczy to autobusów, eksploatowanych w rozpatrywanym systemie, ponieważ narażone są one na oddziaływania różnorodnych czynników wymuszających powodujących niekorzystne zmiany ich stanów, których efektem są uszkodzenia autobusów.

*Z tego powodu w pracy podjęto próbę oceny wpływu uszkodzeń autobusów na powstawanie zdarzeń drogowych. Bezpieczeństwo działania systemu transportowego jest to jego stan w którym wartości wyróżnionych cech, opisujących ten system w ustalonej chwili czasu  $t$ ,  $t \in \langle t_0; t_k \rangle$  mieszczą się w ustalonych granicach przy określonych poziomach oddziaływań czynników wymuszających*

*Oddziaływania czynników wymuszających (roboczych, zewnętrznych, antropotechnicznych) są zjawiskami losowymi i mogą występować pojedynczo lub łącznie.*

## 2. OBIEKT I PRZEDMIOT BADAŃ

Obiektem badań jest system komunikacji miejskiej, a w szczególności autobusy eksploatowane w tym systemie. Przedmiotem badań są relacje zachodzące pomiędzy stanami ograniczonej zdatności autobusów, a bezpieczeństwem działania systemu komunikacji miejskiej.

## 3. CEL PRACY

Ze względu na wysoki udział procentowy stanu ograniczonej zdatności autobusów w zbiorze stanów niepożądanych jako cel pracy przyjęto *opracowanie metody umożliwiającej ocenę wpływu uszkodzeń obiektów technicznych eksploatowanych w systemie transportowym na bezpieczeństwo tego systemu.*

Stanowi to punkt wyjścia do podjęcia racjonalnych działań zwiększających bezpieczeństwo działania systemów transportowych.

## 4. PROGRAM BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

Na podstawie celu pracy zaprojektowano program badań eksploatacyjnych, które zrealizowano w rzeczywistym systemie transportowym – Zakładzie Komunikacji Autobusowej w dużej aglomeracji miejskiej.

Program badań eksploatacyjnych obejmował następujące etapy realizacji eksperymentu:

- pozyskanie danych dotyczących przebiegów kilometrowych autobusów realizujących zadania przewozowe w analizowanym przedziale czasu,
- ustalenie liczby uszkodzeń podsystemów autobusów,
- pozyskanie danych dotyczących liczby kolizji i wypadków drogowych zaistniałych na skutek stanu ograniczonej zdatności autobusów w analizowanym przedziale czasu,
- pozyskanie danych dotyczących liczby osób zabitych i rannych w wyniku zaistniałych zdarzeń niepożądanych w analizowanym przedziale czasu.

Szczegółowy program i wyniki badań eksploatacyjnych zaprezentowano w pracy [8].

## 5. BUDOWA MODELU OCENY BEZPIECZEŃSTWA DZIAŁANIA ŚRODKÓW TRANSPORTU MIEJSKIEGO NA PODSTAWIE ANALIZY ICH USZKODZEŃ

W pracy dokonano analizy zależności oraz przydatności (do oceny bezpieczeństwa działania środków transportu), wskaźników opisanych w modelu wstępnym, na tej podstawie uzyskano podzbiór wskaźników ocenowych. Następnie na podstawie wyników zrealizowanych badań eksploatacyjnych wybrano ostatecznie zbiór wskaźników reprezentacyjnych stanowiących model wynikowy oceny bezpieczeństwa działania środków transportu.

$$W_R = \{W_{1-8.1}, W_{1-8.2}, W_{1-9.1}, W_{1-9.2}, W_{1-10}, W_{1-11}, W_{1-13}\} \quad (1)$$

1 Liczba osób zabitych przypadająca na 10 wypadków drogowych wynikających ze stanu ograniczonej zdatności środka transportu.

$$W_{1-8.1} = \frac{LO_1}{LZ_1} \cdot 10 \quad (2)$$

$LO_1$  – liczba osób zabitych w wyniku zaistniałych wypadków drogowych

$LZ_1$  – liczba wypadków drogowych

2 Liczba osób rannych przypadająca na 10 wypadków drogowych wynikających ze stanu ograniczonej zdatności środka transportu.

$$W_{1-8.2} = \frac{LO_2}{LZ_1} \cdot 10 \quad (3)$$

$LO_2$  – liczba osób rannych w wyniku zaistniałych wypadków drogowych

$LZ_1$  – liczba wypadków drogowych

3 Liczba wypadków drogowych wynikających ze stanu ograniczonej zdatności środka transportu, przypadająca na 10000 przejechanych kilometrów.

$$W_{1-9.1} = \frac{LZ_1}{LP} \cdot 10^4 \quad (4)$$

$LZ_1$  – liczba wypadków drogowych

$LP$  – liczba przejechanych kilometrów przez badany autobus

4 Liczba kolizji drogowych wynikających ze stanu ograniczonej zdatności środka transportu, przypadająca na 10000 przejechanych kilometrów.

$$W_{1-9.2} = \frac{LZ_2}{LP} \cdot 10^4 \quad (5)$$

$LZ_2$  – liczba kolizji drogowych

$LP$  – liczba przejechanych kilometrów przez badany autobus

- 5 Liczba uszkodzeń podsystemów istotnych przypadająca na 10000 przejechanych kilometrów.

$$W_{1-10} = \frac{LU_{PI}}{LP} \cdot 10^4 \quad (6)$$

$LU_{PI}$  – liczba uszkodzeń podsystemów istotnych autobusu

$LP$  – liczba przejechanych kilometrów w analizowanym przedziale czasu

- 6 Liczba wypadków drogowych wynikających ze stanu ograniczonej zdatości środka transportu, przypadająca na 100 uszkodzeń podsystemów istotnych

$$W_{1-11} = \frac{LZ_1}{LU_{PI}} \cdot 100 \quad (7)$$

$LZ_1$  – liczba zdarzeń drogowych i-tego rodzaju

$LU_{PI}$  – liczba uszkodzeń k-tego podsystemu OT

- 7 Wskaźnik oceny poziomu zagrożenia bezpieczeństwa ludzi usytuowanych w środku transportu.

$$W_{1-13} = \frac{LU_Z}{LZ} \cdot O \quad (8)$$

$O$  – ocena zagrożenia jakie stwarza uszkodzenie analizowanego podsystemu autobusu (1÷10);

gdzie:

1 - oznacza podsystem nieistotny którego uszkodzenie nie stwarza zagrożenia bezpieczeństwa działania autobusu

10 - oznacza podsystem istotny którego uszkodzenia powoduje niepożądany stan zagrożenia bezpieczeństwa działania autobusu i stanowi przyczynę wypadku drogowego

$LU_Z$  – liczba uszkodzeń i – tego podsystemu inicjujących zdarzenia niepożądane

$LZ$  – liczba wszystkich zdarzeń niepożądanych

W opracowanym modelu wynikowym, pożądaną wartością każdego z przyjętych do oceny wskaźników jest ich wartość minimalna. Stopień niespełnienia stanu bezpieczeństwa z punktu widzenia i-tego wskaźnika opisano zależnością (9).

$$v_i = \log_2 \left( \frac{P_{iv} - P_{i \min}}{P_{i \max} - P_{i \min}} \cdot 64 \right); i = 1, 2, \dots, 7 \quad (9)$$

gdzie:

$v_i$  – wartość funkcji i-tego wskaźnika,

$P_{i \max}$  – wartość maksymalna i-tego wskaźnika,

$P_{i \min}$  – wartość minimalna i-tego wskaźnika,

$P_{iv}$  – argument funkcji i-tego wskaźnika

$i$  – kod analizowanego wskaźnika

Stopień spełnienia (kryterium) stanu bezpieczeństwa przez środki transportu z punktu widzenia  $i$ -tego wskaźnika opisano zależnością (10)

$$g_i = 10 - v_i \quad (10)$$

Zgodnie z metodyką analizy wielokryterialnej AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [4] przyjmuje się następującą skalę opisującą stopień spełnienia stanu bezpieczeństwa (od 4 do 10), gdzie:

$g = 4$  – oznacza, że nie został osiągnięty stan bezpieczeństwa (stan niebezpieczny),

$g = 10$  – oznacza, że został osiągnięty stan bezpieczeństwa

Metoda AHP polega na porównaniu poszczególnych wskaźników między sobą, co można przedstawić w postaci macierzowej.

$$q = \begin{bmatrix} 0 & q_{1,2} & \dots & q_{1,n} \\ 0 & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & q_{n-1,n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Tab.1. Preferencje wariantu wraz z wartościami liczbowymi

Porównanie wariantu $a$ w stosunku $b$	Względna jakość wariantu $a$ w stosunku do $b$	Przypisywana wartość $q_{ab}$
$a$ dużo lepszy niż $b$	Mocna preferencja $a$	6
$a$ lepszy niż $b$	Preferencja $a$	4
$a$ trochę lepszy niż $b$	Słaba preferencja $a$	2
$a$ równie dobry jak $b$	Brak preferencji	0
$a$ trochę gorszy niż $b$	Słaba preferencja $b$	-2
$a$ gorszy niż $b$	Preferencja $b$	-4
$a$ dużo gorszy niż $b$	Mocna preferencja $b$	-6

Tab. 2. Macierz porównań wskaźników oceny bezpiecznego działania systemu

	W1-8.1	W1-8.2	W1-9.1	W1-9.2	W1-10	W1-11	W1-13
W1-8.1	0	2	6	8	4	2	6
W1-8.2		0	8	6	4	2	6
W1-9.1			0	2	-4	-6	-2
W1-9.2				0	-4	-6	-2
W1-10					0	-2	2
W1-11						0	4
W1-13							0

Na podstawie przypisanych wartości preferencji  $q_{jk}$  pomiędzy wskaźnikami o numerach  $j$  i  $k$  wyznacza się dodatkową zmienną według wzoru (12).

$$w_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} q_{jk} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, 7 \\ j = 1, 2, \dots, 7 \\ k = 1, 2, \dots, 7 \end{array} \quad (12)$$

Po wyliczeniu zmiennej dodatkowej  $w_i$  (14) wartość wagi określa się stosując zależność (13) [4].

$$c_i = \frac{(\sqrt{2})^{w_i}}{\sum_{i=1}^{n_i} (\sqrt{2})^{w_i}} \quad (13)$$

Ocenę wynikową spełnienia stanu bezpieczeństwa obliczono według zależności (14)

$$s = \sum_{i=1}^7 c_i g_i \quad (14)$$

Ocena całkowita metody *AHP* umożliwia słowną interpretację wartości wynikowej

Tab.3. Interpretacja słowna wartości oceny wynikowej [53]

Całkowita ocena wariantu $s$	Interpretacja stanu
10	Idealny
9	Bardzo dobry
8	Dobry
7	Dostateczny
6	Dopuszczalny
5	Zły
4	Bardzo zły

Tab.4. Wyniki wielokryterialnej analizy *AHP*

L.p.	Nazwa kryterium	Typ kryterium	Możliwa wartość najmniejsza (stan bezpieczeństwa)	Możliwa wartość największa (stan niebezpieczeństwa)	Wartość wagi
1	W1-8.1	MINSIMP	0	250	0,65808
2	W1-8.2	MINSIMP	0	70	0,29802
3	W1-9.1	MINSIMP	8	140	0,00002
4	W1-9.2	MINSIMP	108	352	0,00001
5	W1-10	MINSIMP	2225	5830	0,00257
6	W1-11	MINSIMP	150	3430	0,4113
7	W1-13	MINSIMP	74	263	0,00016

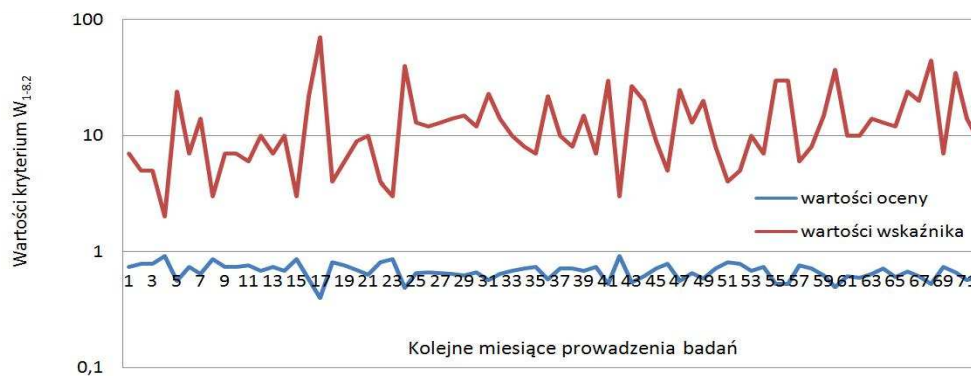
Tab. 5. Przykładowe wyniki analizy wielokryterialnej oceny bezpieczeństwa działania analizowanego systemu

Kolejne badania	miesiące	Wynik AHP	Kolejne badania	miesiące	Wynik AHP
1		8,99366	13		9,0339
2		6,33741	14		8,91822
3		9,15909	15		9,37752
4		9,53894	16		8,63166
5		8,54265	17		8,19668
6		8,98289	18		9,21165
7		8,70401	19		9,07358
8		5,51744	20		8,8896
9		8,99438	21		8,89127
10		8,96675	22		9,22312
11		9,06912	23		9,33781
12		8,83572	24		8,38279

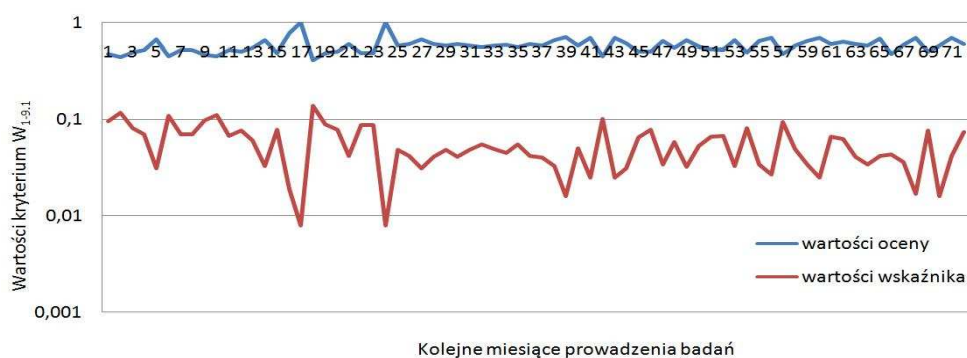
Tab.6. Założenia do oceny bezpieczeństwa działania systemu transportowego

$s = 4$	–	oznacza stan niebezpiecznego działania systemu (stan katastroficzny)
$s \in (4 \div 7)$	–	zakres niedopuszczalnych zmian stanu bezpieczeństwa działania systemu (zbiór stanów zagrożeniowych)
$s \in (7 \div 10)$	–	zakres dopuszczalnych zmian stanu bezpieczeństwa działania systemu (zbiór stanów bezpieczeństwa)
$s = 10$	–	oznacza stan bezpiecznego działania systemu (stan intencjonalny)

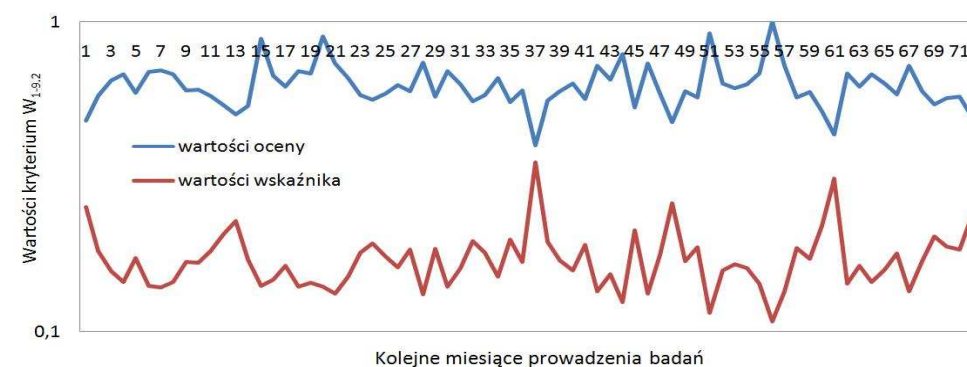
Rys. 1. Porównanie wartości oceny bezpieczeństwa działania systemu ze względu na kryterium  $W_{1-8,1}$  i wartości rzeczywistej tego kryterium



Rys. 2. Porównanie wartości oceny bezpieczeństwa działania systemu ze względu na kryterium  $W_{1-8,2}$  i wartości rzeczywistej tego kryterium

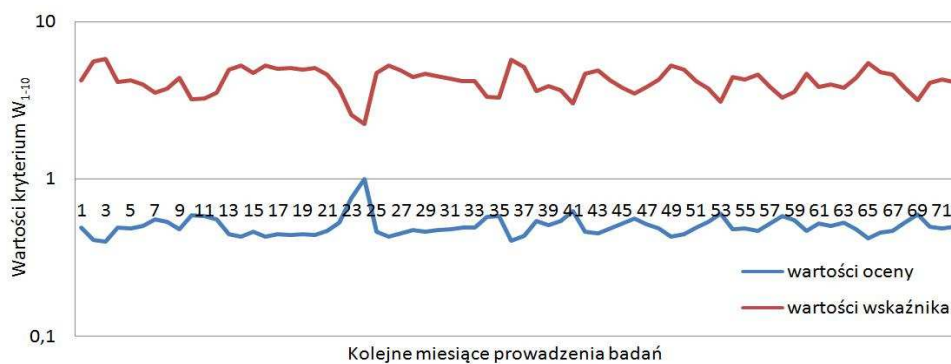


Rys. 3. Porównanie wartości oceny bezpieczeństwa działania systemu ze względu na kryterium  $W_{1-9,1}$  i wartości rzeczywistej tego kryterium

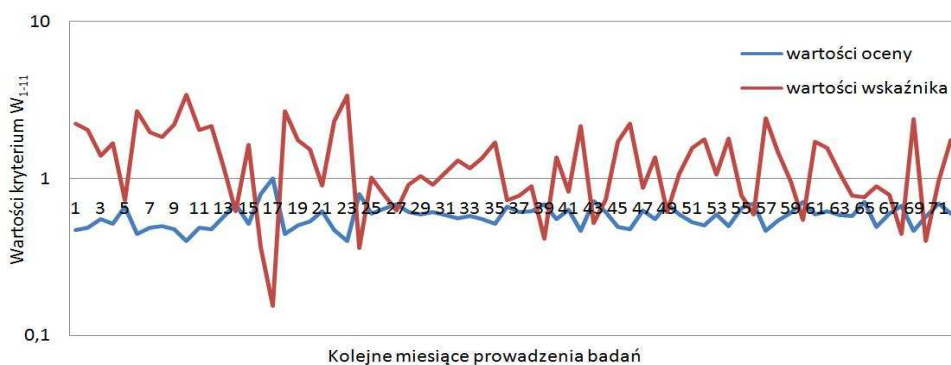


Rys. 4. Porównanie wartości oceny bezpieczeństwa działania systemu ze względu na kryterium  $W_{1-9,2}$  i wartości rzeczywistej tego kryterium

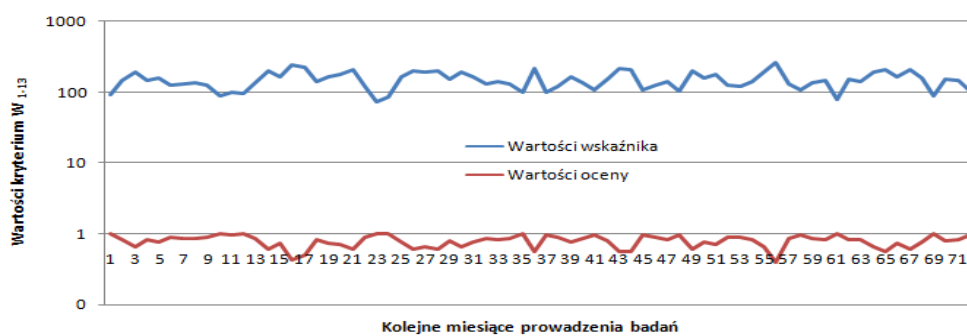




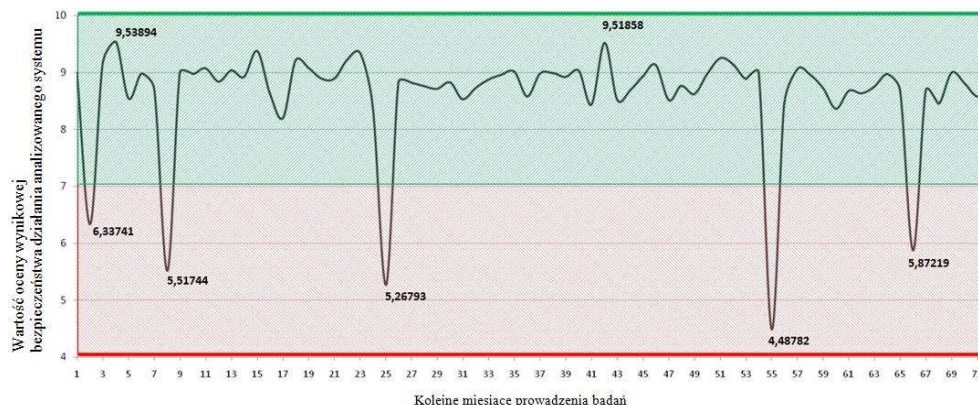
Rys. 5. Porównanie wartości oceny bezpieczeństwa działania systemu ze względu na kryterium  $W_{1-10}$  i wartości rzeczywistej tego kryterium



Rys. 6. Porównanie wartości oceny bezpieczeństwa działania systemu ze względu na kryterium  $W_{1-11}$  i wartości rzeczywistej tego kryterium



Rys. 7. Porównanie wartości oceny bezpieczeństwa działania systemu ze względu na kryterium  $W_{1-13}$  i wartości rzeczywistej tego kryterium



Rys. 8. Przebieg zmian zbiorczej oceny bezpieczeństwa działania systemu miejskiej komunikacji autobusowej w analizowanym przedziale czasu od 01.01.1999r do 31.12.2004r

## 6. WNIOSKI

Z analizy wyników badań eksploatacyjnych zrealizowanych w systemie transportu drogowego wynika, że stany ograniczonej zdadności środków transportu eksploatowanych w tym systemie stanowią przyczynę powstawania zdarzeń niepożądanych w około 30 % przypadków. Na podstawie wyników zrealizowanych badań eksploatacyjnych wyznaczono istotność poszczególnych podsystemów analizowanych środków transportu. Dowiedziono, że podsystemem najistotniejszym którego uszkodzenie mają największy wpływ na powstawanie zdarzeń niepożądanych (około 24 %) jest podsystem hamulcowy. Natomiast podsystemami najmniej istotnymi których łączny udział uszkodzeń stanowi w 27% przyczynę zdarzeń niepożądanych są: silnik, podsystem przeniesienia napędu, nadwozie i podsystem elektryczny. Opracowana metoda oceny bezpieczeństwa działania systemu autobusowej komunikacji miejskiej jest uniwersalna i może być zastosowana do oceny bezpieczeństwa działania różnego typu systemów transportu drogowego.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] SMALKO Z.: *Relacje między pojęciami bezpieczeństwa i niezawodności w układach technicznych*. Materiały Symposium Bezpieczeństwa w Transporcie Morskim. Gdynia 2007
- [2] SUCHODOLSKI S. – *Pojęcie i miary bezpieczeństwa w piśmiennictwie światowym*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn – zeszyt 2 (102) 1995 Politechnika Warszawska, Wydział
- [3] LOOTSMA F.A.: *Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART*, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis nr. 2 1993
- [4] Wielka Encyklopedia PWN. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2001
- [5] WOROPAY M., BOJAR P., WDZIĘCZNY A., SZUBARTOWSKI M.: *Metoda oceny wpływu skuteczności realizowanych napraw na niezawodność i bezpieczeństwo działania systemów transportu miejskiego*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji Bydgoszcz-Radom 2008