

Article citation info:

ŚWIDERSKI A, BORUCKA A, JACYNA-GOŁDA I, SZCZEPAŃSKI E. Wear of brake system components in various operating conditions of vehicle in the transport company. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2019; 21 (1): 1–9, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.1.1>.

Andrzej ŚWIDERSKI
Anna BORUCKA
Ilona JACYNA-GOŁDA
Emilian SZCZEPAŃSKI

WEAR OF BRAKE SYSTEM COMPONENTS IN VARIOUS OPERATING CONDITIONS OF VEHICLE IN THE TRANSPORT COMPANY

PRZEBIEG ZUŻYCIA ELEMENTÓW UKŁADU HAMULCOWEGO W ZRÓŻNICOWANYCH WARUNKACH EKSPLOATACJI SAMOCHODU W PRZEDSIĘBIORSTWIE TRANSPORTOWYM*

Effective fleet management is related to the care for their rational use and proper diagnostics. Early detection of potential irregularities enables to prevent failures and carry out transport processes in an undisturbed way. One of the most important components, from the safety point of view, is the braking system. Laboratory tests can be used to determine the durability characteristics of individual components. Individual indications referring to operating conditions would be most desirable. The article, based on a two-year period of testing of a group of Renault vehicles fitted with disc brakes, presents measurement of wearing and tearing the system components (brake discs and brake friction insert) in a function of selected factors, depending on the time and environment in which the transport was carried out. Nonparametric statistical tests were used to analyze the results. Mann-Whitney and Kruskal-Wallis tests were used to verify the hypothesis on the insignificance of differences. Their results were compared with the results of ANOVA variance analysis. The significance of factors influencing the degree of brakes wear was checked. Possible directions of using the results of brake wear measurement for rationalization of transport processes were also indicated. Presented method may also be applied to the evaluation of other components (assemblies, subassemblies, systems) of motor vehicles.

Keywords: car exploitation, wear of brake system components, influence of usage conditions.

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 użytkowania 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.

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

1. Introduction

Hitherto, the optimization of transport systems has been primarily focused on the economic issues [2, 6, 24]. In recent years, the trend of planning activities based on decision-making models, taking into

account the negative impact of transport on the environment (e.g. pollutants emission [17], noise [5] or road safety [12]) is noticeable. Customer satisfaction and proper quality of services are also emphasized [4]. It is ensured by maintaining high readiness [20] and reliability of the entire transport system [18, 19], as well as its individual compo-

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

nents, e.g. the engine [14]. Simulation models are also being developed, enabling to analyze systems which are different in scale and functions, as well as taking into account in them the sensitivity [16] and flexibility issues [1, 9]. As a result, the number of disturbances in the system is lower (adverse effects caused by, for example, defect of the transport means) and lower costs of its operation. The concept of risk is also underlined. The suitability of vehicles in the aspect of their basic safety systems, such as the brake system, reduces the likelihood of hazards that may interrupt the operation of the transport system. Also in this respect, the interest of scientists and practitioners is noticeable [26].

The analysis of the impact of various factors on the wear of brake system components presented in the literature is generally referred to the results of laboratory tests (bench tests). It most often concerns the materials from which the discs were made [25], brake pads [21], as well as the mutual interaction of the friction pair in various operating conditions [8, 23]. For example, the article [10] presents the results of experiments aimed at examining the impact of model ambient conditions on the friction coefficient of a friction pair of a disc brake. The influence of various operating conditions (brake disc rotational speed, number of braking cycles) and external factors (appearance of water and brake fluid in the friction area) was analyzed confirming their significance, while the research work [7] was the influence on friction elements of the vehicle brakes, of the factors stemming from their working environment (humidity and temperature), resulting in a change in the braking force. Also in the article [15] a significant influence of the temperature of the friction pair on the friction coefficient was demonstrated.

The authors of the analyzed publications described their achievements mainly in relation to the results of laboratory tests (e.g. laboratory analyzes of the friction pair temperature). They did not present outcomes of the research carried out under real operating conditions, taking into account the natural environment of vehicle operation, impact of the traffic in which they operate, or the impact of the calendar month, on the wear of the brake system components. A gap was found in terms of the research on the impact of the season (which in the analyzed climate is subject to cyclical changes in the form of seasons characterized by relatively constant weather conditions), as well as the impact of urban traffic (due to greater driving dynamics) on the wear of brake system elements. One can only assume that high values of ambient temperature are conducive to the increase of the operating temperature of the elements. Determining by the manufacturer acceptable consumption standards does not take into account their individual operating conditions and does not suggest how to shape them, whereas such information is important for both the vehicle user and the manufacturer providing the guarantee.

The purpose of this work was to evaluate the impact of the operating conditions on the wear of the brake system components in the process of car operation by a transport company.

2. Test method

The research covered a homogeneous group of vehicles performing similar transport tasks in two different traffic environments (urban and extra-urban). The vehicles' tires were of the same type. The items tested were original in all vehicles. The data made available related to the wear measurements of the selected brake system elements and allowed only to perform analyzes regarding the impact of traffic type and calendar month, omitting other factors, such as exact vehicle load, driving style or usage intensity expressed in kilometres. The rationale for the omission of the influence of these factors is the fact that the research concerned a fleet of new vehicles, purchased at the same time, with constant output parameters.

The data collected concerned two years of operation. They were registered from May 2016 till April 2018, on a monthly basis. The re-

Table 1. Results of brake discs measurement and calculated wear

Calendar month	Measurement of element's thickness [mm]	Element's wear [mm]
5	24	
6	23.9	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

Table 2. Measurement data after conversion

Calendar month	Element's wear in urban traffic [mm]	Vehicle no.
6	0.38	1
6	0.32	2
6	0.47	3
6	0.42	4
6	0.4	5
6	0.52	6
6	0.55	7
6	0.43	8
6	0.53	9
6	0.5	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

search group consisted of 20 Renault Kangoo vehicles. Half conducted transport work in urban traffic (vehicles 1-10), the others operated outside the city (vehicles no. 11-20). The measurements were made using an external analogue micrometer with a measuring range from 0.1 mm to 25 mm and a reading accuracy of 0.01 mm. The thickness of the four essential components of the brake system was measured: front and rear brake discs and front and rear brake pads. For each element, 4-5 measurements were made, the thickness of the tested elements was determined as arithmetic means from several measurements and then the average value of wear was calculated. The procedure, using brake discs as an example, is presented in Table 1. Each line of the table applies to an individual vehicle. All studies were conducted using Statistica program.

The resulting sheets were converted by arranging numerical values for all vehicles in two traffic types (urban and extra-urban). A

fragment of the created measurement sets (for the friction pad of the front brakes) is shown in Tab. 2.

3. Test results

3.1. Initial analysis

In order to present the collected data and determine basic measures of the descriptive statistics, allowing to summarize the data set and to draw basic conclusions and generalizations about the collected sample, a statistical analysis was performed of the measured data collected on the Renault Kangoo brake systems. The results obtained are given in Tab. 3.

Table 3. Basic descriptive statistics of tested components wear

Element	Descriptive statistics									
	Traffic type	Number of observations	Mean [mm]	Median [mm]	Min. [mm]	Maks. [mm]	Std. Dev. [mm]	Var -co. [%]	Skewness	Kurtosis
Front brake friction pads	urban	220	0.47	0.47	0.27	0.69	0.08	16.10	0.39	0.36
Front brake friction pads	extra-urban	230	0.40	0.41	0.18	0.69	0.10	25.78	-0.09	-0.43
Rear brake friction pads	urban	230	0.12	0.10	0.01	0.25	0.05	38.94	0.62	-0.49
Rear brake friction pads	extra-urban	230	0.08	0.06	0.03	0.25	0.05	55.46	0.70	-0.73
Front brake discs	urban	220	0.13	0.11	0.02	0.25	0.05	39.38	0.66	-0.46
Front brake discs	extra-urban	230	0.09	0.07	0.04	0.18	0.04	39.50	0.64	-0.92
Rear brake discs	urban	230	0.05	0.05	0.02	0.11	0.02	38.04	0.65	-0.67
Rear brake discs	extra-urban	230	0.04	0.03	0.01	0.08	0.02	43.83	0.56	-0.43

The number of observations included in the analysis, due to the removal of negative values resulting from the replacement of an element with a new one, is different for individual elements. Central tendency measures are similar. The analysis of distribution variability was carried out without considering the impact of the calendar month, therefore the values obtained are large (e.g. the variation coefficient for the rear brake friction pads element is $V = 56\%$). This shows that the impact of the season on the wear process can be significant. The wear distribution of friction pads of the front brake in extra-urban

traffic is characterized by left-sided asymmetry (negative skewness). Thus, the majority of observations take values below the mean. In the remaining distributions (positive skewness coefficient), the asymmetry is right-handed: the majority of observations are above average. Positive value of the front brake friction pad wear distribution kurtosis indicates that it is more concentrated than the normal distribution (leptokurtic distribution). The negative value of the kurtosis of remaining brake system elements distribution means that the measurement results are less concentrated compared to the normal one (platykurtic distribution).

The homogeneity of the sample was evaluated by the significance analysis of the 'Vehicle' factor. Due to the lack of compliance with the assumptions for the ANOVA analysis, the Mann-Whitney test

was used for all vehicles' pairs. Most of the p -values obtained were higher than the assumed level of significance $\alpha = 0,05$, therefore no significant differences were found between the wear of elements of the brake system in the individual vehicles. Selected results of the analysis conducted are presented in Tab. 4.

Similar level of the brake system elements wear in the sample of cars for a given type of traffic is confirmed by the example charts. Fig. 1 shows the wear of the front brake discs in the urban traffic, while in Fig. 2 – rear friction pads in extra-urban traffic.

Table 4. Results of Mann-Whitney test for a component of rear brake discs in vehicles in urban traffic

Vehicle No.	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	p -value for the Mann-Whitney test								
1	0.0679	0.6476	1.0000	0.8278	0.7940	0.9653	0.9480	0.8790	0.6953
2		0.2560	0.0526	0.2127	0.1679	0.3049	0.2749	0.3049	0.1422
3			0.5420	0.9826	0.7441	1.0000	0.8962	1.0000	0.6476
4				0.6633	0.9480	0.8448	0.8618	0.7773	0.8790
5					0.8109	1.0000	0.8278	1.0000	0.6013
6						0.7773	0.9653	0.8278	0.6953
7							0.6476	0.9307	0.5420
8								0.6953	0.7441
9									0.5713

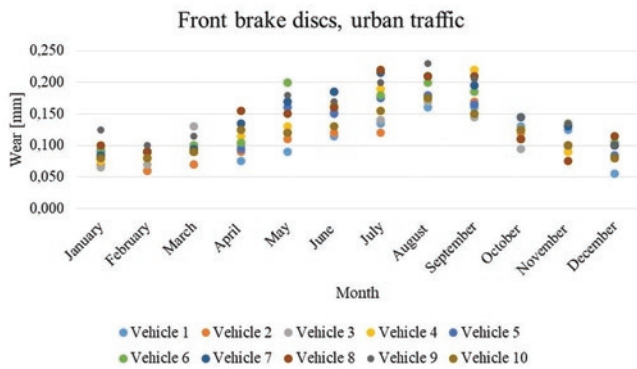


Fig. 1. Wear of the front brake discs in urban traffic for 1-10 vehicles

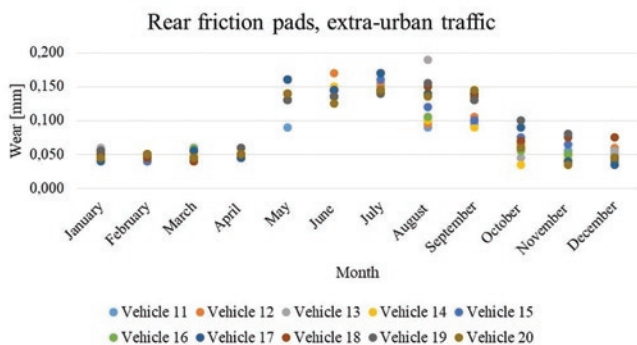


Fig. 2. Wear of the rear friction inserts in non-urban traffic for 11-20 vehicles

The research hypothesis assumes that the wear of the brake system elements depends on the type of traffic (environment) in which the vehicle operated (urban, extra-urban) and the calendar month (season). It was assumed that the impact of these variables is important. The verification allows the ANOVA variance analysis. Its implementation is possible after meeting the requirements, which include the normality of distributions in all k sets, and the equality of their variances [22].

Table 5. Results of the Shapiro-Wilk test for rear brake friction insert component

No.	Month	Shapiro-Wilk Statistics	p-value
1.	January	W = 0.9105	p = 0.0039
2.	February	W = 0.8663	p = 0.0002
3.	March	W = 0.9444	p = 0.0488
4.	April	W = 0.9496	p = 0.0733
5.	May	W = 0.9395	p = 0.2349
6.	June	W = 0.9687	p = 0.3262
7.	July	W = 0.9643	p = 0.2334
8.	August	W = 0.9829	p = 0.7968
9.	September	W = 0.9815	p = 0.7455
10.	October	W = 0.9618	p = 0.1932
11.	November	W = 0.8981	p = 0.0017
12.	December	W = 0.9389	p = 0.0317

In the analyzed sample there are groups defined by the grouping variables: 'Traffic' and 'Month'. The analysis of the normality of distributions for the grouping variable 'Traffic' using Shapiro-Wilk test showed that the zero hypothesis H_0 assuming their normality should be rejected. All obtained p -value results were lower than the assumed level of significance $\alpha = 0,05$. For the grouping variable 'Month', only a few did not meet this assumption. Sample results of the Shapiro-Wilk test, for the rear friction brake pads, are shown in Tab. 5.

The homogeneity of the variance was verified by means of the Levene test and the Brown-Forsythe test, which assume in the H_0 hypothesis the homogeneity of the variance between the tested samples. According to the results for urban and extra-urban traffic (Tab. 6), only for the rear brake friction pads the uniformity of variance between the tested samples was confirmed, while for the remaining parts of the vehicle a rejection of H_0 is necessary.

The same analysis was carried out for groups defined by calendar months. Selected results for the front brake discs are presented in Tab. 7.

For each of the four examined elements, the collected data violates the analysis of variance ANOVA requirements (both assuming normality of residual distribution and homogeneity of variance). For this reason, it was decided to perform nonparametric tests, for each factor separately and without taking into account mutual interactions, which are well defined only in the variance analysis. For this purpose, alternative tests were used, which did not require meeting a number of requirements for parametric tests. In order to verify the hypothesis about the irrelevance of differences between two independent groups, the Mann-Whitney test was used, while for the factor of at least three levels, the Kruskal-Wallis test was used. The null hypotheses in both cases assume that the samples come from one population, which amounts to verifying the irrelevance of differences between average ranks for compared groups (sometimes simplified to medians).

Because the ANOVA variance analysis is somewhat resistant to violation of its assumptions, and the probability of making type I and type II errors is smaller, it was decided to conduct this study in parallel, for purposes of comparison, being aware that the obtained results should be treated as indications and rely on the results of non-parametric tests. The analyzes performed were presented separately for the front elements of the brake system (discs and friction pads of the front brake) and rear ones (discs and friction pads of the rear brake).

3.2. Testing front components of the brake system

According to the above considerations, non-parametric tests were carried out for the defined groups. Mann-Whitney test was used for the division by the type of traffic participated in (urban, extra-urban) and the Kruskal-Wallis test for groups resulting from particular months. The results obtained are presented in the Tables below. The Tab. 8 compiles calculations for front brake discs and friction pads.

The results obtained indicate that the influence of all the distinguished factors on the degree of wear, both of the discs and friction pads of the front brake, is significant. The p -values obtained testify that for the 'Traffic' factor which, in the Mann-Whitney test for both elements of the system, reached the p -value < 0.001 . The relationship for the front brake discs is confirmed by the frame graph (Figure 3) and the wear median values, which are 0.11 mm and 0.07 mm respectively for urban and extra-urban traffic.

The degree of wear of the front friction pads is also dependent on the environment in which the driving is taking place – Fig. 4. The consumption medians in the urban and extra-urban traffic amounted to 0.47 mm and 0.41 mm, respectively.

The p -values < 0.001 obtained in the Kruskal-Wallis test for the analysis of the 'Month' factor (Tab. 8), confirm its significance in the wearing process of both front discs and friction pads. This level is changing over the next months. For front brake discs, wear is

Table 6. Results of the Levene and Brown-Forsythe tests for urban and non-urban traffic

Variable	Average urban	Average extra-urban	Levene'a F(1,df)	df Levene'a	p Levene'a	Brn-Fors F(1,df)	df Brn-Fors	p Brn-Fors
Front friction pads	0.47	0.40	27.97	448	0.0000	25.20	448	0.0000
Rear friction pads	0.12	0.08	2.59	458	0.1081	0.37	458	0.5418
Front discs	0.13	0.09	22.39	448	0.0000	14.57	448	0.0002
Rear discs	0.05	0.04	12.38	458	0.0005	5.16	458	0.0236

Table 7. Results of the Levene and Brown-Forsythe tests for chosen month for front brake discs

Test/ p-value	January		February	
	Levene'a	Browna-Forsythe'a	Levene'a	Browna- Forsythe'a
January	-	-	0.5958	0.7625
February	0.5958	0.7625	-	-
March	0.2986	0.2526	0.1229	0.1361
April	0.0093	0.0215	0.0022	0.0088
May	0.0780	0.1039	0.0259	0.0468
June	0.0002	0.0014	0.0000	0.0006
July	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
August	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
September	0.0018	0.0013	0.0004	0.0004
October	0.0000	0.0042	0.0000	0.0018
November	0.0002	0.0024	0.0000	0.0008
December	0.3674	0.4920	0.1441	0.3033

Table 8. Results of the factors significance for brake discs and rear friction insert component

Factor	Front brake discs		Front friction pads	
	ANOVA p-value	MW/KW test p-value	ANOVA p-value	MW/KW test p-value
Traffic	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Month	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Vehicle (Traffic) Vehicle	< 0.001	< 0.001	0.066	< 0.001
Month x Traffic	< 0.001	-	0.010	-

higher from May to September and decreases from October to April (Figure 5).

Similar, though less varied, results were obtained for the front friction pads. Their monthly consumption is also the highest from May to September, which confirms the significant impact of the calendar month (Figure 6).

The level of wear of the front elements of the brake system, both discs and pads, is therefore significantly conditioned by the environment in which the transport is conducted. Higher indications were obtained for urban traffic compared to driving outside the city.

The graphs show observations that could be considered unusual, but due to a small sample, they could not be unambiguously analyzed, which is why they took part in the test.

The calculated significance of the interaction between the factors: 'Month' and 'Traffic' (Tab. 8) indicates that their combined effect is not the same as the sum of the impacts of each individually. A multiplied impact on the wear of the tested elements in the vehicles travelling in the city traffic during the summer months should be expected. This is confirmed by the graph of average wear of the front brake discs, depending on the type of traffic and the month, shown in Fig 7.

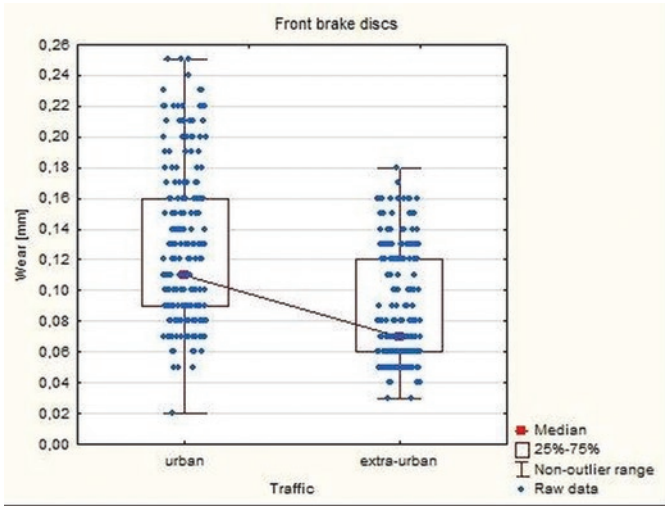


Fig. 3. Wear of the front brake discs component depending on the type of traffic

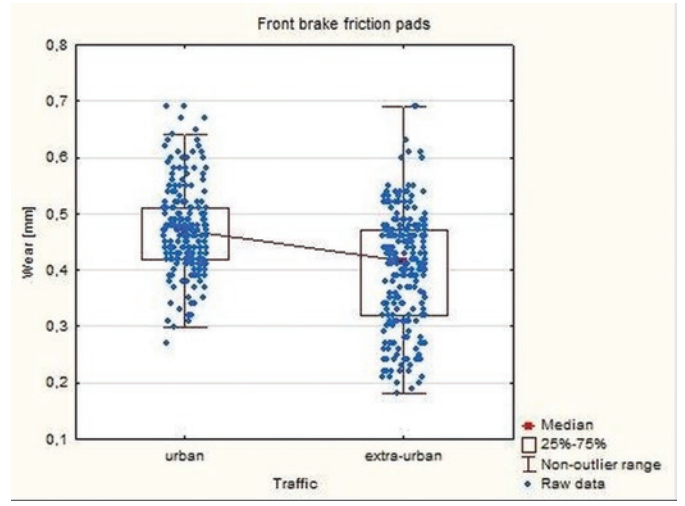


Fig. 4. Wear of the front brake friction insert component depending on the type of traffic

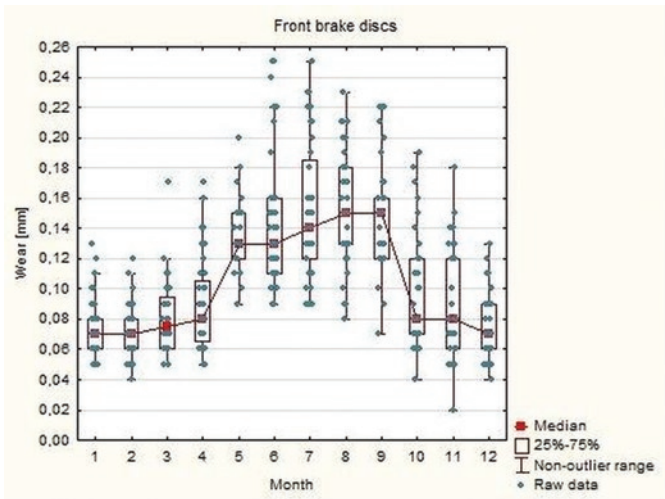


Fig. 5. Wear of the front brake discs component depending on the month

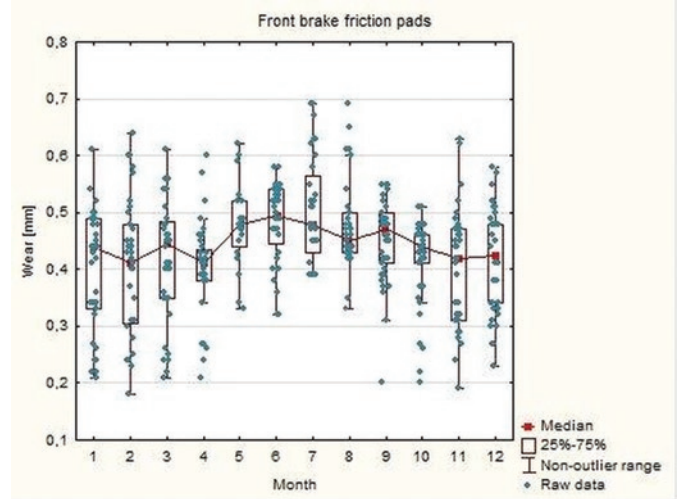


Fig. 6. Wear of the front brake friction insert component depending on the month

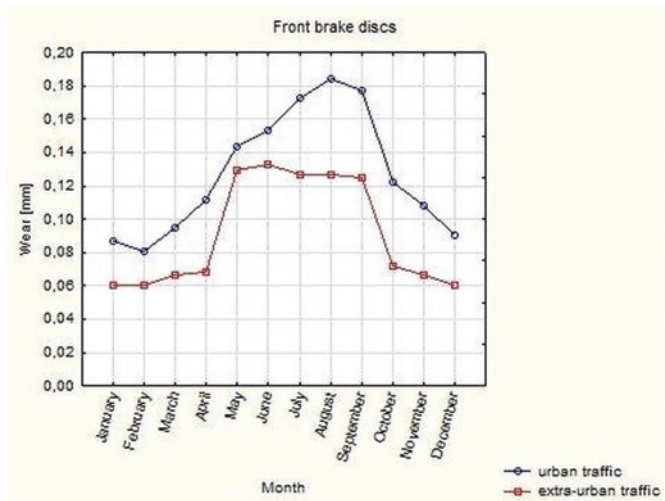


Fig. 7. Average wear of the front brake discs component depending on the type of traffic and month

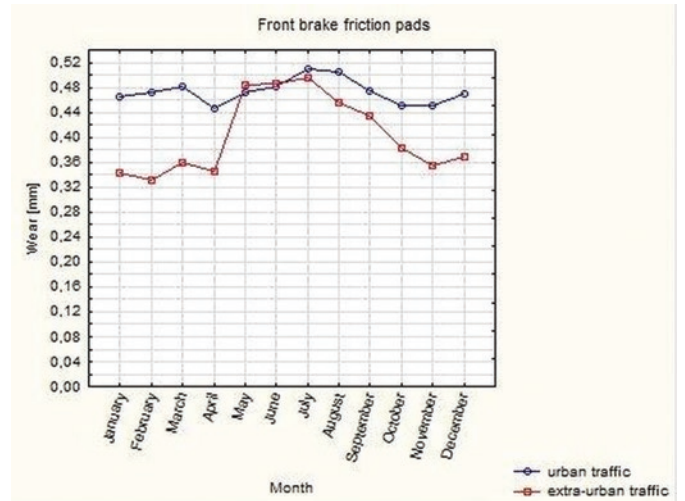


Fig. 8. Average wear of the front brake friction insert component depending on the type of traffic and month

Similarly, on the graph of average wear of the front friction pads, depending on the type of traffic and month (Fig. 8), a clear interaction

is visible. Its absence would result in equidistant pairs of points for the same month.

3.3. Testing of the rear components of the brake system.

The conclusions from the analysis of the rear components of the brake system are similar to those for the front components. The results of the conducted statistical tests obtained also indicate the existing dependence of their wear on the examined factors. The results of significance tests for individual factors, with respect to wear, are presented in Tab. 9.

Table 9. Results of the factors significance for brake discs and rear friction insert component

Factor	Front brake discs		Front friction pads	
	ANOVA p-value	MW/KW test p-value	ANOVA p-value	MW/KW test p-value
Traffic	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Month	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Vehicle (Traffic) Vehicle	0.005	< 0.001	0.089	< 0.001
Month x Traffic	0.001	-	< 0.001	-

The obtained p -value < 0.001 in the Mann-Whitney test means a significant influence of the ‘Traffic’ factor, which is confirmed by the frame graph of the rear brake discs wear, for which the wear medians in the urban and extra-urban traffic are 0.05 mm and 0.03 mm respectively (Fig. 9).

For the rear friction pads also, the wear is different for urban and extra-urban traffic. In this case, the medians of wear are 0.10 mm and 0.06 mm respectively (Figure 10).

The significant impact of the ‘Month’ factor is confirmed by the results of the Kruskal-Wallis test. For the front brake discs the p -value < 0.001 result received prevented the adoption of the null hypothesis (Tab. 9). The wear graph shows two different periods in the individual calendar months (Figure 11).

Similarly for the rear friction pads, the level of wear is significantly dependent on the calendar month, which is confirmed by the graph in Fig. 12. The highest values were obtained for summer months (from May to September).

The analyzes presented are complemented by the charts of average wear, taking into account the type of traffic and the calendar month. The values obtained for the rear brake

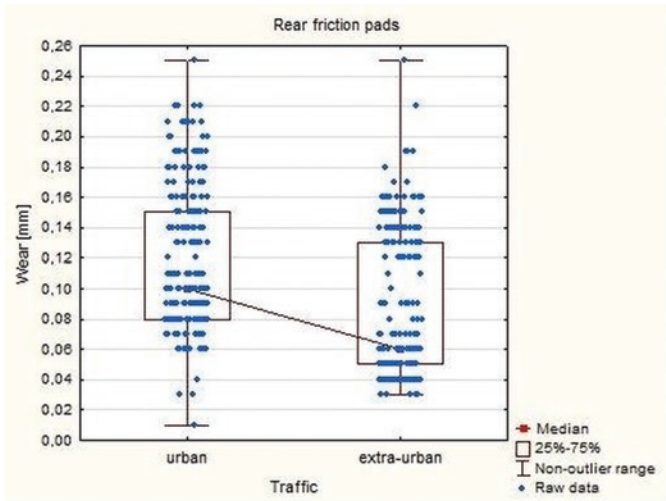


Fig. 9. Wear of the rear brake discs component depending on the type of traffic

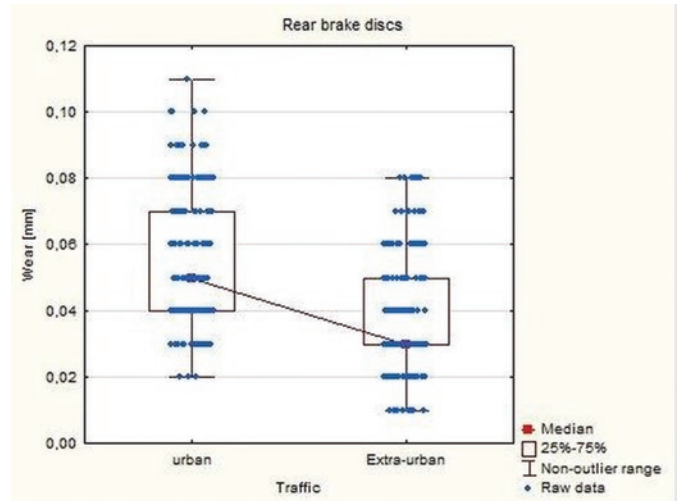


Fig.10. Wear of the rear friction insert component depending on the type of traffic

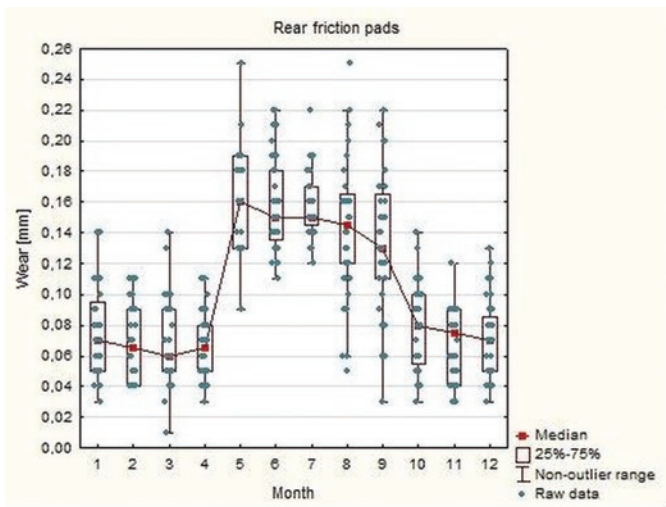


Fig. 11. Wear of the rear brake discs component depending on the month

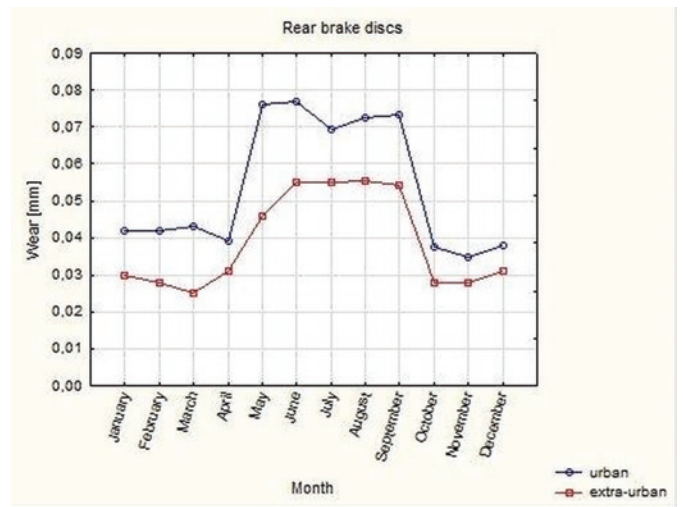


Fig. 12. Wear of the rear friction insert component depending on the month

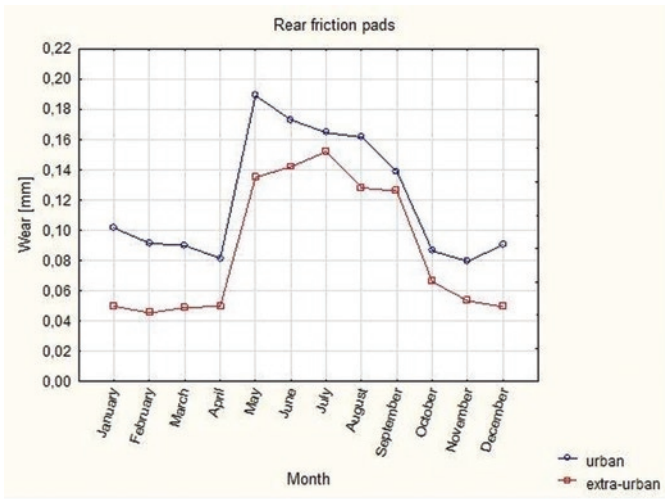


Figure 13. Average wear of the rear brake discs component depending on the type of traffic and month

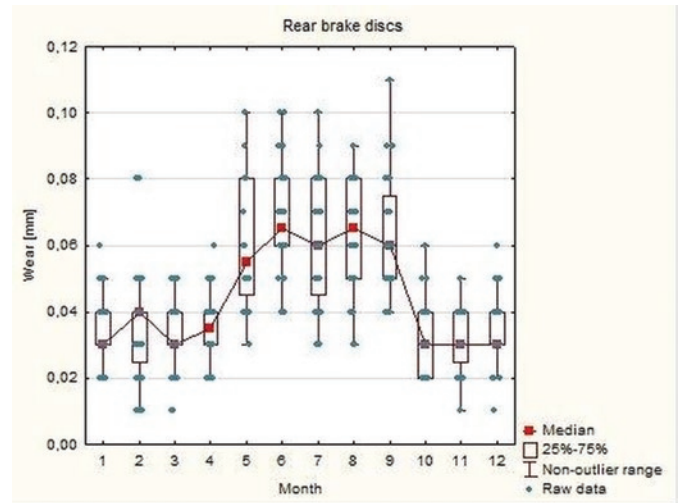


Figure 14. Average wear of the rear friction insert component depending on the type of traffic and month

Table 10. Average wear values of all tested components of the braking system

Brake system component	Traffic type	Average wear value [mm]	Difference in the wear level [%]
front friction pads	urban	0.4733	24.87
rear friction pads	urban	0.1177	
front friction pads	extra-urban	0.3998	21.19
rear friction pads	extra-urban	0.0847	
front brake discs	urban	0.1258	41.92
rear brake discs	urban	0.0527	
front brake discs	extra-urban	0.0896	43.06
rear brake discs	extra-urban	0.0386	

discs are clearly dependent on the factors studied, and their mutual interaction is also visible (Fig. 13).

The interaction between the type of traffic and the calendar month, as well as the separate impact of each factor, is also visible on the wear graph of the rear brake friction pads depending on the type of traffic and the month (Figure 14).

The difference in average wear of the elements of the front and rear brake system was also shown (Tab. 10). It results from the application of the braking force corrector in the brake system (in the newer models this function is performed by the Anti-Lock Braking System – ABS), whose role is to ensure the right balance between the front and rear vehicle axle load and the braking forces obtained on the these axles (Tab.10).

An uneven distribution of braking forces means that the wear of the front elements is greater. For the friction pads, the difference

is over 20%, for brake discs more than 40%.

4. Conclusions

- 1) The statistical analysis carried out shows that the type of vehicle traffic as well as the calendar time of the drive (season of the year) have a significant impact on the wear of the tested elements of the brake system. Non-parametric tests conducted indicate that the impact is much higher in the summer months, when high ambient temperature is recorded, and also when transport is conducted in urban traffic.
- 2) The results of the parallel ANOVA variance analysis were mostly in line with the results of non-parametric tests (for all elements, the average wear was significantly higher in urban traffic than in extra-urban one).
- 3) The utilitarian character of the analyzes conducted allows to indicate the areas for the vehicles improvement, especially their elements (spare parts) in the context of raising the safety level.
- 4) Analyzes of the brake system elements wear may support transport planning optimization processes. Based on the example of the company being researched, it is worth considering cyclical changes of the type (environment) of vehicle traffic. Transport only in the city traffic, cause excessive system load, more intensive wear of components and more frequent replacements.

References

1. Alrabghi A, Tiwari A. State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems. Computers & Industrial Engineering 2015; 82: 167-182, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.022>.
2. Andrzejczak K, Młyńczak M, Selech J. Poisson-distributed failures in the predicting of the cost of corrective maintenance. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2018; 20 (4): 602-609, <https://doi.org/10.17531/ein.2018.4.11>.
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, <https://doi.org/10.1515/jok-2017-0011>.
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* 2017; 12 (3): 103-111.
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, <https://doi.org/10.1515/ama-2016-0034>.
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, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17969-8>.
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, <https://doi.org/10.21595/jve.2017.19371>.
13. Jacyna M, Żak J. Simulation models in testing reliability of transport process, *Journal of KONBiN* 2016; 1(37): 203 - 230, <https://doi.org/10.1515/jok-2016-0010>.
14. Karczewski M, Szczęch L. Influence of the F-34 unified battlefield fuel with bio components on usable parameters of the IC engine. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2016; 18 (3): 358-366, <https://doi.org/10.17531/ein.2016.3.6>.
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, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>.
17. Merksiz-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, <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.88-90>.
19. Nowakowski T. Niezawodność systemów logistycznych. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
20. Nowakowski T. Problems of reliability modelling of multiple-phased systems. *Eksploatacja 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, <https://doi.org/10.17531/ein.2016.3.8>.
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, <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1345005>.
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, <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.04.020>.
27. Żyłuk A, Żurek J. Modelowanie systemów. *Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych* 2013; 32: 219 - 236.

Andrzej ŚWIDERSKI

Motor Transport Institute
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warsaw, Poland

Anna BORUCKA

Military University of Technology, Faculty of Logistics
ul. Gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warsaw 46, Poland

Ilona JACYNA-GOŁDA

Warsaw University of Technology, Faculty of Production Engineering
ul. Narbutta 85, 02-524 Warsaw, Poland

Emilian SZCZEPAŃSKI

Warsaw University of Technology, Faculty of Transport
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland

E-mails: andrzej.swiderski@its.waw.pl, anna.borucka@wat.edu.pl,
ilona.jacyna@gmail.com, eszczepanski@wt.pw.edu.pl

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 ciernej 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 ciernej 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 cierne 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 ciernej). 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

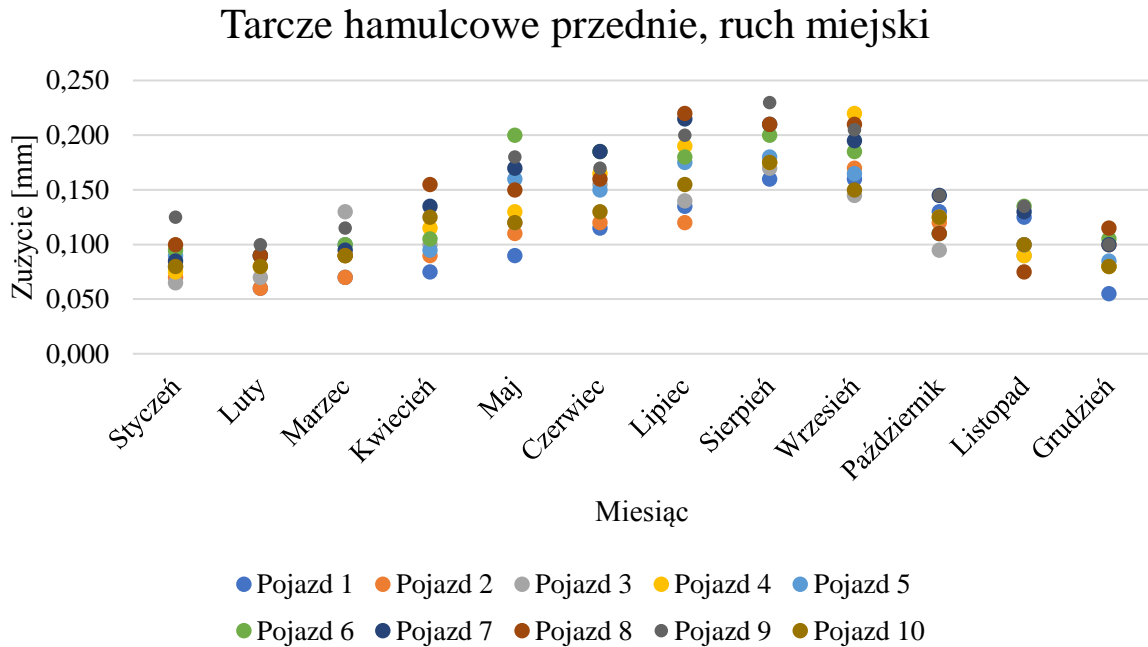
3.1. Analiza wstępna

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.

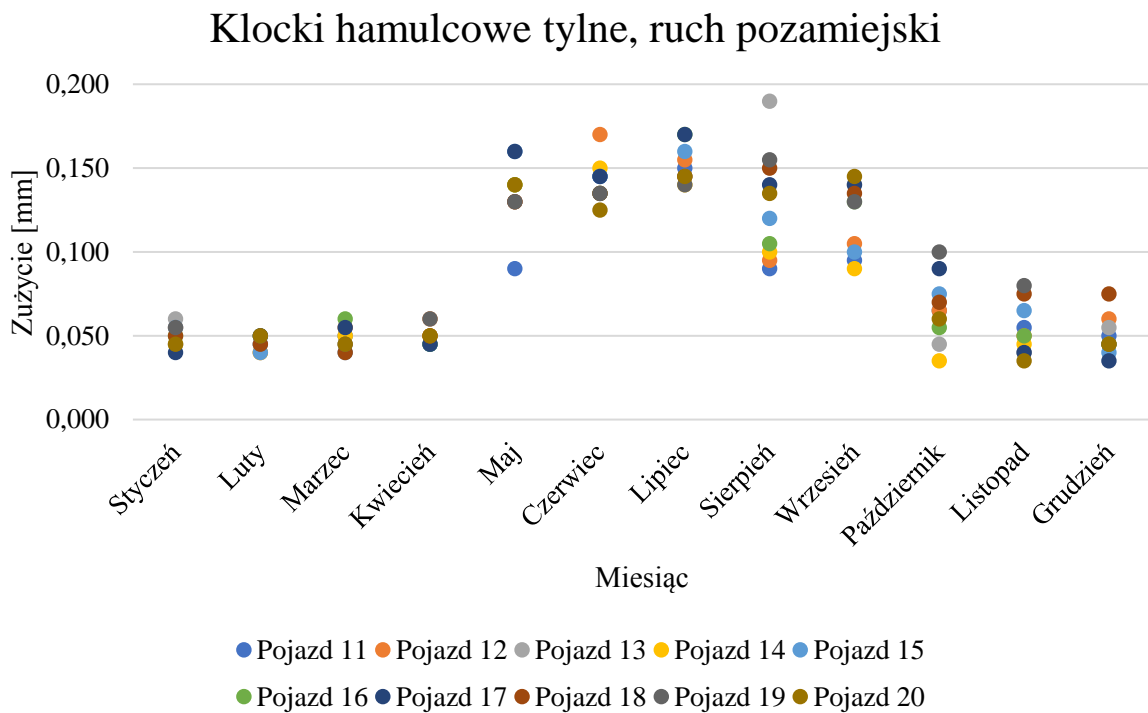
Tabela 3. Podstawowe statystyki opisowe zużycia badanych elementów

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 przez 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).

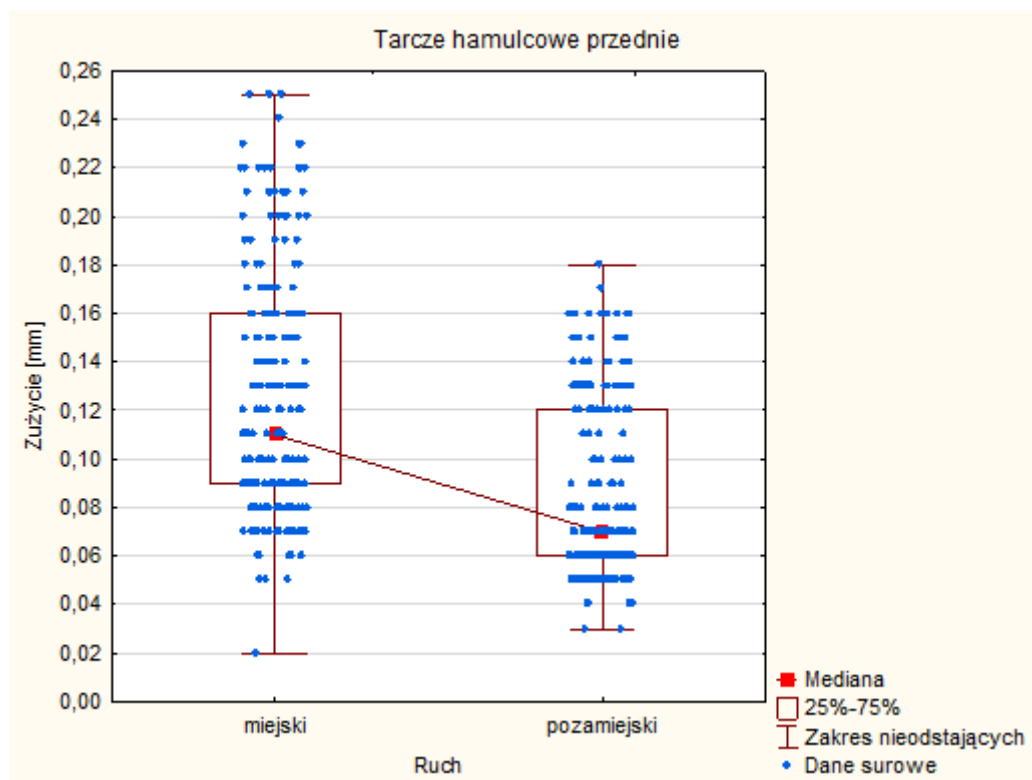
3.2. Badanie przednich elementów układu hamulcowego

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

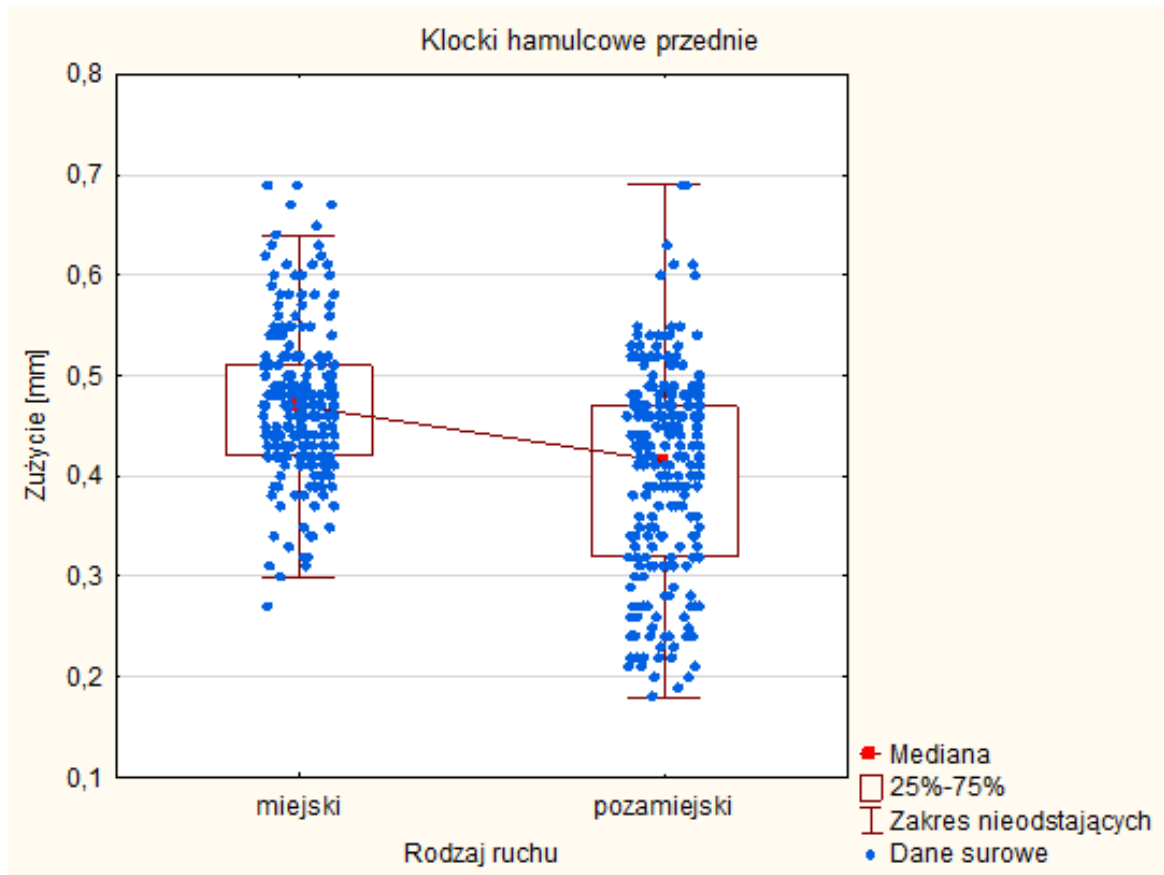
Czynnik	Tarcze hamulcowe przednie		Klocki hamulcowe przednie	
	Wartość p ANOVA	Wartość p test MW/KW	Wartość p ANOVA	Wartość p test MW/KW
Ruch	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Miesiąc	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Pojazd (Ruch)	< 0,001	< 0,001	0,066	< 0,001
Pojazd				
Miesiąc x Ruch	< 0,001	-	0,010	-

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.



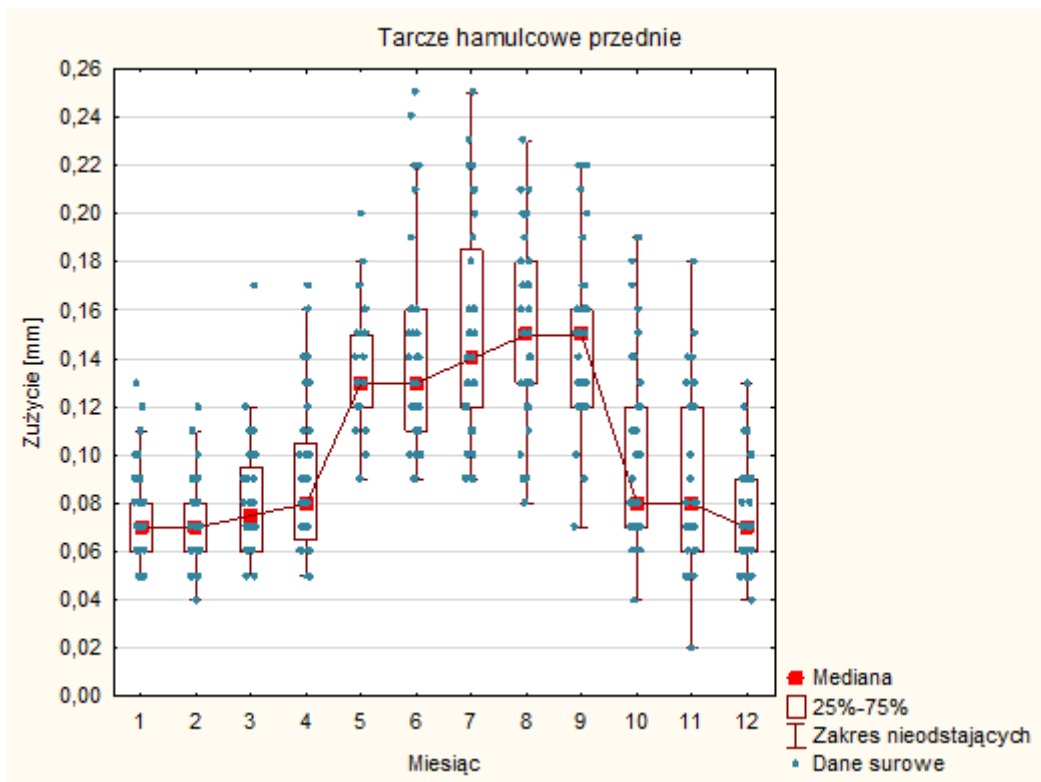
Rysunek 3. Zużycie tarcz hamulcowych przednich w zależności od rodzaju ruchu

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.



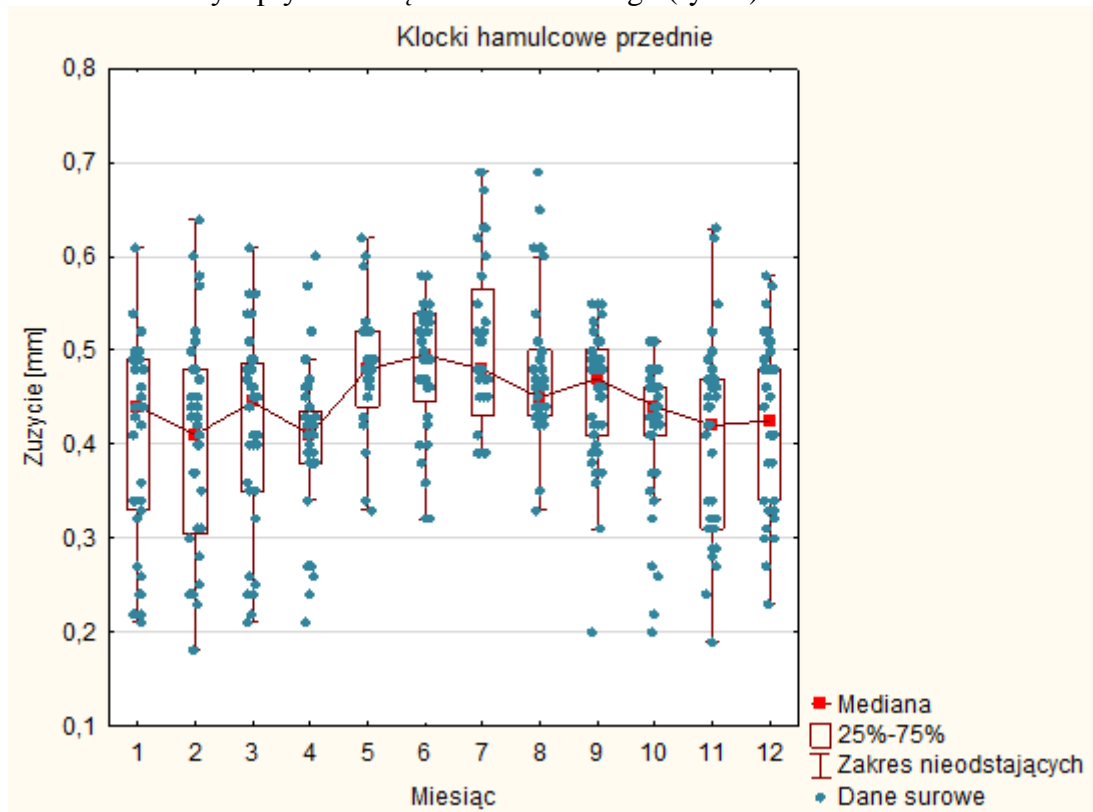
Rysunek 4. Zużycie klocków hamulcowych przednich w zależności od rodzaju ruchu

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).

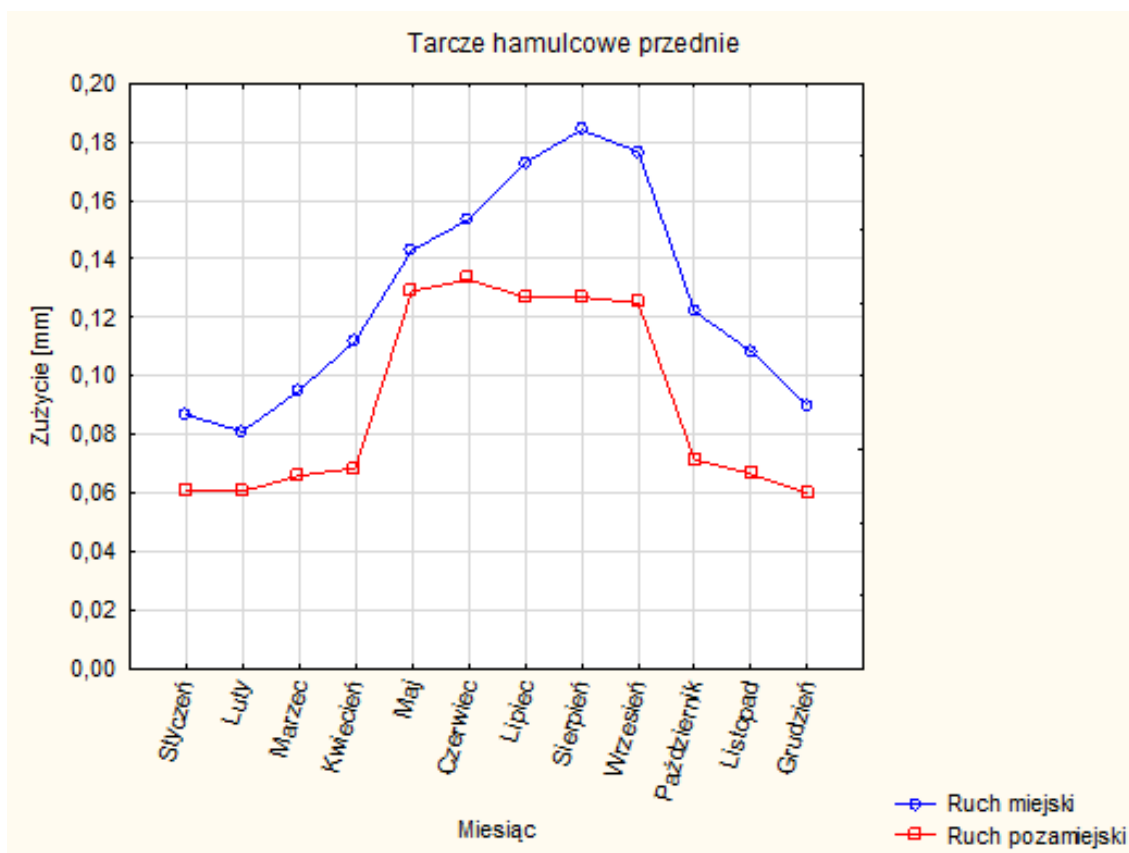


Rysunek 6. Zużycie klocków hamulcowych przednich w zależności od miesiąca

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.

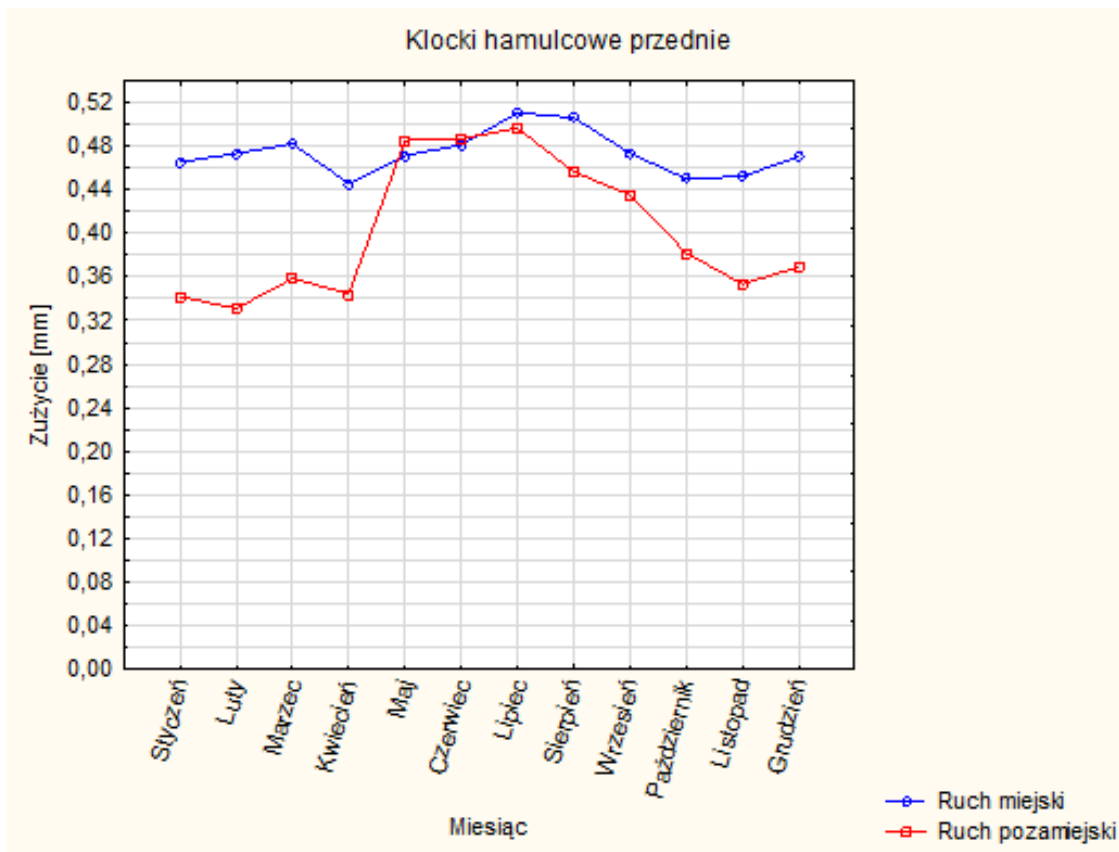
Na wykresach widoczne są obserwacje, które mogłyby być uznane za nietypowe, jednak ze względu na niewielką próbę nie można było dokonać ich jednoznacznej analizy, dlatego wzięły one udział w badaniu.

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.

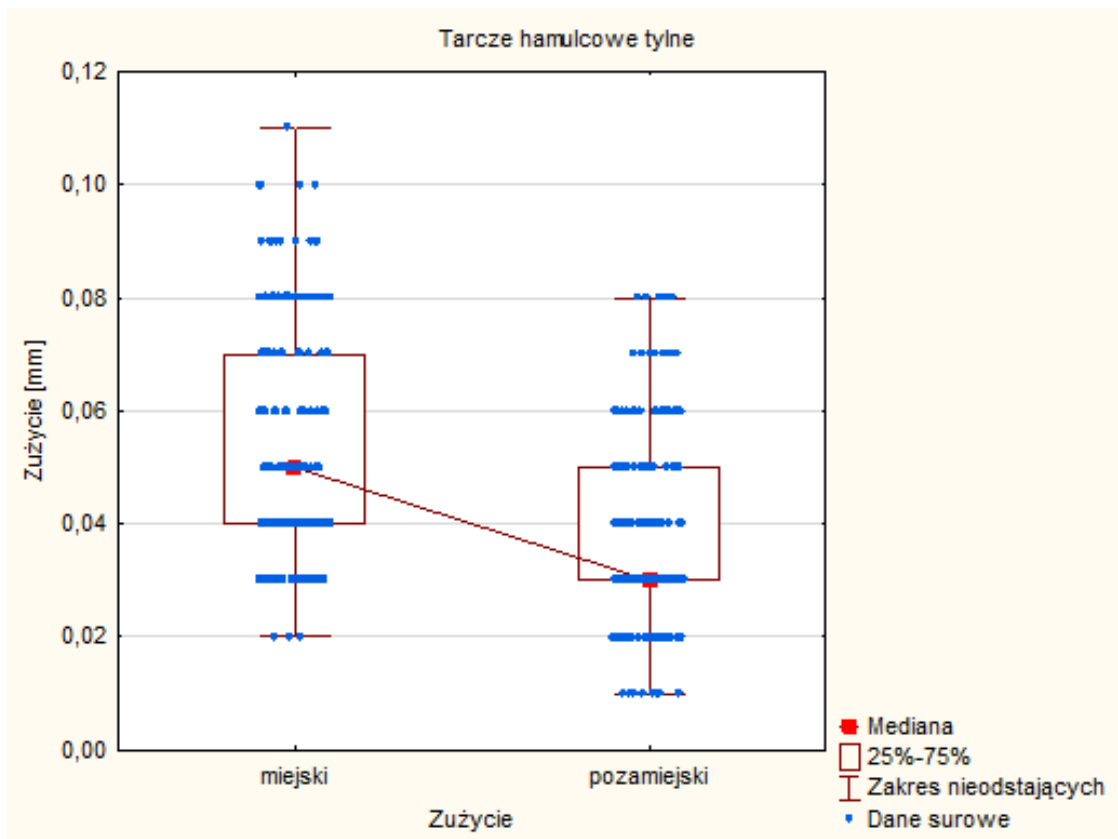
Wnioski z analizy tylnych elementów układu hamulcowego są podobne do wniosków dotyczących elementów przednich. Otrzymane wyniki przeprowadzonych testów statystycznych także wskazują na istniejącą zależność ich zużycia od badanych czynników. Wyniki testów istotności dla poszczególnych czynników pod kątem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

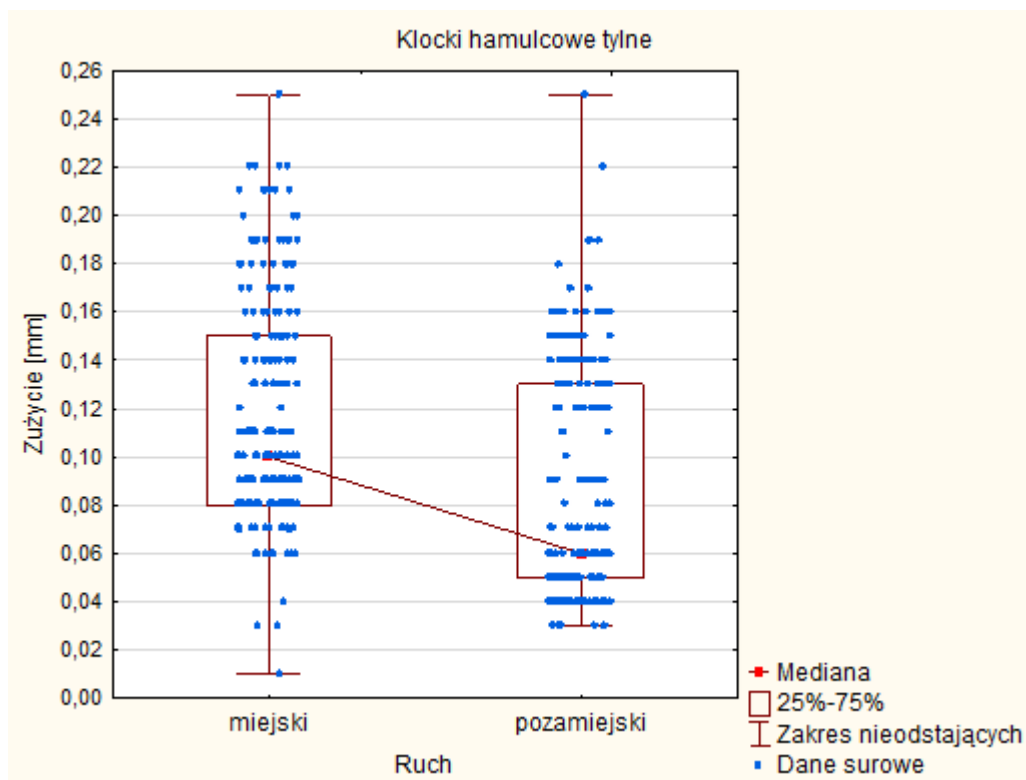
Otrzymana wartość $p < 0,001$ w teście Manna-Whitney'a oznacza istotny wpływ czynnika 'Ruch', co potwierdza wykres ramkowy zużycia tarcz hamulcowych tylnych,

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



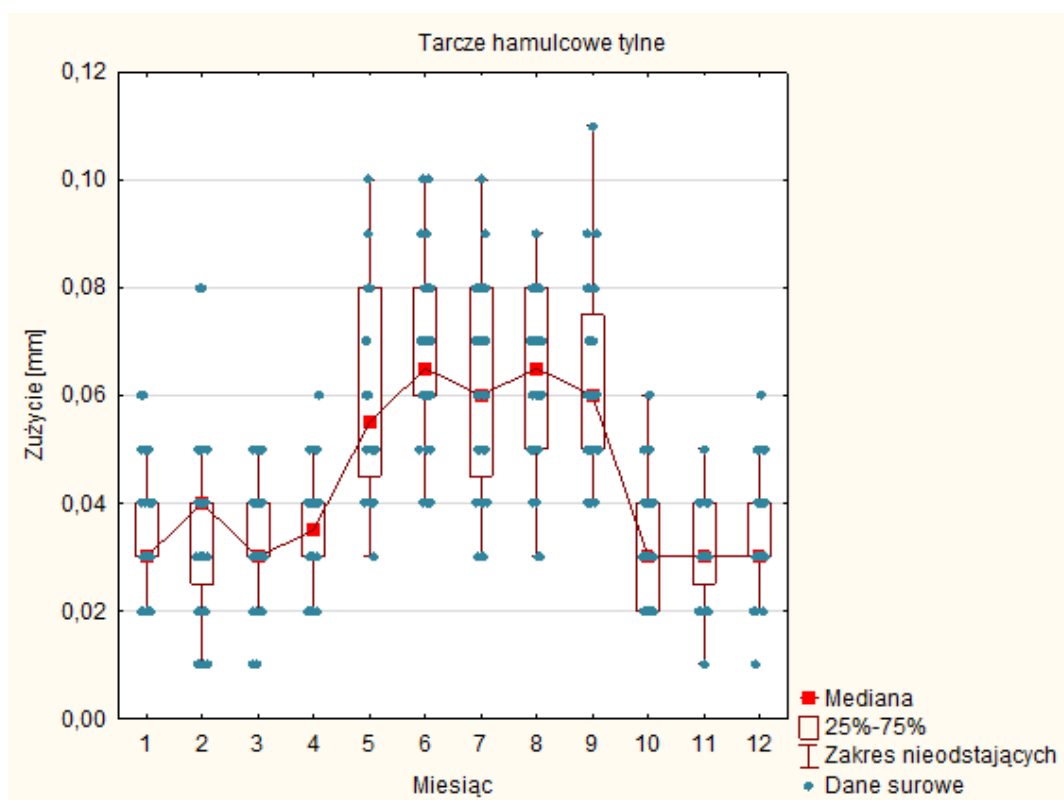
Rysunek 9. Zużycie tarcz hamulcowych tylnych w zależności od rodzaju ruchu

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).



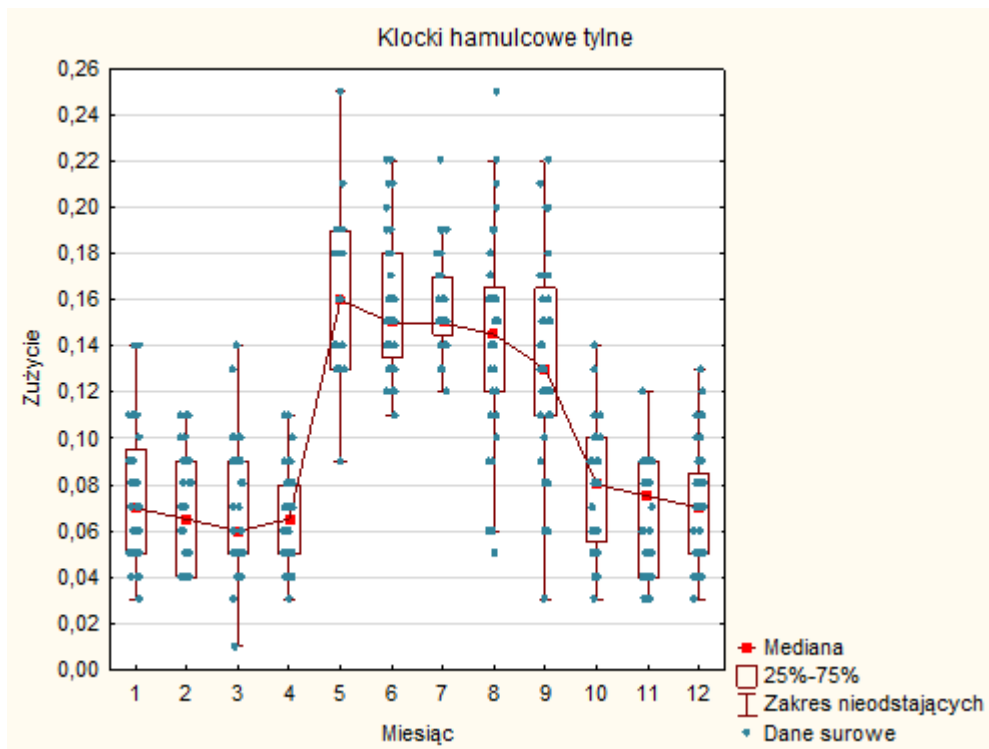
Rysunek 10. Zużycie klocków hamulcowych tylnych w zależności od rodzaju ruchu

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).



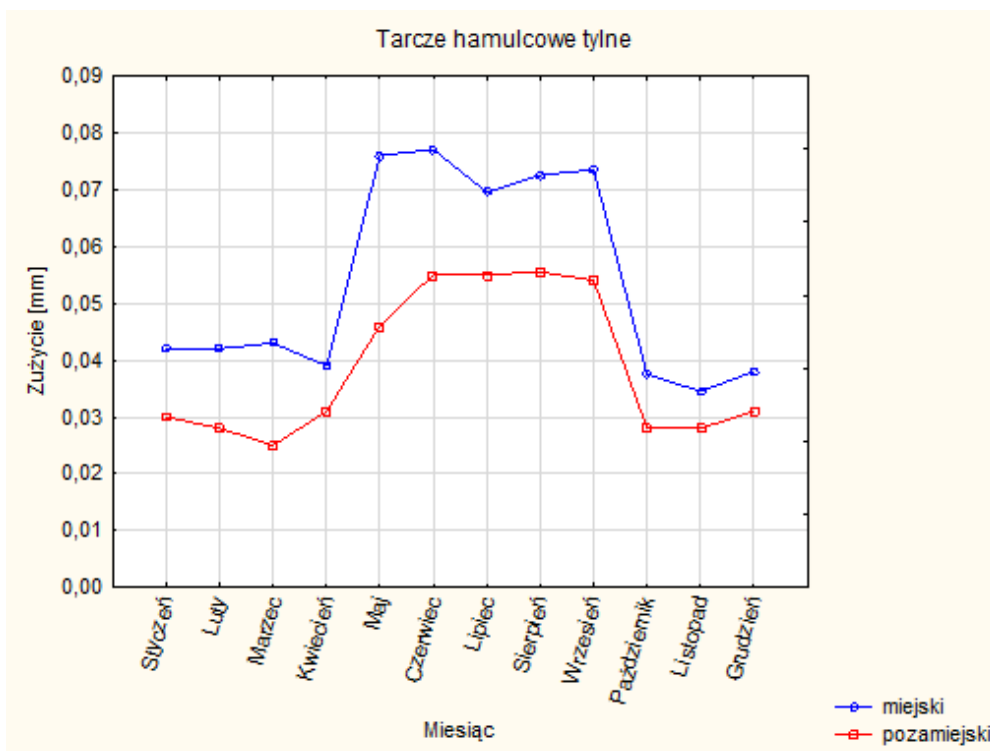
Rysunek 11. Zużycie tarcz hamulcowych tylnych w zależności od miesiąca

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).



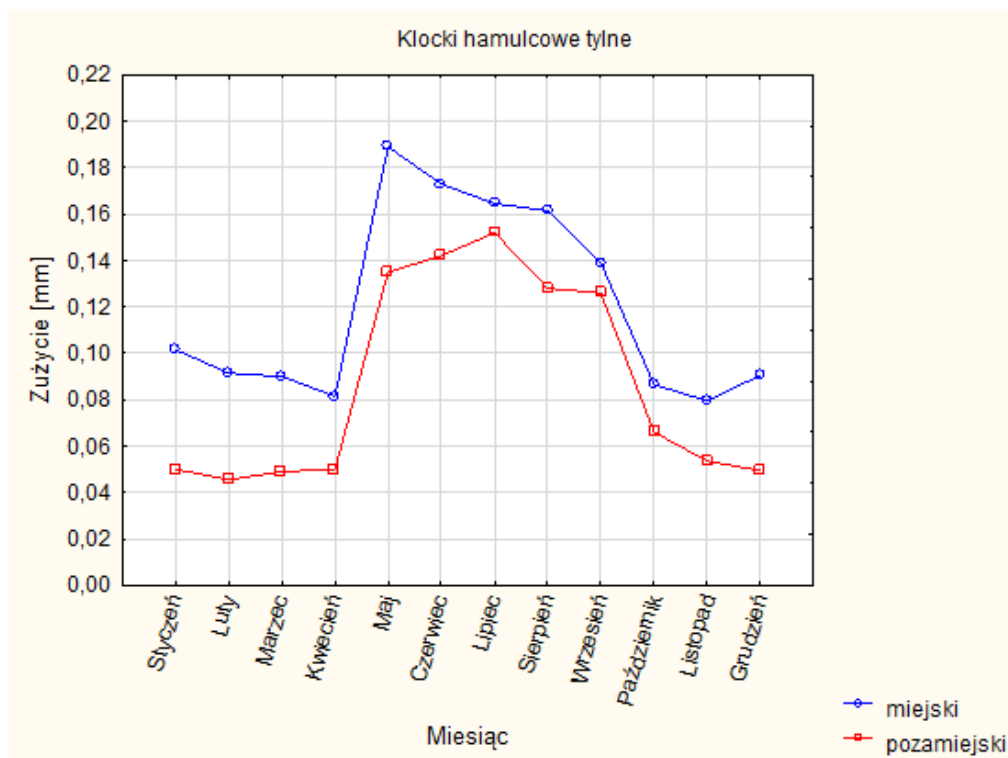
Rysunek 12. Zużycie klocków hamulcowych tylnych zależności od miesiąca

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.