

BADANIA MODELU OGRANICZANIA EMISJI CZĄSTEK STAŁYCH Z UKŁADU HAMULCOWEGO POJAZDU SAMOCHODOWEGO

THE EXAMINATION OF THE REDUCTION OF PARTICULATE MATTER EMIS- SION FROM MOTOR VEHICLE BRAKING SYSTEMS

W pracy przedstawiono badania modelu ograniczania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego pojazdu samochodowego. Modelowano zjawiska zachodzące w opracowanym przez autorów układzie do podciśnieniowego ograniczania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego pojazdu samochodowego. Do opisu zjawisk zastosowano model behawiorystyczny w postaci funkcji stopnia drugiego zmiennych niezależnych: podciśnienia w układzie ssącym oraz temperatury tarczy hamulcowej dla włączania i wyłączania wyciągu. Do celów identyfikacji modelu przeprowadzono badania empiryczne na zmodyfikowanym stanowisku Kraussa. Na podstawie badań zidentyfikowanego modelu oceniono wpływ zmiennych niezależnych na skuteczność zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego. Przeprowadzono również analizę korelacyjną zmiennych niezależnych i skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych. Oceniono, że największy wpływ na skuteczność zmniejszania emisji cząstek stałych ma podciśnienie w układzie ssącym. Wyniki badań upoważniają do zastosowania opracowanej metody badań do prac nad ograniczaniem emisji cząstek stałych z układu hamulcowego w warunkach eksploatacji pojazdu.

Słowa kluczowe: pojazdy samochodowe, układ hamulcowy, emisja cząstek stałych, modelowanie.

This work presents the testing of a model for reducing particulate matter emission from the braking systems of motor vehicles. The model describes the phenomena taking place in the negative pressure system – as developed by the authors – for reducing the emission of particulate matter from motor vehicle braking systems. A behaviorist model in the form of a quadratic function with independent variables – the negative pressure in the suction system and the temperature of the brake discs for engaging and disengaging the extraction – was used to describe the phenomena. Empirical tests were conducted on a modified Krauss test machine in order to identify the model. It is on the basis of tests on the identified model that the impact of independent variables on the effectiveness of the reduction in emission of particulate matter from the braking system was evaluated. A correlation analysis of the independent variables and of the effectiveness of the reduction in particulate matter was also conducted. It was assessed that the greatest influence on the effectiveness of the reduction in particulate matter is affected by the negative pressure in the suction system. Test results justify the application of the developed method of testing for work on reducing the emission of particulate matter from braking systems subject to conditions of vehicle operation.

Keywords: motor vehicles, braking system, particulate matter emission, modeling.

1. Wprowadzenie

Pyły (cząstki stałe), rozproszone w atmosferze, szczególnie w wielkich aglomeracjach miejskich, są zaliczane do najbardziej szkodliwych zanieczyszczeń, groźnych dla zdrowia ludzi i zwierząt [1, 3]. Wśród pyłów pochodzenia cywilizacyjnego znaczącą pozycję zajmują pyły pochodzące z ruchu drogowego. O ile postęp w ograniczaniu emisji cząstek stałych z układu wylotowego silników spalinowych jest bardzo znaczny, o tyle emisja pyłów z innych źródeł motoryzacyjnych pozostaje prawie niezmienna, niezależnie od postępu zachodzącego w technice samochodowej. Szczególnie duże zagrożenie pochodzi z układu hamulcowego pojazdów samochodowych: ocenia się, że przeciętnie w ciągu jednego roku z układu hamulcowego jednego samochodu są emitowane cząstki stałe o masie równej około 0,5 kg [1].

Mimo że emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych ma bogatą literaturę (zawartą np. w piśmiennictwie w pracy [3]), brak jest jednoznacznej oceny wpływu czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na emisję cząstek stałych z układu hamulcowego. W pracach [1, 3] usystematyzowano

1. Introduction

Particulate matter distributed throughout the atmosphere, especially in major urban agglomerations, is considered among the most hazardous forms of pollution – a threat to human and animal health [1, 3]. Of the particulate matter generated by civilization, a significant portion is particular matter stemming from road traffic. In as much as progress in limiting the emission of particulate matter from the exhaust systems of combustion engines is very significant, the emission of particulate matter from other automotive sources remains almost unchanged, regardless of progress taking place in automobile technology. A particularly major hazard comes from the braking systems of motor vehicles. It is estimated that over the course of a single year the braking system of one car emits particulate matter of a mass equal to approximately 0.5 kg [1].

In spite of the fact that the emission of particulate matter by automotive sources boasts a wealth of literature (found in the bibliography of [3], for example), there is no univocal assessment of the impact of design and operating factors on the emission of particulate matter derived from braking systems. Works [1,

motoryzacyjne źródła emisji i przeprowadzono analizę wpływu rodzajów pojazdów oraz warunków ich ruchu na całkowitą emisję cząstek stałych z ruchu drogowego. W pracy [1] przedstawiono autorską oryginalną metodę zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego. Metoda ta polega na odsysaniu pyłów z układu hamulcowego w czasie hamowania pojazdu i gromadzeniu tych pyłów w filtrze. Przeprowadzono badania skuteczności opracowanej metody zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego na stanowisku Kraussa do badania współczynnika tarcia między materiałami ciernymi w układzie hamulcowym. Wyniki wstępnych badań są obiecujące – udało się uzyskać nawet ponad siedemdziesięcioprocentowe zmniejszenie emisji cząstek stałych z układu hamulcowego.

W niniejszej pracy podjęto tematykę modelowania [2] zjawisk zachodzących w układzie do podciśnieniowego ograniczania emisji cząstek stałych z tarczowego układu hamulcowego pojazdu samochodowego [1].

2. Modelowanie ograniczania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego pojazdu samochodowego

Jako zmienne niezależne modelu ograniczania emisji cząstek stałych z tarczowego układu hamulcowego pojazdu samochodowego przyjęto [1]:

- temperaturę tarczy hamulcowej, przy której następuje włączenie wyciągu – t_a ,
- temperaturę tarczy hamulcowej, przy której następuje wyłączenie wyciągu – t_z ,
- podciśnienie w układzie ssącym – Δp .

Zmienną zależną jest współczynnik zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego samochodu:

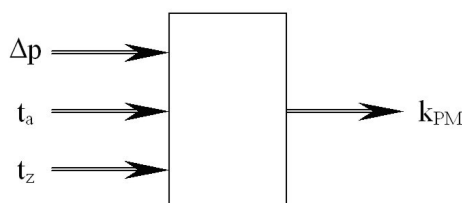
$$k_{PM} = 1 - \frac{m_k - m_f}{m_k} \quad (1)$$

gdzie: m_f – różnica masy filtra, m_k – różnica masy klocka.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat wielkości wejściowych – zmiennych niezależnych i wielkości wyjściowej – zmiennej zależnej modelu skuteczności ograniczania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego pojazdu

Do opisu zjawisk zachodzących w układzie do ograniczania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego zastosowano model zbudowany na zasadzie podobieństwa funkcjonalnego, czyli tzw. model behawiorystyczny [2]. Model przyjęto w postaci funkcji

$$k_{PM} = f(t_a, t_z, \Delta p) \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat wielkości wejściowych – zmiennych niezależnych i wielkości wyjściowej – zmiennej zależnej modelu skuteczności ograniczania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego pojazdu

Fig. 1. Diagram of the input values – independent variables – and output values – the dependent variable – of the model of effectiveness in reducing the emission of particulate matter from the vehicle braking system

3] systematize the automotive sources of emission and conduct analyses of the impact of types of vehicles and traffic conditions on the total emission of particulate matter from road traffic. Work [1] presents a proprietary, original method for decreasing particulate matter emission from braking systems. The method involves the extraction of particulate matter from the braking system during vehicle braking and the subsequent accumulation of that particulate matter in a filter. Tests on the efficiency of the developed method for decreasing particulate matter emission from the braking system were conducted on a Krauss testing machine used for testing friction between the friction materials in the braking system. The results of preliminary tests are promising. It proved possible to reduce the emission of particulate matter from braking systems by over seventy percent.

This work undertakes the subject of modeling [2] phenomena occurring in a negative pressure system reducing the emission of particulate matter from disc brake systems in motor vehicles [1].

2. Modeling the reduction in particulate matter emission in motor vehicles braking systems

Independent variables of the model for reducing the emission of particulate matter from motor vehicle disc brake systems are assumed as follows [1]:

- brake disc temperature at which extraction is engaged – t_a ,
- brake disc temperature at which extraction is disengaged – t_z , and
- negative pressure of the suction system – Δp .

The dependent variable is the coefficient of reduction in the emission of particulate matter from the motor vehicle braking system:

$$k_{PM} = 1 - \frac{m_k - m_f}{m_k} \quad (1)$$

where: m_f – difference in filter mass, m_k – difference in brake pad mass.

The model used to describe phenomena occurring in the system reducing the emission of particulate matter from the braking system was assembled on the basis of functional similarity, known as a behaviorist model [2]. The model used is the following function:

$$k_{PM} = f(t_a, t_z, \Delta p) \quad (2)$$

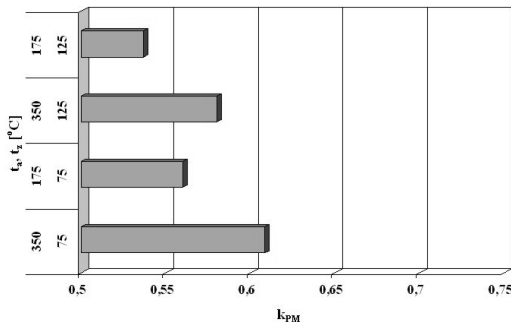
Strukturę modelu przyjęto w postaci funkcji stopnia drugiego zmiennych niezależnych:

$$k_{PM} = a_0 + a_{a1} \cdot t_a + a_{a2} \cdot t_a^2 + a_{z1} \cdot t_z + a_{z2} \cdot t_z^2 + a_{p1} \cdot \Delta p + a_{p2} \cdot (\Delta p)^2 \quad (3)$$

Do zidentyfikowania siedmiu parametrów modelu przyjęto plan doświadczeń, przedstawiony wraz z wynikami w tabeli 1.

W postaci graficznej wyniki badań przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Wyniki identyfikacji modelu, dokonanej zgodnie z kryterium minimum kwadratów [8], przedstawiono w tabeli 2.



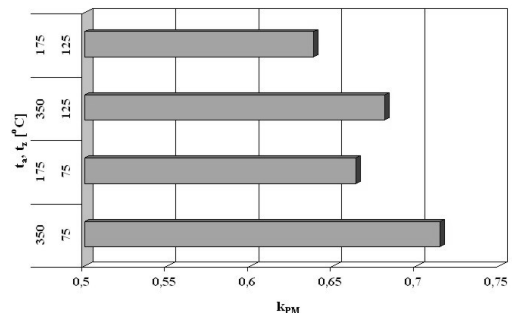
Rys. 2. Wyniki badań dla podciśnienia 25 kPa
Fig. 2. The 25 kPa negative pressure test results

The model structure assumed is that of a quadratic function of independent variables:

$$k_{PM} = a_0 + a_{a1} \cdot t_a + a_{a2} \cdot t_a^2 + a_{z1} \cdot t_z + a_{z2} \cdot t_z^2 + a_{p1} \cdot \Delta p + a_{p2} \cdot (\Delta p)^2 \quad (3)$$

A test plan was assumed in order to identify the seven model parameters. It is presented in table 1 together with results received. In graphic form, the test results are presented in figures 2 and 3.

The results of model identification as performed in line with the least square criterion [8] are presented in table 2.



Rys. 3. Wyniki badań dla podciśnienia 32 kPa
Fig. 3. The 32 kPa negative pressure test results

Tab. 1. Plan doświadczeń i wyniki badań
Tab. 1. Test plan inclusive of test results

| Δp [kPa] | t _a [°C] | t _z [°C] | k _{PM} |
|----------|---------------------|---------------------|-----------------|
| 32 | 350 | 75 | 0,714 |
| 32 | 175 | 75 | 0,663 |
| 32 | 350 | 125 | 0,681 |
| 32 | 175 | 125 | 0,638 |
| 25 | 350 | 75 | 0,609 |
| 25 | 175 | 75 | 0,560 |
| 25 | 350 | 125 | 0,580 |
| 25 | 175 | 125 | 0,537 |

Tab. 2. Wyniki identyfikacji modelu
Tab. 2. Model identification results

| | |
|-----------------|-----------|
| a ₀ | 1,48E-01 |
| a _{a1} | 1,55E-02 |
| a _{z1} | 3,15E-04 |
| a _{p1} | -6,91E-05 |
| a _{a2} | 8,20E-07 |
| a _{z2} | -1,02E-05 |
| a _{p2} | -7,29E-07 |

Pierwszy rodzaj badania zidentyfikowanego modelu polega na ocenie zbieżności kombinacji zmiennych niezależnych do największej wartości zmiennej zależnej. Badanie takie przeprowadzono metodą Monte Carlo [4, 9].

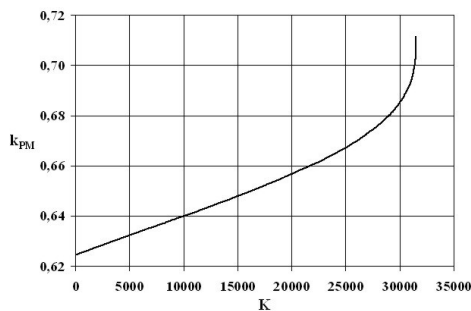
Na rysunkach 4 – 7 przedstawiono badania zbieżności współczynnika skuteczności zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego do wartości maksymalnej w obszarze badań w zależności od liczby wygenerowanych kroków doświadczeń pseudoprzygodkowych. Na rysunkach 4 i 5 jest widoczny duży przyrost wartości badanego współczynnika w ostatnich krokach przed osiągnięciem wartości największej przez współczynnik, co świadczy o silnym wpływie zmiennych niezależnych na zmienną zależną modelu.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono kombinacje zmiennych niezależnych, zapewniających monotoniczne zwiększanie się wartości zmiennej zależnej w kolejnych krokach generowanych doświadczeń pseudoprzygodkowych. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wyniki badania zbieżności kombinacji zmiennych niezależnych, zapewniających monotoniczne zwiększanie się zmiennej zależnej.

The first type of test of the identified model involves an evaluation of the convergence of combinations of independent variables to the greatest value of the dependent variables. Tests were also performed using the Monte Carlo method [4, 9].

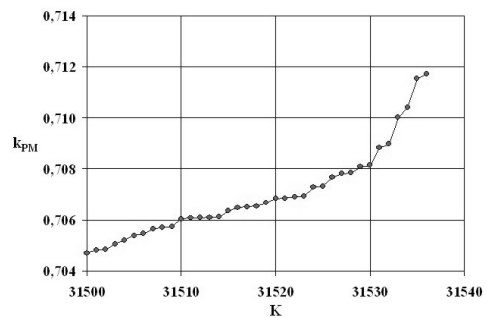
Figures 4–7 present tests of convergence of the coefficient of effectiveness of particulate matter emission reduction from braking systems to the maximum value in the test area, depending on the number of generated steps in the pseudorandom experiment. Figures 4 and 5 demonstrate the major growth in the value of the examined coefficient in the last steps prior to achieving the maximum value by the coefficient. This bears witness to the strong impact of the independent variables on the dependent variable of the model.

Figures 6 and 7 present combinations of independent variables guaranteeing a monotonic increase in the value of the dependent variable in successive steps of the pseudorandom experiment. Figures 8 and 9 present the results of tests on the convergence of combinations of independent variables guaranteeing the monotonic increase in the dependent variable.



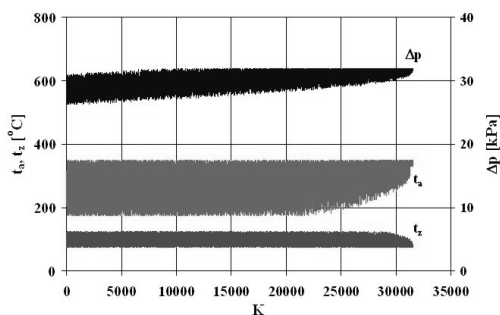
Rys. 4. Osiągnięcie przez współczynnik skuteczności zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego wartości maksymalnej w obszarze badań

Fig. 4. Achievement by the coefficient of effectiveness of reduced particulate matter emission from the braking system of the maximum value in the area of the test



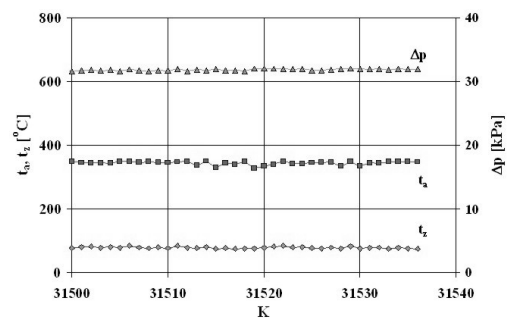
Rys. 5. Osiągnięcie przez współczynnik skuteczności zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego wartości maksymalnej w obszarze badań

Fig. 5. Achievement by the coefficient of effectiveness of reduced particulate matter emission from the braking system of the maximum value in the area of the test



Rys. 6. Zbieżność kombinacji zmiennych niezależnych, zapewniających monotoniczne zwiększanie się wartości zmiennej zależnej w kolejnych krokach generowanych doświadczeń pseudoprzypadkowych

Fig. 6. Convergence of the combination of independent variables guaranteeing a monotonic increase in the value of the dependent variable in successive steps of the generated pseudorandom experiments



Rys. 7. Zbieżność kombinacji zmiennych niezależnych, zapewniających monotoniczne zwiększanie się wartości zmiennej zależnej w kolejnych krokach generowanych doświadczeń pseudoprzypadkowych

Fig. 7. Convergence of the combination of independent variables guaranteeing a monotonic increase in the value of the dependent variable in successive steps of the generated pseudorandom experiments

Jak widać z przeprowadzonych badań modelu współczynnik skuteczności zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego osiąga największą wartość dla największych wartości podciśnienia i temperatury włączania oraz najmniejszej wartości temperatury wyłączenia.

Drugi rodzaj badań modelu dotyczył analizy korelacyjnej między współczynnikiem skuteczności zmniejszenia emisji cząstek stałych z układu hamulcowego a zmiennymi niezależnymi. Badania przeprowadzono dla zbiorów wartości wyników badań empirycznych oraz dla zbiorów wyników badań symulacyjnych modelu.

Analizy przeprowadzono z zastosowaniem teorii korelacji liniowej Pearsona [10] oraz korelacji rang Spearmana [11, 12], korelacji tau Kendalla [5, 6, 12] i korelacji gamma Kruskala [7, 12].

Na rysunkach 10 – 12 są przedstawione wyniki badań dla zbiorów wartości wyników badań empirycznych, a na rysunkach 13 – 15 dla wyników badań symulacyjnych modelu. Każdy z rysunków zawiera wykres wartości współczynników korelacji Pearsona, Spearmana, tau Kendalla i gamma Kruskala oraz wykres prawdopodobieństwa nieodrzućcia hipotezy o braku korelacji dla poszczególnych rodzajów korelacji.

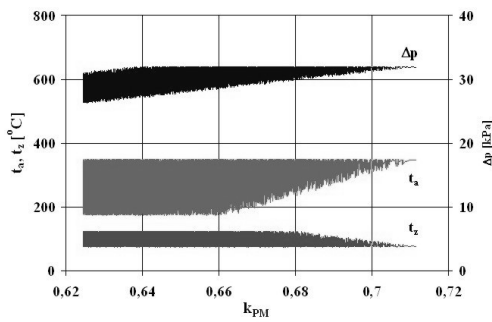
As can be seen from the conducted tests on the model, the coefficient of effectiveness of reduction in particulate matter emission from the braking system reaches its greatest value at the highest value of negative pressure and temperature of engagement as well as for the lowest value of temperature disengagement.

The second type of model testing involves the analysis of the correlation between the coefficient of effectiveness of the reduction in the emission of particulate matter from the braking system and the independent variables. Tests were conducted for the set of values of the empirical tests as well as for the set of results of the simulation model tests.

The analysis was conducted applying Pearson's linear correlation theory [10] as well as Spearman's rank correlation [11, 12], Kendall's tau correlation [5, 6, 12], and Kruskal's gamma correlation [7, 12].

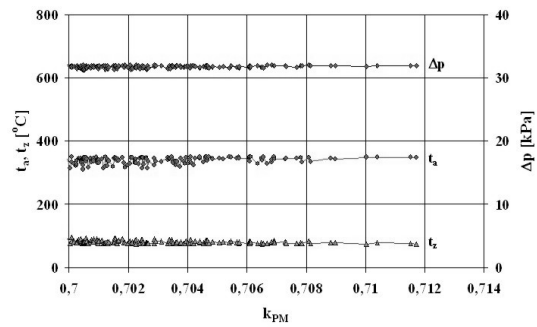
Figures 10–12 depict the results of tests for sets of values for the empirical test results, while figures 13–15 show the results of simulation model tests.

Each of the figures shows a graph of the value of the Pearson, Spearman, Kendall tau, and Kruskal gamma coefficients of correlation as well as a graph of the probability of the non-rejection of the hypothesis of lack of correlation for individual types of correlation.



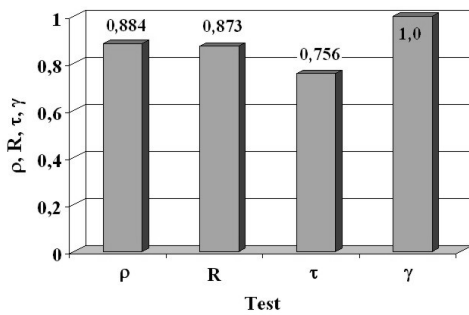
Rys. 8. Zbieżność kombinacji zmiennych niezależnych, zapewniających monotoniczne zwiększanie się wartości zmiennej zależnej

Fig. 8. Convergence of combinations of independent variables guaranteeing the monotonic increase in the dependent variable



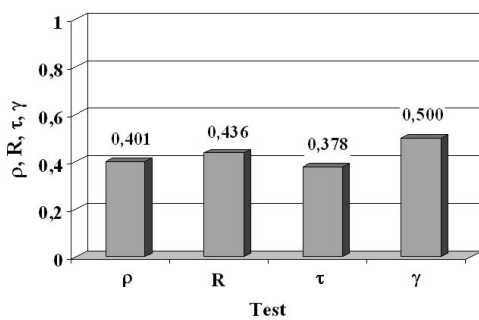
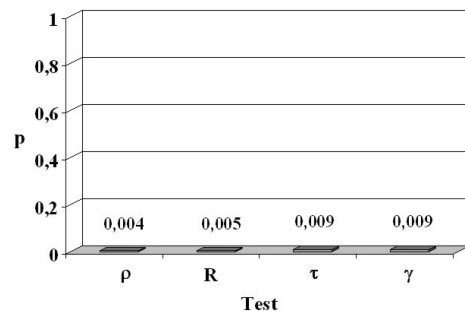
Rys. 9. Zbieżność kombinacji zmiennych niezależnych, zapewniających monotoniczne zwiększanie się wartości zmiennej zależnej

Fig. 9. Convergence of combinations of independent variables guaranteeing the monotonic increase in the dependent variable



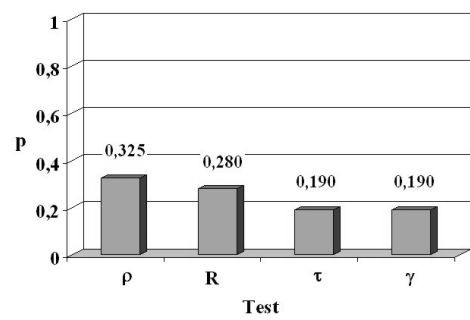
Rys. 10. Współczynniki korelacji Pearsona ρ , Spearmana R, tau Kendalla τ i gamma Kruskala γ między podciśnieniem w układzie ssania a współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego oraz prawdopodobieństwo nieodrzućcia hipotezy o braku korelacji p

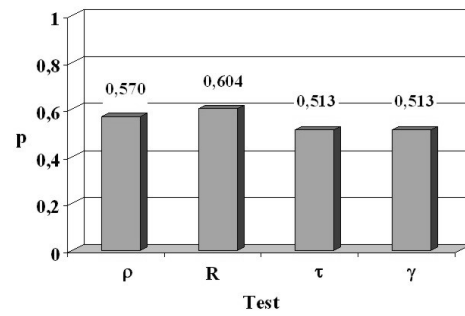
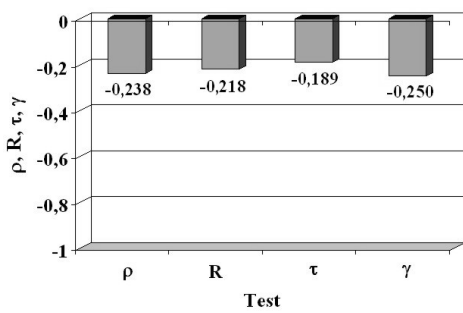
Fig. 10. The Pearson ρ , Spearman R, Kendall τ , and Kruskal γ correlation coefficients between the negative pressure of the suction system and the coefficient of effectiveness of reduction of the emission of particulate matter from the braking system and the probability of non-rejection of the hypothesis of a lack of correlation p



Rys. 11. Współczynniki korelacji Pearsona ρ , Spearmana R, tau Kendalla τ i gamma Kruskala γ między temperaturą tarczy hamulcowej przy włączeniu wyciągu a współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego oraz prawdopodobieństwo nieodrzućcia hipotezy o braku korelacji p

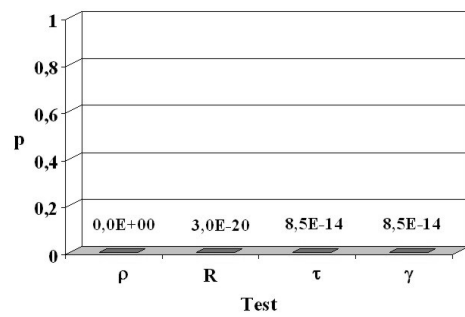
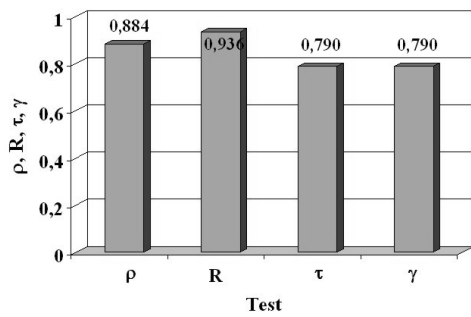
Fig. 11. The Pearson ρ , Spearman R, Kendall τ , and Kruskal γ correlation coefficients between the temperature of the brake discs upon engagement of extraction and the coefficient of effectiveness of reduction of the emission of particulate matter from the braking system and the probability of non-rejection of the hypothesis of a lack of correlation p





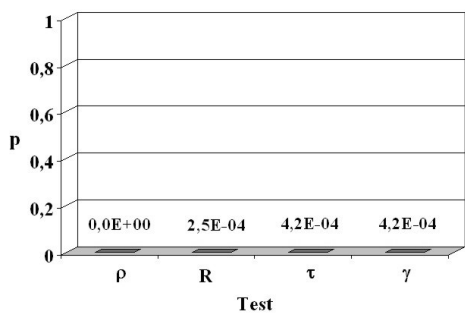
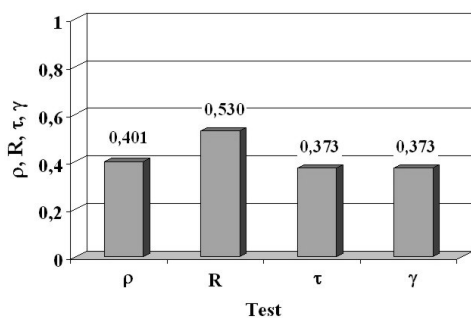
Rys. 12. Współczynniki korelacji Pearsona ρ , Spearmana R, tau Kendalla τ i gamma Kruskala γ między temperaturą tarczy hamulcowej przy wyłączeniu wyciągu a współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego oraz prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotezy o braku korelacji p

Fig. 12. The Pearson ρ , Spearman R, Kendall τ , and Kruskal γ correlation coefficients between the temperature of the brake discs upon disengagement of extraction and the coefficient of effectiveness of reduction of the emission of particulate matter from the braking system and the probability of non-rejection of the hypothesis of a lack of correlation p



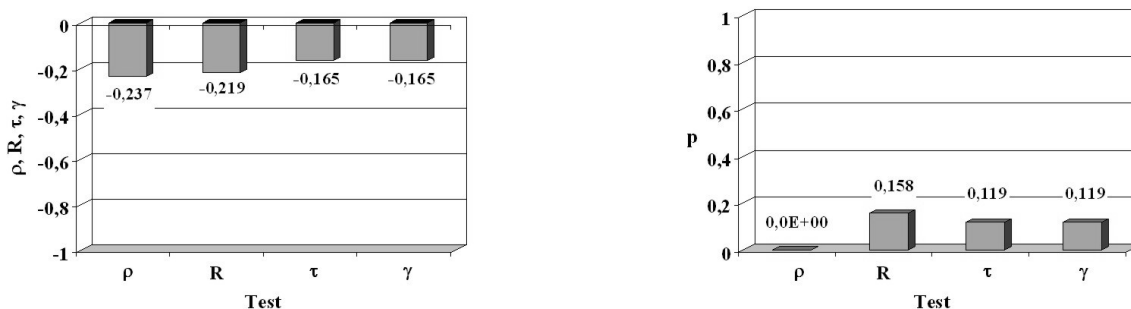
Rys. 13. Współczynniki korelacji Pearsona ρ , Spearmana R, tau Kendalla τ i gamma Kruskala γ między podciśnieniem w układzie ssania a współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego oraz prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotezy o braku korelacji p

Fig. 13. The Pearson ρ , Spearman R, Kendall τ , and Kruskal γ correlation coefficients between the negative pressure of the suction system and the coefficient of effectiveness of reduction of the emission of particulate matter from the braking system and the probability of non-rejection of the hypothesis of a lack of correlation p



Rys. 14. Współczynniki korelacji Pearsona ρ , Spearmana R, tau Kendalla τ i gamma Kruskala γ między temperaturą tarczy hamulcowej przy włączeniu wyciągu a współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego oraz prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotezy o braku korelacji p

Fig. 14. The Pearson ρ , Spearman R, Kendall τ , and Kruskal γ correlation coefficients between the temperature of the brake discs upon engagement of extraction and the coefficient of effectiveness of reduction of the emission of particulate matter from the braking system and the probability of non-rejection of the hypothesis of a lack of correlation p



Rys. 15. Współczynniki korelacji Pearsona ρ , Spearmana R, tau Kendalla τ i gamma Kruskala γ między temperaturą tarczy hamulcowej przy wyłączeniu wyciągu a współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego oraz prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotezy o braku korelacji p

Fig. 15. The Pearson ρ , Spearman R, Kendall τ , and Kruskal γ correlation coefficients between the temperature of the brake discs upon disengagement of extraction and the coefficient of effectiveness of reduction of the emission of particulate matter from the braking system and the probability of non-rejection of the hypothesis of a lack of correlation p

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące szczegółowe wnioski:

- 1) Zwiększenie podciśnienia w układzie ssącym i podwyższenie temperatury tarczy hamulcowej przy włączaniu wyciągu oraz obniżanie temperatury tarczy hamulcowej przy wyłączaniu wyciągu jednoznacznie wpływają na zwiększenie współczynnika skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego.
- 2) Najsilniejsza korelacja występuje między współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego oraz podciśnieniem w układzie ssącym, najsłabsza – między współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego oraz temperaturą tarczy hamulcowej przy wyłączaniu wyciągu.
- 3) W wypadku analizy wyników badań symulacyjnych modelu prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotezy o braku korelacji jest mniejsze niż w wypadku analizy wyników badań empirycznych. Wynik ten jest oczywisty, gdyż w wypadku wyników badań symulacyjnych zależności empiryczne między wielkościami wejściowymi i wyjściową zostały zastąpione zależnościami funkcyjnymi.

Wyniki badań korelacyjnych zjawisk, związanych z ograniczaniem emisji cząstek stałych z układu hamulcowego dzięki zastosowaniu układu podciśnieniowego, potwierdzają, że w warunkach badań na stanowisku czynnikiem najbardziej determinującym jakość działania opracowanego układu jest podciśnienie odsysania pyłów.

3. Uwagi końcowe

Emisja pyłów ze źródeł antropogenicznych należy do najważniejszych problemów ekologicznych współczesności. Przekroczenia dopuszczalnych stężeń cząstek stałych PM10 (o umownych wymiarach mniejszych od 10 μm) są w Polsce i w innych państwach rozwiniętych gospodarczo jednymi z najczęściej występujących powodów podejmowania przez władze działań naprawczych, dotyczących jakości środowiska. Od 2009 r. w Unii Europejskiej obowiązuje również limitowanie stężenia cząstek stałych PM2.5 (o umownych wymiarach mniejszych od 2,5 μm).

Obszarami szczególnie narażonymi na emisję pyłów ze źródeł antropogenicznych są wielkie aglomeracje miejskie, w których

Pursuant to the conducted tests, it is possible to formulate the following detailed conclusions:

- 1) Increasing the negative pressure in the suction system and increasing the brake disc temperature upon engagement of extraction as well as the lowering of the brake disc temperature of the disengagement of extraction has a univocal impact on increasing the coefficient of effectiveness of reduction of particulate matter emission in braking systems.
- 2) The strongest correlation occurs between the coefficient of effectiveness of reduction of the emission of particulate matter from the braking system and the negative pressure of the suction system. The weakest is between the coefficient of effectiveness of reduction of the emission of particulate matter from the braking system and the temperature of the brake disc upon disengagement of extraction.
- 3) As to the analysis of the simulation test results of the model with respect to the probability of non-rejection of the hypothesis regarding the lack of correlation, it is less than in the case of analysis of the results of empirical tests. Such a result is obvious as in the case of the results of the tests on the simulation of empirical dependencies the input and output values were replaced by functional dependencies.

The results of correlation tests on phenomena linked with reducing the emission particulate matter from braking systems thanks to the application of a negative pressure system confirm that subject to test conditions on the testing machine, the factor most determining the quality of operation of the developed system is the negative pressure extracting particulate matter.

3. Final remarks

The emission of particulate matter from anthropogenic sources is among the most important of today's environmental problems. The exceeding of allowable concentrations of PM₁₀ particulate matter (with an aerodynamic diameter of less than 10 μm) is one of the most frequently occurring reasons for the undertaking by authorities of remedial action with respect to the quality of the environment in Poland and other economically developed countries. As of the year 2009 there is also a limit on the concentration of PM_{2.5} particulate matter (with an aerodynamic diameter of less than 2.5 μm) in the European Union.

Areas particularly threatened by the emission of particulate matter from anthropological sources are major urban agglomerations.

znaczący udział w emitowaniu pyłów ma ruch samochodowy. Wszelkie działania ograniczające emisję pyłów ze źródeł motoryzacyjnych należy – w związku z tym – zaliczyć do priorytetowych działań ekologicznych.

Badania modelu skuteczności zmniejszenia emisji cząstek stałych z układów hamulcowych pojazdów samochodowych wskazują, że zaproponowana metoda badań umożliwia obiektywną ocenę wpływu wielkości sterowanych w opracowanym układzie odsysającym pyły na jakość jego działania. Dotychczasowe wyniki badań dotyczą jedynie warunków pracy układu na stanowisku, widoczne są jednak powtarzalne tendencje w ocenie wpływu wielkości sterowanych na jakość pracy układu, przede wszystkim największa jest wrażliwość współczynnika skuteczności zmniejszenia emisji cząstek stałych z układu hamulcowego na podciśnienie zasysania pyłów. W celu umożliwienia sformułowania wniosków na temat praktycznych wytycznych zastosowania układów odsysania pyłów z układów hamulcowych konieczne jest prowadzenie badań w warunkach odpowiadających rzeczywistej eksploatacji trakcyjnej.

Zaproponowana metoda zmniejszenia emisji pyłów z układów hamulcowych samochodów już na etapie rozpoznawczych badań wykazuje obiecującą skuteczność. W związku z tym jest planowane kontynuowanie rozpoczętych badań i docelowo wdrożenie rozwiązania w praktyce.

4. References

4. Chłopek Z., Jakubowski A. A study of the particulate matter emission from the braking systems of motor vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 4(4): 45–52.
5. Chłopek Z., Piaseczny L. Remarks about the modelling in science researches. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2001; 4(11): 47–57.
6. Chłopek Z., Żegota M. The emission of particulate matter PM10 from vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2004; 1(21): 3–13.
7. Chłopek Z. The cognitive interpretation of the Monte Carlo method for the technical applications. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 3(43): 38–46.
8. Kendall M.G. A New measure of rank correlation. *Biometrika* 1938; 30: 81–89.
9. Kendall M.G. Rank correlation methods. London: Charles Griffin & Company Limited, 1948.
10. Kruskal H., Wallis W.A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 1952; 47(260): 583–621.
11. Mańczak K. Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1971.
12. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 1949; 44(247): 335–341.
13. Pearson K. On the theory of contingency and its relation to association and normal correlation. *Drapers' Company Research Memoirs. Biometric Ser. I.* 1904.
14. Spearman Ch. The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology* 1904; 15: 72–101.
15. Wasserman L. All of nonparametric statistics. Springer: 2007.

Prof. nzw. dr hab. inż. Zdzisław CHŁOPEK

Politechnika Warszawska,
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów
ul. Narbutta 84, 02–524 Warszawa
e-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl

Mgr inż. Andrzej JAKUBOWSKI

Przemysłowy Instytut Motoryzacji w Warszawie
ul. Jagiellońska 55, 03–301 Warszawa
e-mail: a.jakubowski@pimot.org.pl
