

dr hab. inż. Andrzej ŚWIDERSKI

Instytut Transportu Samochodowego
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, Polska
E-mail: andrzej.swiderski@its.waw.pl

dr inż. Anna BORUCKA

Wydział Logistyki
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. Gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa 46, Polska
E-mail: anna.borucka@wat.edu.pl

dr hab. inż. Ilona JACYNA-GOŁDA

Wydział Inżynierii Produkcji
Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, Polska
E-mail: ilona.jacyna@gmail.com

dr inż. Emilian SZCZEPAŃSKI

Wydział Transportu
Politechnika Warszawska
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska
E-mail: eszczepanski@wt.pw.edu.pl

Przebieg zużycia elementów układu hamulcowego w zróżnicowanych warunkach eksploatacji samochodu w przedsiębiorstwie transportowym

Słowa kluczowe: eksploatacja samochodów, zużycie elementów układów hamulcowych, wpływ warunków użytkowania

Streszczenie: Efektywne zarządzanie flotą pojazdów związane jest z dbałością o ich racjonalne użytkowanie i właściwą diagnostyką. Wczesne wykrywanie potencjalnych nieprawidłowości pozwala zapobiegać awariom i realizować procesy transportowe w sposób niezakłócony. Jednym z ważniejszych podzespołów, z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkownika pojazdu, jest układ hamulcowy. Na podstawie badań laboratoryjnych można wyznaczyć charakterystyki trwałości poszczególnych jego elementów. Najbardziej pożądane są indywidualne wskazania, odwołujące się do warunków eksploatacji.

W niniejszym artykule, na przykładzie badań grupy pojazdów marki Renault, wyposażonych w tarczowe mechanizmy hamulcowe, przeprowadzonych w okresie dwóch lat, dokonano pomiarów zużycia elementów układu (tarcze i klocki hamulcowe) w funkcji wybranych czynników, zależnych od czasu i środowiska, w którym realizowane były przewozy. Do analizy wyników wykorzystano nieparametryczne testy statystyczne. Celem weryfikacji hipotezy o nieistotności różnic zastosowano testy Manna-Whitney'a, oraz Kruskala-Wallisa. Ich wyniki porównano z wynikami analizy wariancji ANOVA. Sprawdzono istotność czynników wpływających na stopień zużycia hamulców. Wskazano również możliwe kierunki wykorzystania wyników pomiaru zużycia hamulców do racjonalizacji procesów transportowych. Zaprezentowana metoda może znaleźć zastosowanie także do oceny innych elementów (zespołów, podzespołów, układów) pojazdów samochodowych.

1. Wstęp

Dotychczas optymalizacja systemów transportowych skupiała się przede wszystkim na kwestiach ekonomicznych [24, 2, 6]. W ostatnich latach zauważalny jest trend planowania działań w oparciu o modele decyzyjne, uwzględniające negatywne oddziaływanie transportu na otoczenie (np. emisja zanieczyszczeń [17], hałas [5], czy bezpieczeństwo ruchu drogowego [12]). Akcentowana jest też satysfakcja klienta i właściwa jakość usług [4]. Zapewnia ją utrzymywanie wysokiej gotowości [20] i niezawodności całego systemu transportowego [18, 19], jak również jego poszczególnych elementów, np. silnika [14]. Opracowywane są również modele symulacyjne, umożliwiające badanie systemów odmiennych w skali i funkcjach, a także uwzględnienie w nich zagadnienia wrażliwości [16] i elastyczności [1, 9]. W efekcie mniejsza jest liczba zaburzeń w systemie (działań niepożądanych, wywołanych np. awarią środka transportu) i mniejsze koszty jego funkcjonowania. Podkreślane jest też pojęcie ryzyka. Zdarność pojazdów w aspekcie ich podstawowych systemów bezpieczeństwa, takich jak np. układ hamulcowy, zmniejsza prawdopodobieństwo zagrożeń, mogących przerwać działanie systemu transportowego. Również w tym zakresie zauważalny jest wzrost zainteresowania naukowców i praktyków [26].

Prezentowana w literaturze analiza wpływu różnych czynników na zużycie elementów układu hamulcowego odwołuje się na ogół do wyników badań laboratoryjnych (stanowiskowych). Najczęściej dotyczy materiałów, z których zostały wykonane tarcze [25], klocki hamulcowe [21], jak i wzajemnych interakcji pary ciekiej w różnych warunkach eksploatacji [8, 23]. Na przykład w artykule [10] przedstawiono wyniki eksperymentów, których celem było zbadanie oddziaływania modelowych warunków otoczenia na współczynnik tarcia pary ciekiej hamulca tarczowego. Analizowano wpływ różnych warunków eksploatacji (prędkości obrotowej tarczy hamulcowej, liczby cykli hamowania) oraz czynników zewnętrznych (pojawienie się w obszarze tarcia wody, płynu hamulcowego) potwierdzając ich istotność. Z kolei przedmiotem pracy badawczej [7] był wpływ na elementy ciekie hamulców samochodowych czynników wynikających ze środowiska ich pracy (wilgotność oraz temperatura), skutkujący zmianą siły hamowania. Również w artykule [15] wykazano istotny wpływ temperatury pary trącej na współczynnik tarcia.

Autorzy analizowanych publikacji opisywali swoje dokonania głównie w odniesieniu do wyników badań laboratoryjnych (np. laboratoryjnych analiz temperatury pary ciekiej). Nie przedstawiali dokonań wynikających z przeprowadzonych badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji, uwzględniających naturalne środowisko poruszania się pojazdów, oddziaływanie ruchu, w jakim się poruszają, czy też wpływ miesiąca kalendarzowego, na zużycie elementów układu hamulcowego. W zakresie badań wpływu pory roku (która w badanym klimacie ulega cyklicznym zmianom w postaci pór roku charakteryzujących się względnie stałymi warunkami pogodowymi), jak również wpływu ruchu miejskiego (w związku z większą dynamiką jazdy) na zużycie elementów układu hamulcowego, stwierdzono lukę. Można jedynie przyjąć, że wysokie wartości temperatury otoczenia sprzyjają wzrostowi temperatury roboczej elementów. Wyznaczanie przez producentów dopuszczalnych norm zużycia nie uwzględnia indywidualnych warunków ich eksploatacji i nie sugeruje sposobu ich kształtowania. Tymczasem taka informacja jest istotna zarówno dla użytkownika pojazdu, jak i producenta udzielającego gwarancji.

Celem niniejszej pracy była ocena wpływu warunków użytkowania na zużycie elementów układu hamulcowego w procesie eksploatacji samochodu w przedsiębiorstwie transportowym.

2. Metoda badawcza

Badaniu poddano jednorodną grupę pojazdów, realizujących podobne zadania przewozowe w dwóch różnych środowiskach ruchu (miejskim i zamiejskim). Opony pojazdów były tego samego typu. Badane elementy były we wszystkich pojazdach oryginalne. Udostępnione dane dotyczyły pomiarów zużycia wybranych elementów układu hamulcowego i umożliwiły jedynie wykonanie analiz w zakresie wpływu rodzaju ruchu i miesiąca kalendarzowego, z pominięciem innych czynników, jak np. dokładne obciążenie pojazdu, styl jazdy kierowcy czy intensywność użytkowania wyrażona w kilometrach. Uzasadnieniem pominięcia wpływu tych czynników jest fakt, że badanie dotyczyło floty pojazdów nowych, zakupionych w jednym czasie, o stałych parametrach wyjściowych.

Zebrane dane dotyczyły dwóch lat eksploatacji. Były rejestrowane od maja 2016 r. do kwietnia 2018 r., w cyklach miesięcznych. Grupę badawczą stanowiło 20 pojazdów Renault Kangoo. Połowa realizowała przewozy w ruchu miejskim (pojazdy nr 1-10), pozostałe poruszały się poza miastem (pojazdy nr 11-20). Pomiarów dokonywano za pomocą mikrometru zewnętrznego analogowego, o zakresie pomiarowym od 0,1 mm do 25 mm i dokładności odczytu 0,01 mm. Mierzono grubość czterech zasadniczych elementów układu hamulcowego: tarcz hamulcowych przednich i tylnych oraz przednich i tylnych klocków hamulcowych. Dla każdego elementu wykonano 4-5 pomiarów, ustalano grubości badanych elementów jako średnie arytmetyczne z kilku pomiarów a następnie obliczono średnią wartość zużycia. Sposób postępowania na przykładzie tarcz hamulcowych prezentuje tab. 1. Każdy wiersz tabeli dotyczy pojedynczego pojazdu. Wszystkie badania były prowadzone z wykorzystaniem programu Statistica.

Tabela 1. Wyniki pomiaru tarcz hamulcowych i obliczone zużycie

Miesiąc kalendarzowy	Pomiar grubości elementu [mm]	Zużycie elementu [mm]
5	24,00	
6	23,90	0,10
7	23,79	0,11
8	23,64	0,15
9	23,48	0,16
10	23,29	0,19
11	23,11	0,18
12	23,06	0,05
1	22,98	0,08
2	22,91	0,07
3	22,84	0,07

Powstałe arkusze przekształcono, porządkując wartości liczbowe dla wszystkich pojazdów w dwóch grupach rodzaju ruchu (miejski i pozamiejski). Fragment utworzonych zbiorów pomiarowych (dla klocków hamulcowych przednich), przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Dane pomiarowe po przekształceniach

Miesiąc kalendarzowy	Zużycie w ruchu miejskim [mm]	Nr pojazdu
6	0,38	1
6	0,32	2
6	0,47	3
6	0,42	4
6	0,40	5
6	0,52	6
6	0,55	7
6	0,43	8
6	0,53	9
6	0,50	10
7	0,39	1
7	0,39	2
7	0,39	3
7	0,48	4
7	0,48	5
7	0,67	6
7	0,67	7
7	0,48	8
7	0,48	9
7	0,39	10

3. Wyniki badania

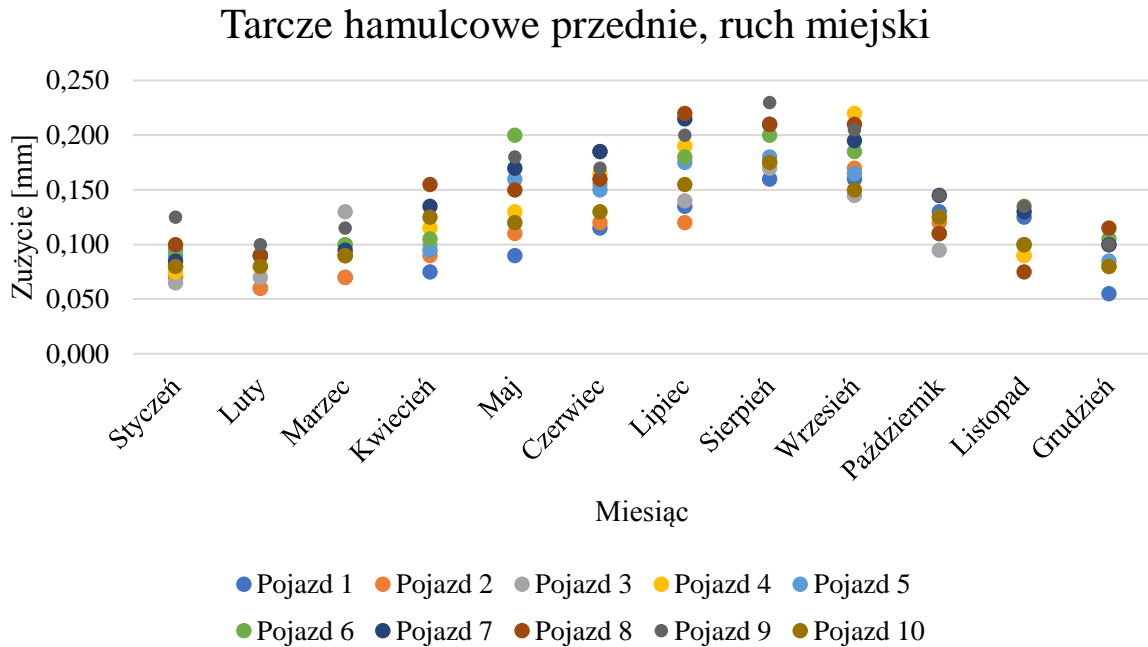
3.1. Analiza wstępna

Celem prezentacji zebranych danych i określenia podstawowych miar statystyk opisowych, pozwalających na podsumowanie zbioru danych i wyciągnięcie podstawowych wniosków i uogólnień na temat zebranej próby, wykonano analizę statystyczną zgromadzonych danych pomiarowych, dotyczących układów hamulcowych samochodów marki Renault Kangoo. Otrzymane wyniki zamieszczono w tab. 3.

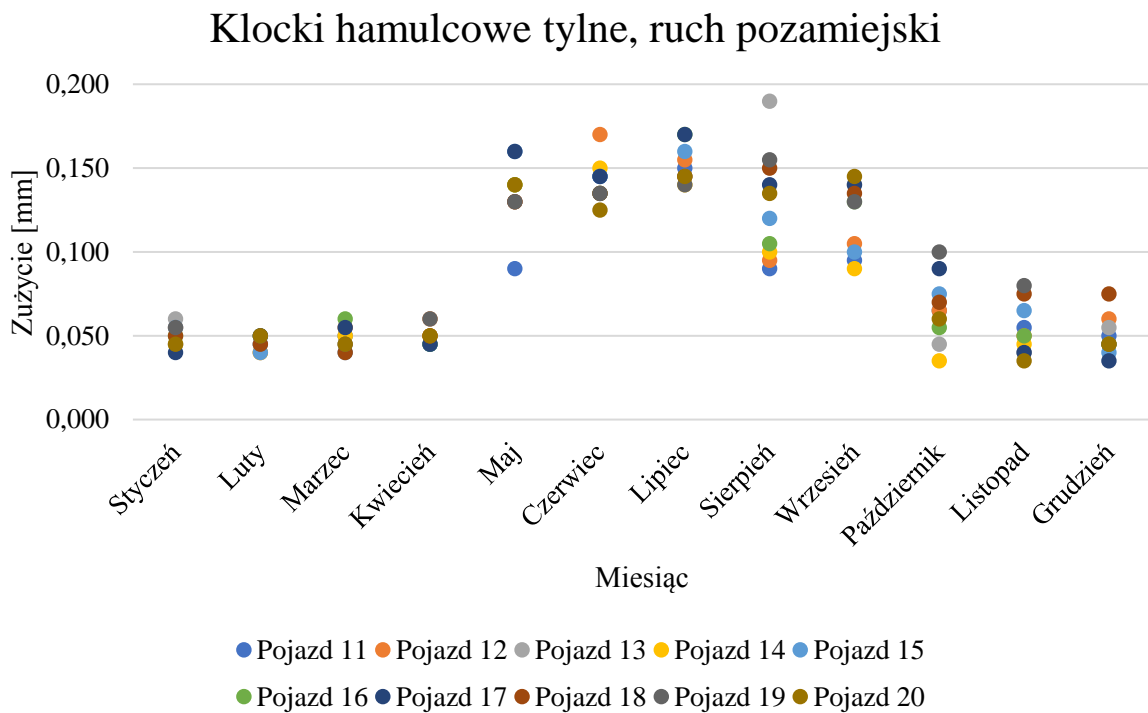
Tabela 3. Podstawowe statystyki opisowe zużycia badanych elementów

Element	Statystyki opisowe									
	Rodzaj ruchu	Liczba obserwacji	Średnia [mm]	Mediana [mm]	Min. [mm]	Maks. [mm]	Odch. Std [mm]	Wsp. zmn. [%]	Skośność	Kurtoza
Klocki hamulcowe przednie	miejski	220	0,47	0,47	0,27	0,69	0,08	16,10	0,39	0,36
	pozamiejski	230	0,40	0,41	0,18	0,69	0,10	25,78	-0,09	-0,43
Klocki hamulcowe tylne	miejski	230	0,12	0,10	0,01	0,25	0,05	38,94	0,62	-0,49
	pozamiejski	230	0,08	0,06	0,03	0,25	0,05	55,46	0,70	-0,73
Tarcze hamulcowe przednie	miejski	220	0,13	0,11	0,02	0,25	0,05	39,38	0,66	-0,46
	pozamiejski	230	0,09	0,07	0,04	0,18	0,04	39,50	0,64	-0,92

Zbliżony poziom zużycia elementów układu hamulcowego w próbie samochodów dla danego rodzaju ruchu potwierdzają przykładowe wykresy. Na rys. 1 przedstawiono zużycie tarcz hamulcowych przednich w ruchu miejskim, natomiast na rys. 2 – klocków hamulcowych tylnych w ruchu pozamiejskim.



Rysunek 1. Zużycie tarcz hamulcowych przednich w ruchu miejskim dla pojazdów 1-10



Rysunek 2. Zużycie klocków hamulcowych tylnych w ruchu pozamiejskim dla pojazdów 11-20

Hipoteza badawcza zakłada, że zużycie elementów układu hamulcowego zależy od rodzaju ruchu (środowiska), w jakim poruszał się pojazd (miejski, pozamiejski) oraz miesiąca kalendarzowego (pory roku). Przyjęto, że wpływ tych zmiennych jest istotny. Weryfikację umożliwi analiza wariancji ANOVA. Jej przeprowadzenie jest możliwe po spełnieniu wymagań, do których należy normalność rozkładów we wszystkich k zbiorowościach, oraz równość ich wariancji [22].

W analizowanej próbie występują zbiorowości zdefiniowane poprzez zmienne grupujące: 'Ruch' i 'Miesiąc'. Analiza normalności rozkładów dla zmiennej grupującej: 'Ruch' za pomocą testu Shapiro-Wilka wykazała, że należy odrzucić hipotezę zerową H_0 zakładającą ich normalność. Wszystkie otrzymane wyniki p -value były mniejsze od założonego poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Dla zmiennej grupującej 'Miesiąc', tylko nieliczne nie spełniły tego założenia. Przykładowe wyniki testu Shapiro-Wilka, dla klocków hamulcowych tylnych, przedstawiono w tab. 5.

Tabela 5. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla klocków hamulcowych tylnych

Lp.	Miesiąc	Wartość statystyki testowej testu Shapiro-Wilk'a	Poziom prawdopodobieństwa p
1.	Styczeń	W = 0,9105	p = 0,0039
2.	Luty	W = 0,8663	p = 0,0002
3.	Marzec	W = 0,9444	p = 0,0488
4.	Kwiecień	W = 0,9496	p = 0,0733
5.	Maj	W = 0,9395	p = 0,2349
6.	Czerwiec	W = 0,9687	p = 0,3262
7.	Lipiec	W = 0,9643	p = 0,2334
8.	Sierpień	W = 0,9829	p = 0,7968
9.	Wrzesień	W = 0,9815	p = 0,7455
10.	Październik	W = 0,9618	p = 0,1932
11.	Listopad	W = 0,8981	p = 0,0017
12.	Grudzień	W = 0,9389	p = 0,0317

Sprawdzenia jednorodności wariancji dokonano za pomocą testu Levene'a oraz testu Browna-Forsythe'a, które zakładają w hipotezie H_0 jednorodność wariancji pomiędzy badanymi próbami. Zgodnie z wynikami dla ruchu miejskiego i pozamiejskiego (tab. 6), jedynie dla klocków hamulcowych tylnych potwierdzono jednorodność wariancji pomiędzy badanymi próbami, dla pozostałych części pojazdu konieczne jest odrzucenie H_0 .

Tabela 6. Wyniki testu Levene'a oraz testu Browna-Forsythe'a dla ruchu miejskiego i pozamiejskiego

Zmienna	Średnia miejski	Średnia pozamiejski	Levene'a F(1,df)	df Levene'a	p Levene'a	Brn-Fors F(1,df)	df Brn-Fors	p Brn-Fors
Klocki hamulcowe przednie	0,47	0,40	27,97	448	0,0000	25,20	448	0,0000
Klocki hamulcowe tylne	0,12	0,08	2,59	458	0,1081	0,37	458	0,5418

Zmienna	Średnia miejski	Średnia pozamiejsk	Levene'a F(1,df)	df Levene'a	p Levene'a	Brn-Fors F(1,df)	df Brn-Fors	p Brn-Fors
Tarcze hamulcowe przednie	0,13	0,09	22,39	448	0,0000	14,57	448	0,0002
Tarcze hamulcowe tylne	0,05	0,04	12,38	458	0,0005	5,16	458	0,0236

Tożsamą analizę przeprowadzono dla grup zdefiniowanych przez miesiące kalendarzowe. Wybrane wyniki, dla tarcz hamulcowych przednich, zaprezentowano w tab. 7.

Tabela 7. Wyniki testu Levene'a oraz testu Browna-Forsythe'a dla wybranych miesięcy, dla tarcz hamulcowych przednich.

Test/ p-value	Styczeń		Luty	
	Levene'a	Browna-Forsythe'a	Levene'a	Browna-Forsythe'a
Styczeń	-	-	0,5958	0,7625
Luty	0,5958	0,7625	-	-
Marzec	0,2986	0,2526	0,1229	0,1361
Kwiecień	0,0093	0,0215	0,0022	0,0088
Maj	0,0780	0,1039	0,0259	0,0468
Czerwiec	0,0002	0,0014	0,0000	0,0006
Lipiec	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000
Sierpień	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Wrzesień	0,0018	0,0013	0,0004	0,0004
Październik	0,0000	0,0042	0,0000	0,0018
Listopad	0,0002	0,0024	0,0000	0,0008
Grudzień	0,3674	0,4920	0,1441	0,3033

Dla każdego z czterech badanych elementów zgromadzone dane naruszają wymagania analizy wariancji ANOVA (zarówno założenie normalności rozkładu reszt jak i jednorodności wariancji). Z tego powodu zdecydowano o przeprowadzeniu testów nieparametrycznych, dla każdego czynnika odrębnie i bez uwzględniania wzajemnych interakcji, które są dobrze określone tylko w analizie wariancji. W tym celu wykorzystano alternatywne testy, niewymagające spełnienia szeregu wymagań stawianych testom parametrycznym. Celem weryfikacji hipotezy o nieistotności różnic pomiędzy dwoma niezależnymi grupami zastosowano test Manna-Whitney'a, natomiast dla czynnika o co najmniej trzech poziomach, wykorzystano test Kruskala-Wallisa. Hipotezy zerowe w obu przypadkach zakładają, że próby pochodzą z jednej populacji, co sprowadza się do weryfikacji nieistotności różnic pomiędzy średnimi rangami dla porównywanych grup (czasem upraszczanych do median).

Ponieważ analiza wariancji ANOVA jest w pewnym stopniu odporna na naruszenie jej założeń, a prawdopodobieństwo popełnienia błędów I i II rodzaju jest mniejsze, zdecydowano równolegle przeprowadzić, w celach porównawczych, także to badanie, mając świadomość, że otrzymane wyniki należy traktować jako wskazania, a opierać się na wynikach testów nieparametrycznych. Przeprowadzone analizy zostały przedstawione osobno dla przednich elementów układu hamulcowego (tarcze i klocki hamulca przedniego) oraz tylnych (tarcze i klocki hamulca tylnego).

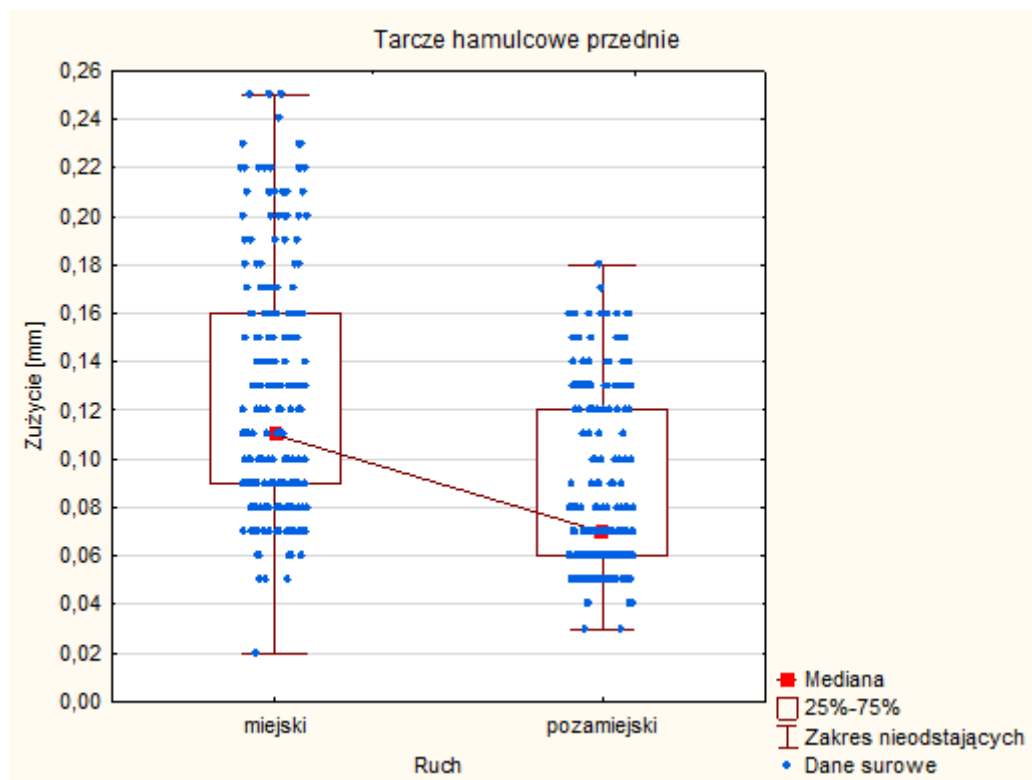
3.2. Badanie przednich elementów układu hamulcowego

Zgodnie z powyższymi rozważaniami, dla zdefiniowanych zbiorowości przeprowadzono testy nieparametryczne. Dla podziału według rodzaju realizowanego ruchu (miejski, pozamiejski) był to test Manna-Whitney'a, dla grup wynikających z poszczególnych miesięcy: test Kruskala-Wallisa. Otrzymane wyniki zaprezentowano w poniższych tabelach. W tab. 8 zestawiono obliczenia dla tarcz i klocków hamulca przedniego.

Tabela 8. Wyniki istotności czynników dla tarcz i klocków hamulcowych przednich

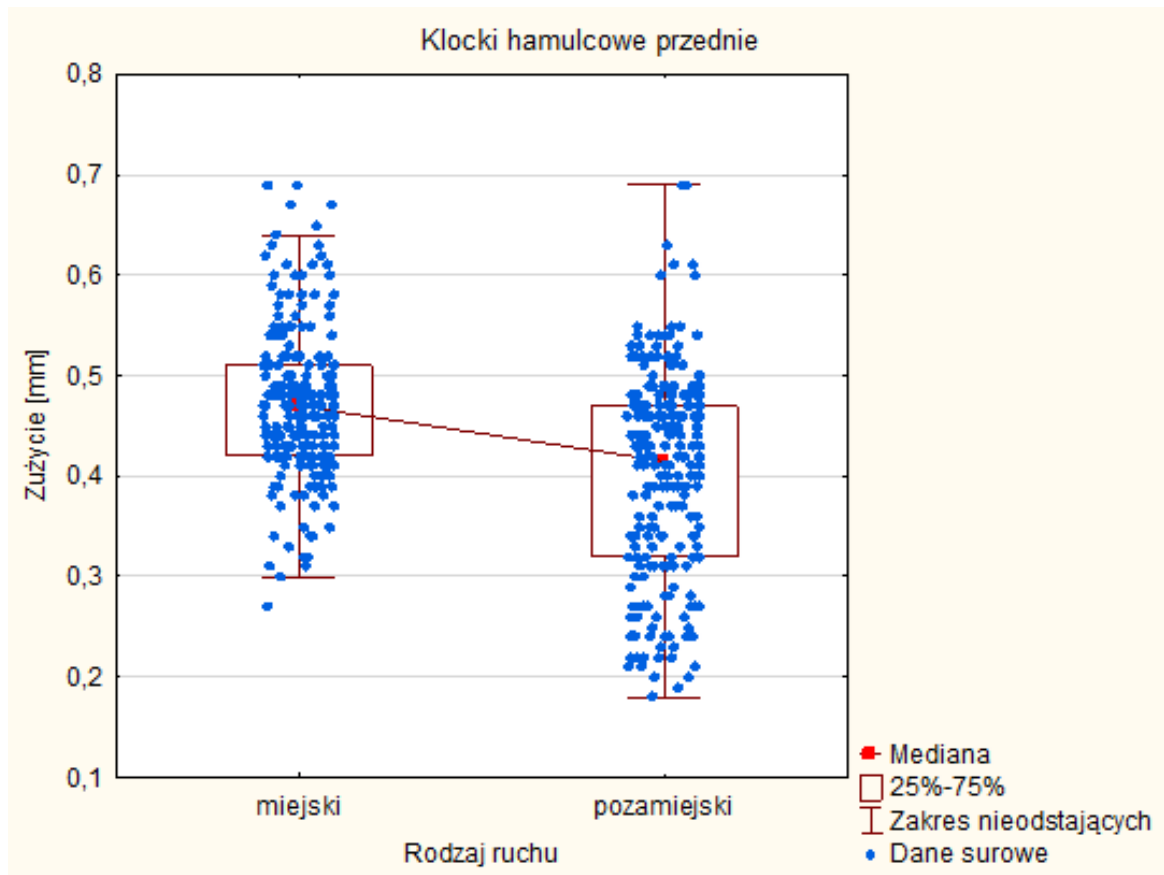
Czynnik	Tarcze hamulcowe przednie		Klocki hamulcowe przednie	
	Wartość p ANOVA	Wartość p test MW/KW	Wartość p ANOVA	Wartość p test MW/KW
Ruch	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Miesiąc	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Pojazd (Ruch)	< 0,001	< 0,001	0,066	< 0,001
Pojazd		< 0,001		< 0,001
Miesiąc x Ruch	< 0,001	-	0,010	-

Otrzymane wyniki wskazują, że wpływ wszystkich wyodrębnionych czynników na stopień zużycia, zarówno tarcz jak i klocków hamulca przedniego, jest istotny. Dla czynnika 'Ruch' świadczą o tym otrzymane wartości *p-value*, które w teście Manna-Whitney'a, dla obu elementów układu, osiągnęły wartość $p < 0,001$. Zależność dla tarcz hamulcowych przednich potwierdza wykres ramkowy (rys. 3) i wartości mediany zużycia, które wynoszą odpowiednio 0,11 mm i 0,07 mm dla ruchu miejskiego oraz pozamiejskiego.



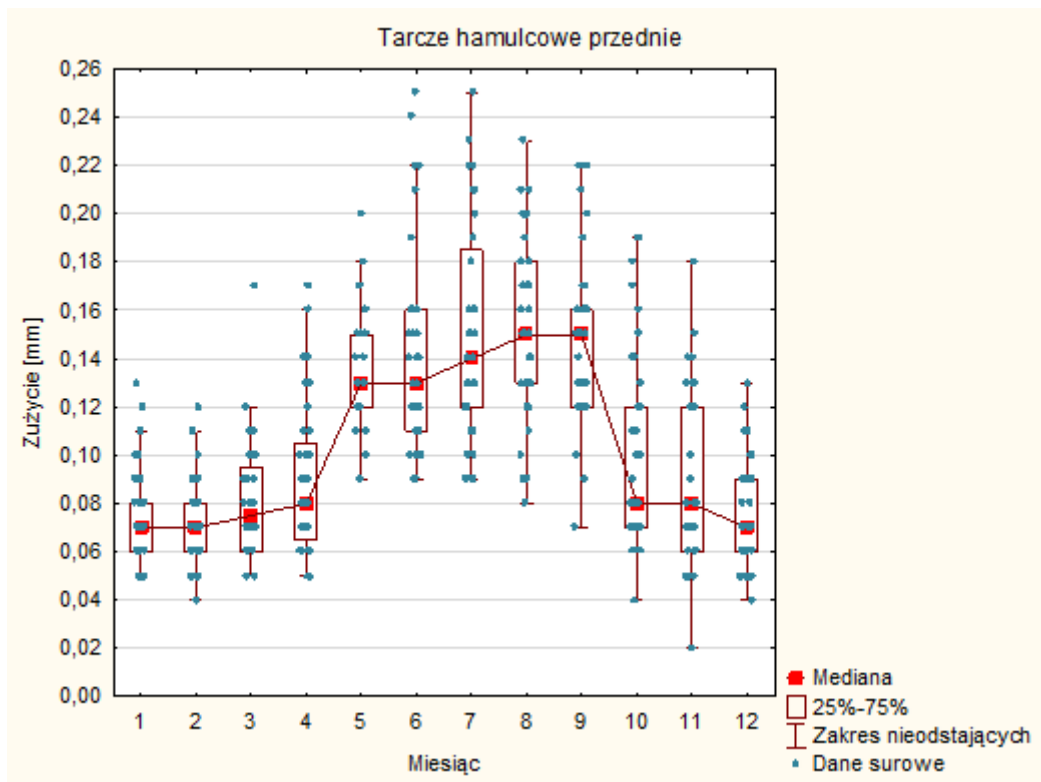
Rysunek 3. Zużycie tarcz hamulcowych przednich w zależności od rodzaju ruchu

Stopień zużycia klocków hamulcowych przednich również jest zależny od środowiska, w jakim realizowany jest przejazd – rys. 4. Mediany zużycia w ruchu miejskim oraz pozamiejskim wyniosły odpowiednio 0,47 mm i 0,41 mm.



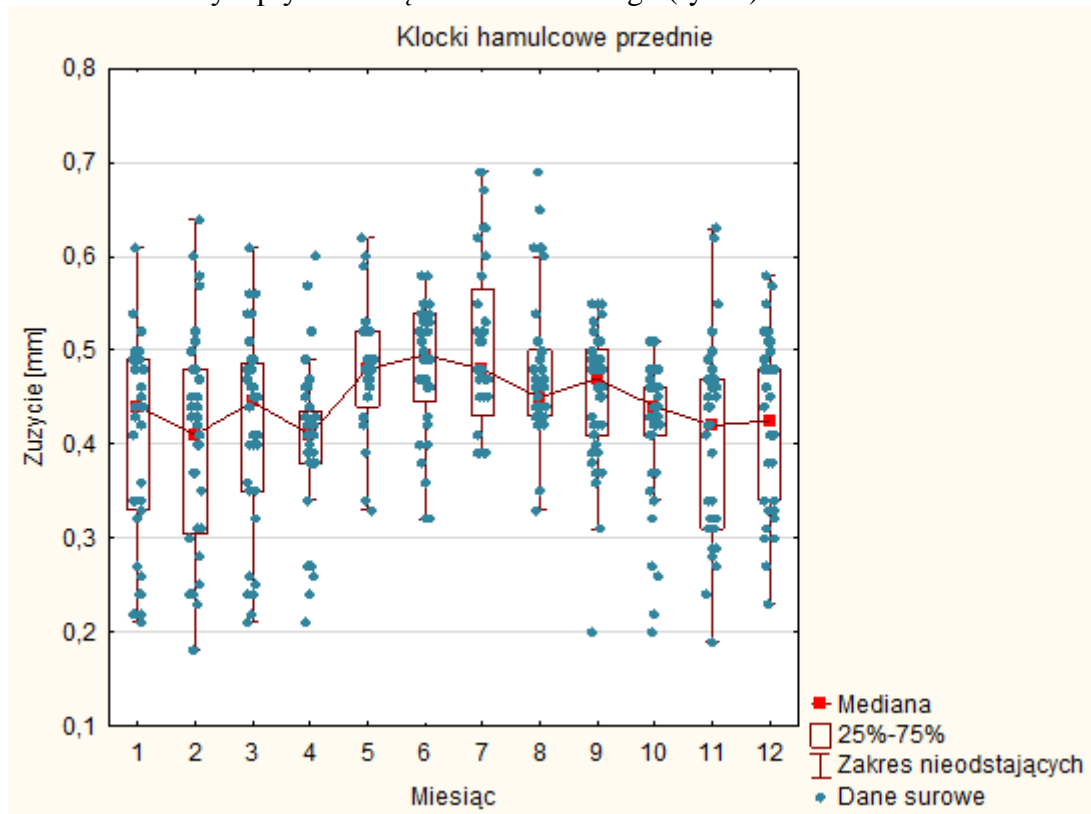
Rysunek 4. Zużycie klocków hamulcowych przednich w zależności od rodzaju ruchu

Wartości $p < 0,001$ otrzymane w teście Kruskala-Wallisa dla analizy czynnika 'Miesiąc' (tab. 8), potwierdzają jego istotność w procesie zużycia tarcz, jak i klocków hamulcowych przednich. Poziom ten ulega zmianie na przestrzeni kolejnych miesięcy. Dla tarcz hamulcowych przednich zużycie jest większe od maja do września i spada od października do kwietnia (rys. 5).



Rysunek 5. Zużycie tarcz hamulcowych przednich w zależności od miesiąca

Podobne, chociaż mniej zróżnicowane wyniki, uzyskano dla klocków hamulcowych przednich. Ich miesięczne zużycie również jest największe od maja do września, co potwierdza istotny wpływ miesiąca kalendarzowego (rys. 6).

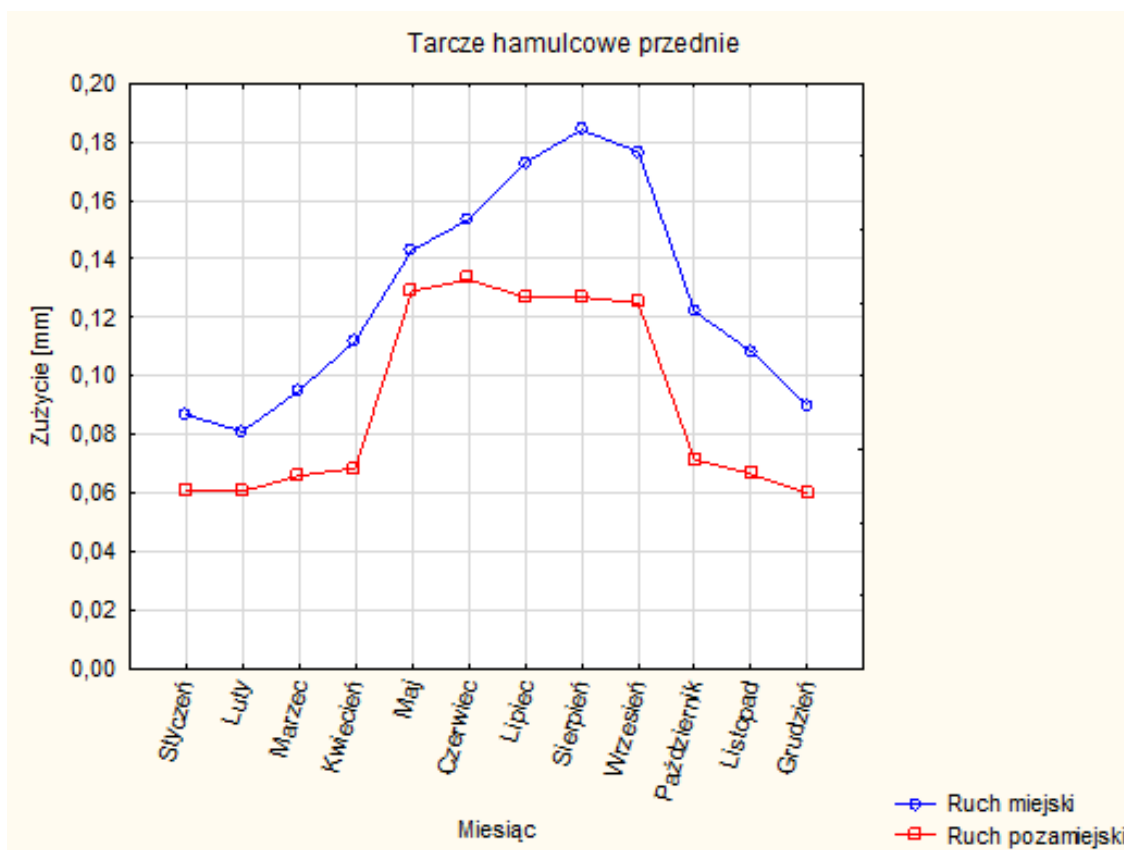


Rysunek 6. Zużycie klocków hamulcowych przednich w zależności od miesiąca

Poziom zużycia przednich elementów układu hamulcowego, zarówno tarcz jak i klocków, jest zatem istotnie warunkowany przez otoczenie, w którym realizowany jest przewóz. Wyższe wskazania uzyskano dla ruchu miejskiego, w porównaniu do przejazdów poza miastem.

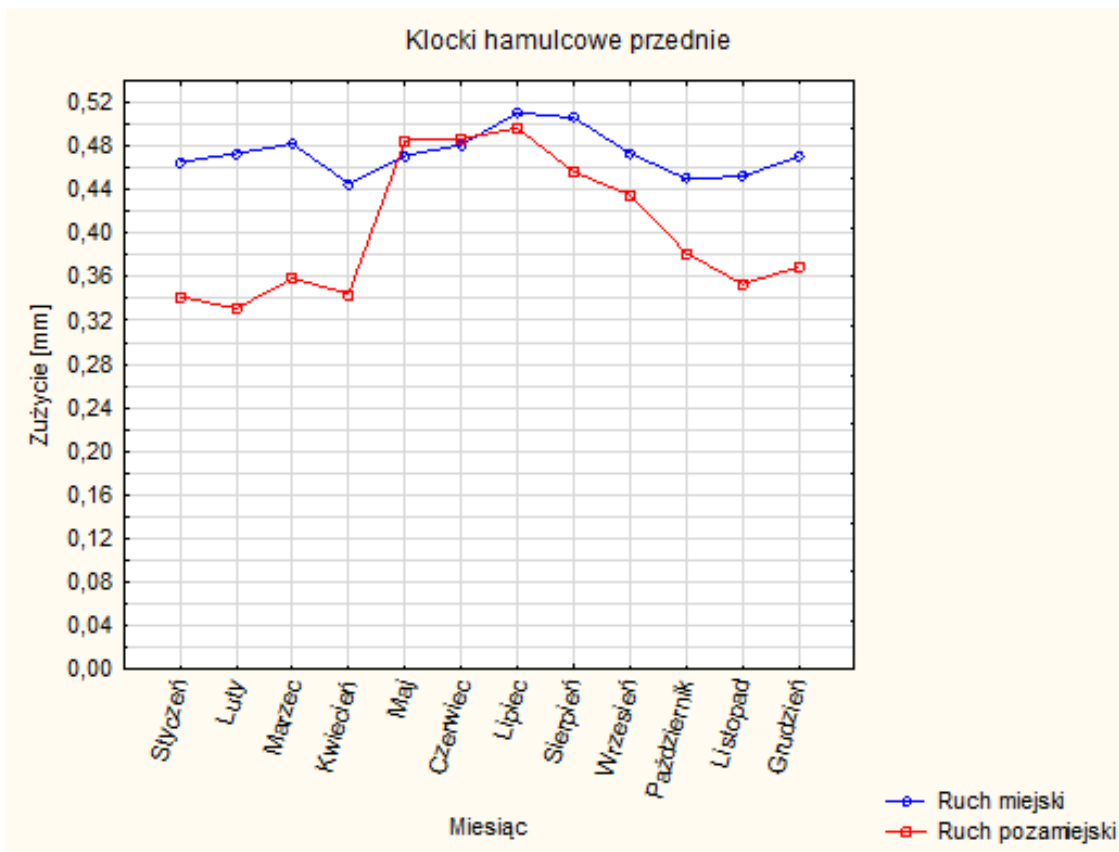
Na wykresach widoczne są obserwacje, które mogłyby być uznane za nietypowe, jednak ze względu na niewielką próbę nie można było dokonać ich jednoznacznej analizy, dlatego wzięły one udział w badaniu.

Obliczona istotność interakcji czynników 'Miesiąc' i 'Ruch' (tab. 8) wskazuje, że ich łączny wpływ nie jest tym samym, co suma wpływów każdego z osobna. Należy oczekiwać zwielokrotnionego oddziaływania na zużycie badanych elementów w pojazdach poruszających się w ruchu miejskim, podczas miesięcy letnich. Potwierdza to wykres średniego zużycia tarcz hamulcowych przednich w zależności od rodzaju ruchu i miesiąca, przedstawiony na rys. 7.



Rysunek 7. Średnie zużycie tarcz hamulcowych przednich w zależności od rodzaju ruchu i miesiąca

Podobnie na wykresie średniego zużycia klocków hamulcowych przednich, w zależności od rodzaju ruchu i miesiąca (rys. 8), widoczna jest wyraźna interakcja. Jej brak powodowałby równoodległość par punktów dla tego samego miesiąca.



Rysunek 8. Średnie zużycie klocków hamulcowych przednich w zależności od rodzaju ruchu i miesiąca

3.3. Badanie tylnych elementów układu hamulcowego.

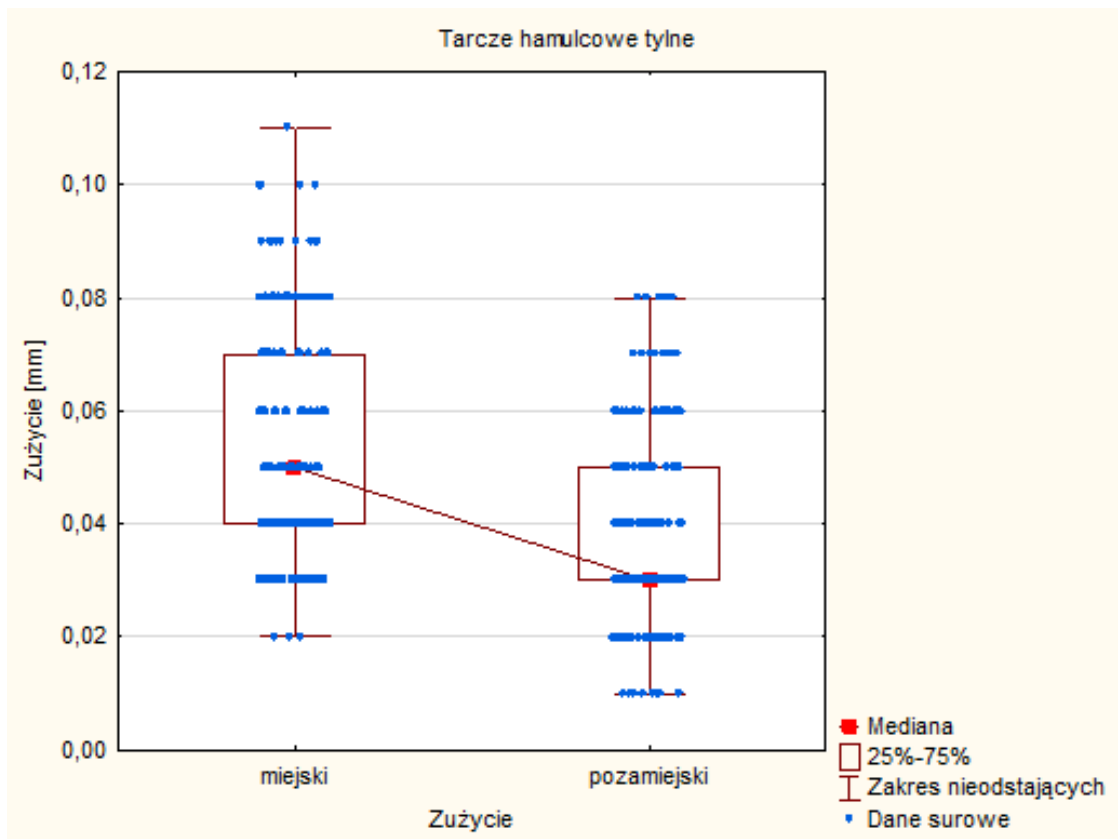
Wnioski z analizy tylnych elementów układu hamulcowego są podobne do wniosków dotyczących elementów przednich. Otrzymane wyniki przeprowadzonych testów statystycznych także wskazują na istniejącą zależność ich zużycia od badanych czynników. Wyniki testów istotności dla poszczególnych czynników pod kątem zużycia przedstawiono w tab. 9.

Tabela 9. Wyniki istotności czynników dla tarcz i klocków hamulcowych tylnych

Czynnik	Tarcze hamulcowe tylne		Klocki hamulcowe tylne	
	Wartość p ANOVA	Wartość p test MW/KW	Wartość p ANOVA	Wartość p test MW/KW
Ruch	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Miesiąc	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Pojazd (Ruch)	0,005		0,089	
Pojazd		< 0,001		< 0,001
Miesiąc x Ruch	0,001	-	< 0,001	-

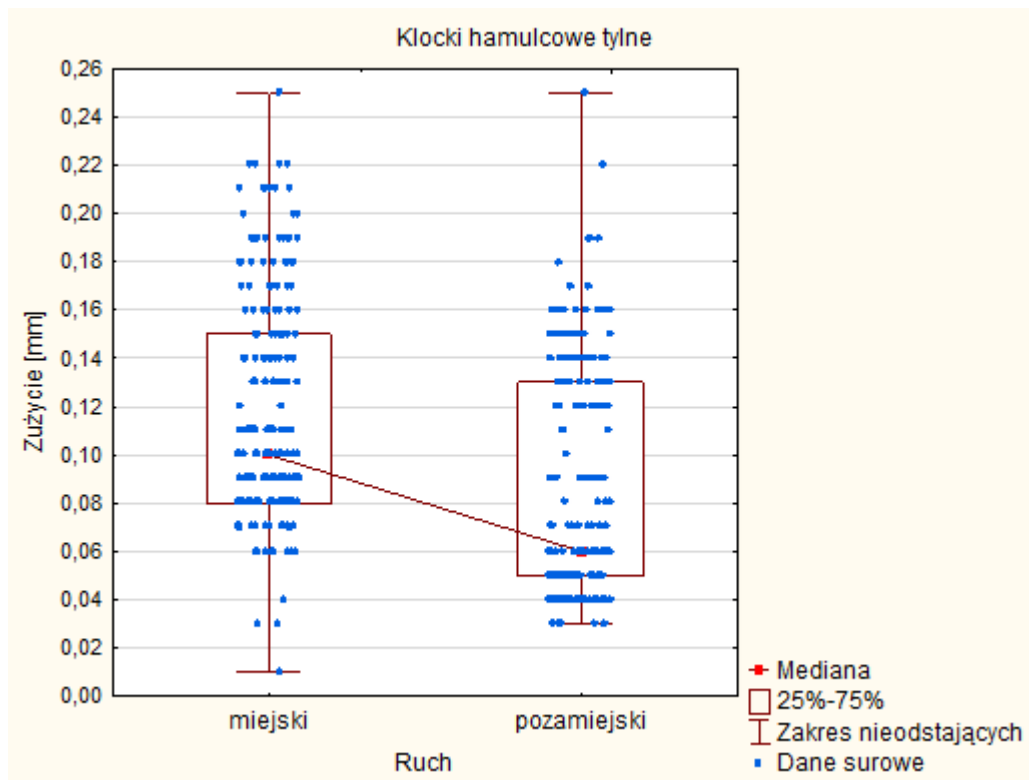
Otrzymana wartość $p < 0,001$ w teście Manna-Whitney'a oznacza istotny wpływ czynnika 'Ruch', co potwierdza wykres ramkowy zużycia tarcz hamulcowych tylnych,

dla którego mediany zużycia w ruchu miejskim i pozamiejskim wynoszą odpowiednio 0,05 mm i 0,03 mm (rys. 9).



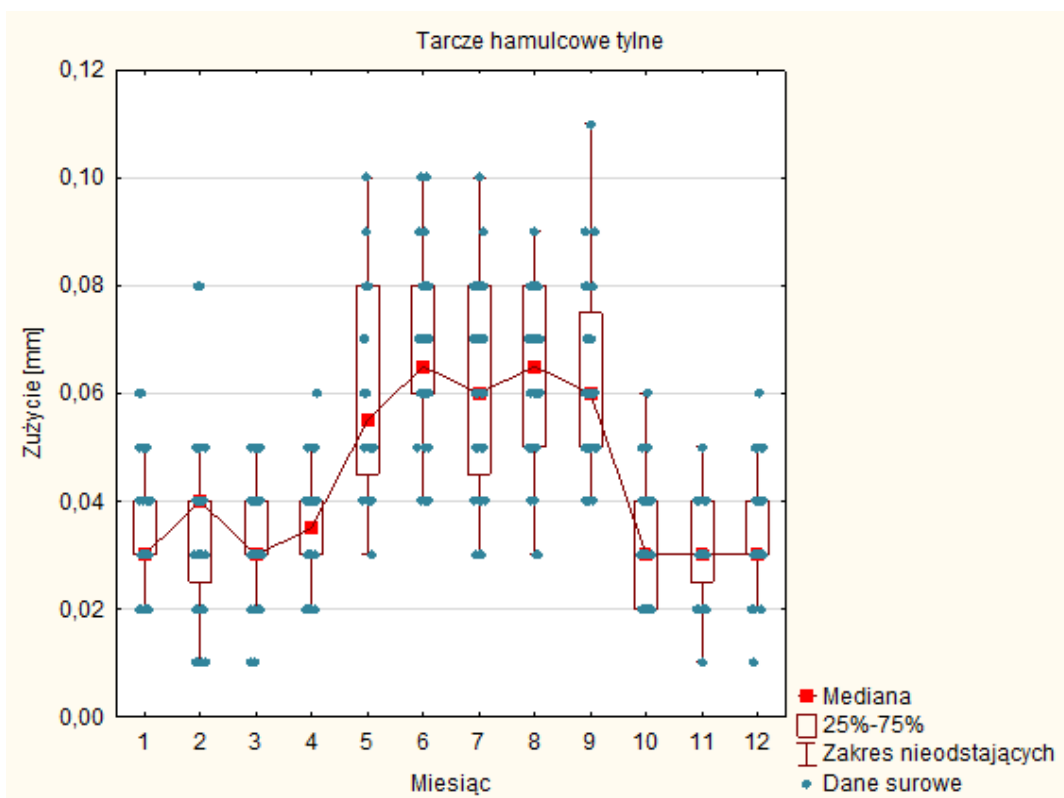
Rysunek 9. Zużycie tarcz hamulcowych tylnych w zależności od rodzaju ruchu

Dla klocków hamulcowych tylnych również zużycie jest różne dla ruchu miejskiego i pozamiejskiego. W tym przypadku mediany zużycia wynoszą odpowiednio 0,10 mm i 0,06 mm (rys. 10).



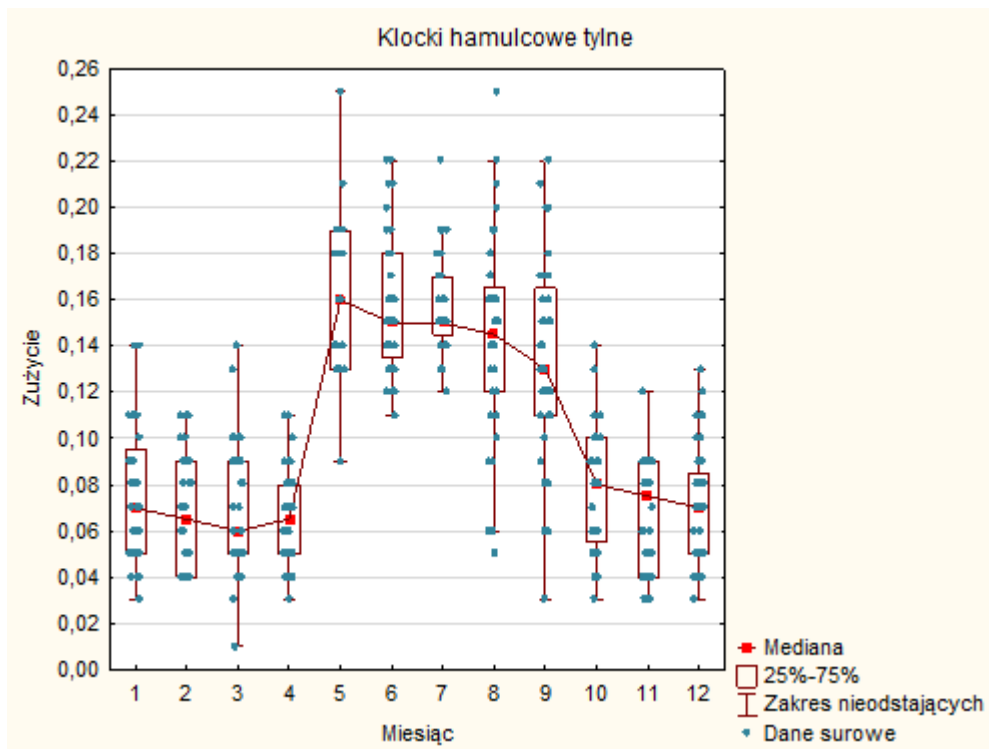
Rysunek 10. Zużycie klocków hamulcowych tylnych w zależności od rodzaju ruchu

Istotne oddziaływanie czynnika 'Miesiąc' potwierdzają wyniki testu Kruskala-Wallisa. Dla tarcz hamulcowych przednich otrzymano wynik $p < 0,001$, uniemożliwiający przyjęcie hipotezy zerowej (tab. 9). Na wykresie zużycia w poszczególnych miesiącach kalendarzowych widać wyraźnie dwa różne okresy (rys. 11).



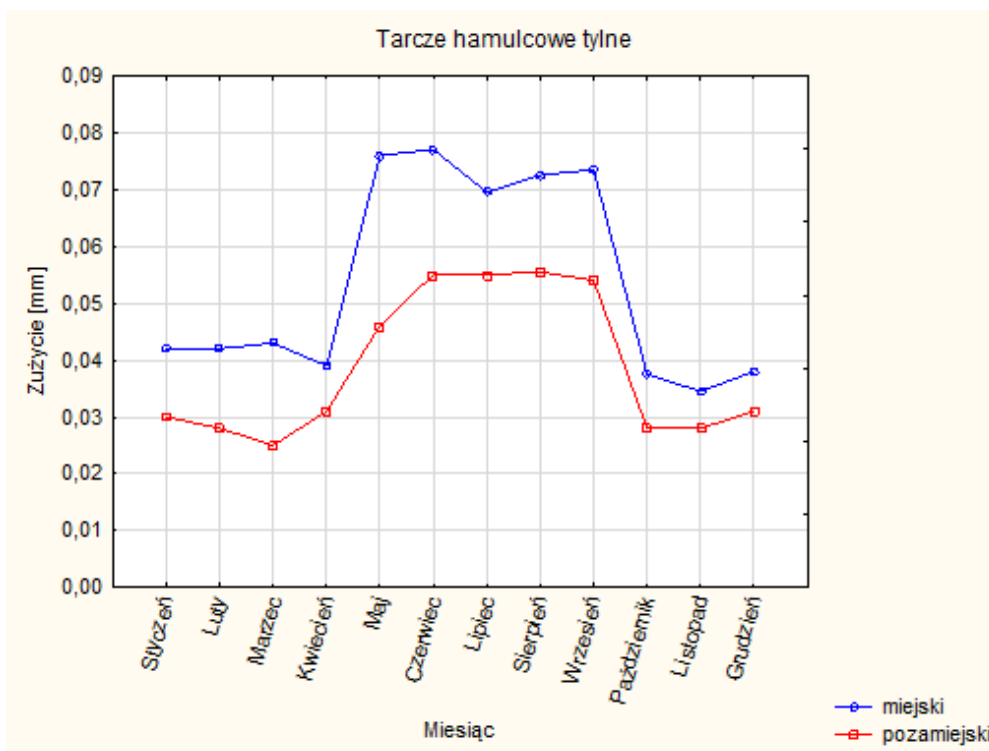
Rysunek 11. Zużycie tarcz hamulcowych tylnych w zależności od miesiąca

Podobnie dla klocków hamulcowych tylnych poziom zużycia jest istotnie zależny od miesiąca kalendarzowego, co potwierdza wykres na rys. 12. Największe wartości uzyskano dla miesięcy letnich (od maja do września).



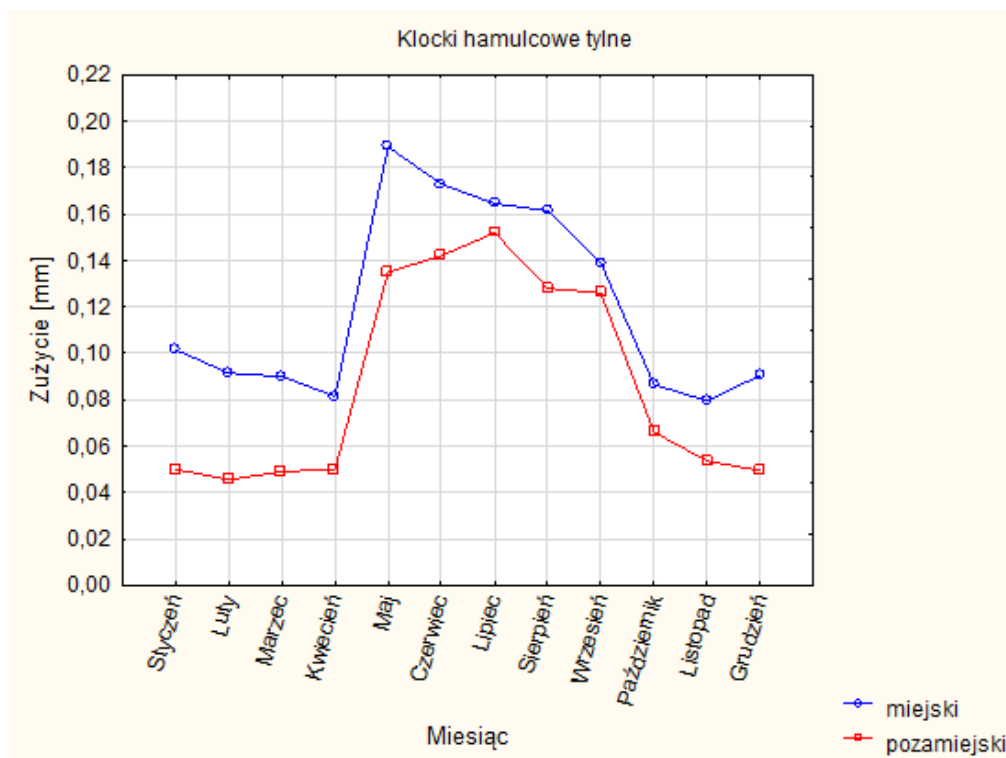
Rysunek 12. Zużycie klocków hamulcowych tylnych zależności od miesiąca

Dopełnieniem przedstawionych analiz są wykresy średniego zużycia, uwzględniające rodzaj ruchu i miesiąc kalendarzowy. Wartości otrzymane dla tarcz hamulcowych tylnych wyraźnie zależą od badanych czynników, widoczne jest także ich wzajemne oddziaływanie (rys. 13).



Rysunek 13. Średnie zużycie tarcz hamulcowych tylnych w zależności od rodzaju ruchu i miesiąca

Interakcja zachodząca pomiędzy rodzajem ruchu i miesiącem kalendarzowym, jak i osobny wpływ każdego z czynników, zauważalny jest również na wykresie zużycia klocków hamulcowych tylnych w zależności od rodzaju ruchu i miesiąca (rys. 14).



Rysunek 14. Średnie zużycie klocków hamulcowych tylnych w zależności od rodzaju ruchu i miesiąca

Wykazano też różnicę średniego zużycia elementów układu hamulcowego przedniego i tylnego (tab. 10). Wynika ona z zastosowania w układzie hamulcowym korektora sił hamowania (w nowszych modelach funkcję taką pełni system ABS – z ang. *Anti-Lock Braking System*), którego rolą jest zapewnienie właściwych proporcji między obciążeniem przedniej i tylnej osi pojazdu, a siłami hamowania, uzyskiwanymi na tych osiach (tab.10).

Tabela 10. Średnie miesięczne wartości zużycia badanych elementów układu hamulcowego.

Element układu hamulcowego	Rodzaj ruchu	Średnia wartość zużycia [mm]	Różnica poziomu zużycia [%]
Klocki hamulcowe przednie	miejski	0,473	24,87
Klocki hamulcowe tylne		0,118	
Klocki hamulcowe przednie	pozamiejski	0,400	21,19
Klocki hamulcowe tylne		0,085	
Tarcze hamulcowe przednie	miejski	0,126	41,92
Tarcze hamulcowe tylne		0,053	
Tarcze hamulcowe przednie	pozamiejski	0,090	43,06
Tarcze hamulcowe tylne		0,039	

Nierównomierny rozkład sił hamowania powoduje, że zużycie elementów przednich jest większe. Dla klocków hamulcowych różnica wynosi ponad 20%, dla tarcz hamulcowych ponad 40%.

4. Wnioski

- 1) Przeprowadzona analiza statystyczna pokazuje, że na zużycie badanych elementów układu hamulcowego istotny wpływ ma rodzaj ruchu pojazdu, jak również czas kalendarzowy realizacji przejazdu (pora roku). Przeprowadzone testy nieparametryczne wskazują, że zużycie jest zdecydowanie większe w miesiącach letnich, kiedy odnotowywana jest wysoka temperatura otoczenia, a także wówczas, kiedy transport realizowany jest w ruchu miejskim.
- 2) Wyniki przeprowadzonej równoległej analizy wariancji ANOVA były w większości zgodne z wynikami testów nieparametrycznych (dla wszystkich elementów, przeciętne zużycie było istotnie większe w ruchu miejskim niż w pozamiejskim).
- 3) Utylitarny charakter przeprowadzonych analiz pozwala na wskazanie obszarów doskonalenia pojazdów, a szczególnie ich elementów (części zamiennych) w aspekcie podnoszenia poziomu bezpieczeństwa.
- 4) Analizy zużycia elementów układu hamulcowego mogą wspierać procesy optymalizacji planowania przewozów. Na przykładzie badanego przedsiębiorstwa warto rozważyć cykliczne zmiany rodzaju (środowiska) ruchu pojazdów. Przewozy wyłącznie w ruchu miejskim, powodują nadmierne obciążenie układu, intensywniejsze zużywanie podzespołów i częstsze wymiany.

Literatura

1. Alrabghi A., Tiwari A. State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems. *Computers & Industrial Engineering* 2015; 82: 167-182.
2. Andrzejczak K, Młyńczak M, Selech J. Poisson-distributed failures in the predicting of the cost of corrective maintenance. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (4): 602–609.

3. Andrzejczak K., Selech J., Investigating the trends of average costs of corrective maintenance of public transport vehicles, *Journal of KONBiN* 41 (2017): 207-216.
4. Andrzejczak K., Młyńczak M., Selech J. Assessment model of operational effectiveness related to newly operated public means of transport. *Safety and Reliability – Theory and Applications – Cepin & Briš (Eds) (2017): 3455-3460.*
5. Andrzejczak K., Orczyk M., Tomaszewski F. „Metodyczne aspekty analizy hałasu wewnętrznego w środkach transportu miejskiego”, 9-18, *Prace Naukowe – Transport*, z. 114.
6. Andrzejczak K., Selech J.: Quantile analysis of the operating costs of public transport fleet, *Transport Problems*, vol. 12 (3), 103-111, 2017.
7. Borawski A. Suggested Research Method for Testing Selected Tribological Properties of Friction Components in Vehicle Braking Systems. *Acta Mechanica et Automatica* 2016; 10(3):223-226.
8. Chłopek Z, Suchocka K, Zawistowski A. Comparative examination of disc brake friction pairs with brake pads of different types in respect of their tribological properties. *The Archives of automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji*. 2016; 72(2): 15-28.
9. De Almeida A. T., Cavalcante C. A. V., Alencar M. H., Ferreira R. J. P., de Almeida-Filho A. T., & Garcez T. V. *Multicriteria and multiobjective models for risk, reliability and maintenance decision analysis (Vol. 1)*. Springer International Publishing, 2015.
10. Gajek A., Szczypiński-Sala W. Wybrane własności tribologiczne okładzin ciernych hamulców tarczowych. *The Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji* 2012; 57(3): 119-132.
11. Jacyna M. *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.
12. Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K., Karoń G. Noise and environmental pollution from transport: decisive problems in developing ecologically efficient transport systems. *Journal of Vibroengineering* 2017; 19(7): 5639-5655.
13. Jacyna M., Żak J. Simulation models in testing reliability of transport process, *Journal of KONBiN* 2016;1(37): 203 – 230.
14. Karczewski M., Szczęch L. Influence of the F-34 unified battlefield fuel with bio components on usable parameters of the IC engine. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 18 (3): 358–366.
15. Krupa M. *Wpływ temperatury na wartość współczynnika tarcia samochodowych hamulców ciernych*. Gliwice: Politechnika Śląska, 2008.
16. Mattsson L. G., Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems—a discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 2015; 81: 16-34.
17. Merkisz-Guranowska A., Pielecha J. *Emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych a parametry ruchu drogowego*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2014.
18. Niewczas A., Koszałka G., Wrona, J., Pieniak, D. Chosen aspects of municipal transport operation on the example of the city of Lublin. *Transport* 2008; 23(1): 88–90.
19. Nowakowski T. *Niezawodność systemów logistycznych*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
20. Nowakowski T. Problems of reliability modelling of multiple-phased systems. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance And Reliability* 2011; 4: 79-84.
21. Piątkowski P., Grajper M., Lewkowicz, R. Badania wpływu wybranych cech materiałowych okładzin ciernych na efektywność tarczowego mechanizmu hamulcowego. *Logistyka* 2014; 6: 8559 – 8571.

22. Rymarz J., Niewczas A., Krzyżak A. Comparison of operational availability of public city buses by analysis of variance. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 18 (3): 373–378.
23. Tokaj P. Zużycie par ciernych hamulców w wybranych typach pojazdów szynowych. *Prace Instytutu Kolejnictwa* 2017; 155: 29-35
24. Wasiak M., Jacyna M., Lewczuk K., Szczepański E., The method for evaluation of efficiency of the concept of centrally managed distribution in cities. *Transport* 2017; 32(4): 348-357.
25. Wojciechowski A., Sobczak J. Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych. Warszawa: Instytut Transportu Samochodowego, 2001.
26. Zio, E. The future of risk assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018; 177: 176-190.
27. Żyłuk A., Żurek J. Modelowanie systemów. *Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych* 2013; 32: 219 – 236.