

BADANIA LABORATORYJNEGO URZĄDZENIA DO OGRANICZANIA EMISJI PYŁÓW Z UKŁADU HAMULCOWEGO POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

ZDZISŁAW CHŁOPEK¹, ANDRZEJ JAKUBOWSKI², ANNA KIERACIŃSKA³

Streszczenie

Pyły należą do najpoważniejszych zagrożeń zdrowia ludzi szczególnie w gęsto zamieszkałych centrach aglomeracji miejskich. Znaczna część emisji pyłów pochodzi z ruchu pojazdów samochodowych. Spośród źródeł emisji pyłów, związanych z ruchem pojazdów, istotną pozycję stanowi emisja pyłów z układu hamulcowego. W PIMOT została opracowana koncepcja zmniejszania emisji pyłów z układów hamulcowych. Zbudowano stanowisko badawcze z laboratoryjnym urządzeniem do zmniejszania emisji pyłów z układu hamulcowego. Wstępne wyniki badań wykazały dobrą skuteczność zaproponowanego rozwiązania. W pracy przedstawiono wyniki badań empirycznych laboratoryjnego urządzenia, wykorzystanych do budowy modelu matematycznego procesów zmniejszania emisji pyłów, stworzonego zasadzie podobieństw funkcjonalnego (model behawiorystyczny). Do identyfikacji modelu wykorzystano wyniki badań empirycznych, przeprowadzonych na stanowisku Kraussa. Przedstawione wyniki badań modelu umożliwiają racjonalny dobór parametrów urządzenia. Przeprowadzono również badania korelacyjne między współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji pyłów z układu hamulcowego a zmiennymi niezależnymi modelu. Z badań modelu matematycznego jednoznacznie wynika, że najsilniejszy wpływ na skuteczność zmniejszania emisji pyłów ma podciśnienie w układzie pneumatycznym. Przedstawiono również w pracy założenia do prac rozwojowych nad zaproponowaną koncepcją urządzenia do zmniejszania emisji pyłów z układu hamulcowego.

Słowa kluczowe: układy hamulcowe, emisja pyłów, modelowanie matematyczne, analiza korelacji

1. Wstęp

Pyły należą do najpoważniejszych zagrożeń środowiska. Szkodliwość pyłów w powietrzu dla zdrowia ludzi jest powszechnie znana. Pierwszą pracą zawierającą informacje o szkodliwym oddziaływaniu pyłów na zdrowie ludzi było dzieło Georgiusa Agricoli z 1524 roku

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, ul. Narbutta 84, 02 – 524 Warszawa, zchlopek@simr.pw.edu.pl, tel. 22 234 85 59

² Przemysłowy Instytut Motoryzacji, Pracownia Badań Materiałowych, ul. Jagiellońska 55, 03 – 301 Warszawa, a.jakubowski@pimot.org.pl, tel. 22 7777 186

³ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03 – 301 Warszawa, a.kieracinska@pimot.org.pl, tel. 22 7777 073

pt. „De re metalica” [1]. Od tego czasu literatura tematu jest niezwykle obszerna, m.in. [7, 11, 17, 22].

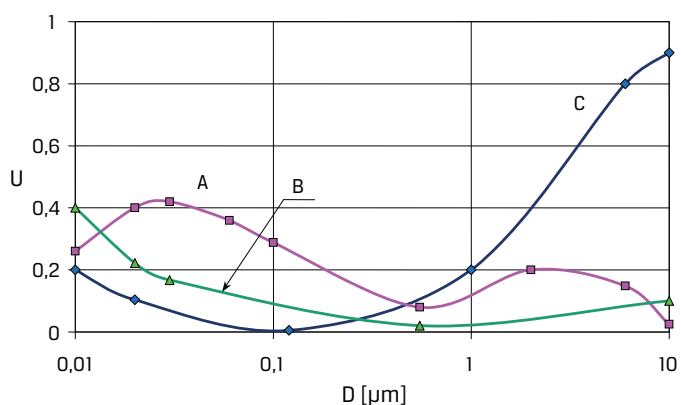
Szkodliwość pyłów dla zdrowia jest zróżnicowana w zależności od składu chemicznego i mineralogicznego oraz budowy fizycznej cząstek pyłu [17]. Sposób oddziaływania pyłów na organizmy żywe jest również silnie uzależniony od wymiarów cząstek pyłów [17, 22]. W zależności od umownych wymiarów cząstek pyłu wyróżnia się [7]:

- pył całkowity TSP (*total suspended particles*) – mieszaninę małych cząstek stałych o umownym wymiarze mniejszym niż 300 μm , zawieszonych w powietrzu (faza rozproszona układu dwufazowego ciało stałe – gaz),
- pył zawieszony PM10 – o umownym wymiarze mniejszym od 10 μm ,
- pył drobny PM2.5 – o umownym wymiarze mniejszym od 2,5 μm ,
- tzw. nanocząstki – o umownym wymiarze mniejszym od 1 μm , stanowiące pył praktycznie niewidzialny [8, 13].

Przekroczenia dopuszczalnego stężenia cząstek stałych PM10 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.

Sposób oddziaływania pyłów na zdrowie ludzi można przedstawić w postaci udziałów depozycji pyłów zatrzymywanych przez różne części układu oddechowego ludzi w zależności od średnic ziaren – rysunek 1.

Oprócz negatywnego oddziaływania pyłów na zdrowie ludzi i zwierząt stwierdza się również szkodliwe wpływanie pyłów na rośliny oraz na glebę i wody. Wspólnie z dwutlenkiem siarki, tlenkiem węgla i innymi związkami pyły przyczyniają się do powstawania zjawiska smogu londyńskiego [7, 17]. Pyły mają również wpływ osłabiający na zjawisko cieplarniane



Rys. 1. Rozkład średnicy pyłów (udział depozycji – U), zatrzymywanych w różnych częściach układu oddechowego człowieka (na podstawie [17]): A – płuca, B – tchawica i oskrzela, C – nosogardło.

w atmosferze [17]. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że pyły ograniczają widoczność, co ma wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego.

Podstawowymi naturalnymi źródłami pyłów są materiały osadowe, aerozole morskie, roślinne i zwierzęce, wybuchy wulkanów i pożary lasów. Antropogennymi źródłami pyłów w powietrzu są właściwie wszystkie procesy produkcyjne i procesy spalania paliw [7, 11].

Szczególną rolę w procesach emisji pyłów ze źródeł antropogennych zajmuje transport drogowy ze względu na masowość użytkowania samochodów. Pyły ze źródeł motoryzacyjnych pochodzą głównie z [7, 11]:

- samochodów,
- nawierzchni drogi,
- zanieczyszczeń stałych znajdujących się na drodze – w postaci wzniesienia pyłów.

Źródłami pyłów, pochodzących z samochodu, są [7, 11]:

- silnik spalinowy – cząstki stałe są zawarte w spalinach [8, 13, 14],
- pary trące – przede wszystkim w układzie hamulcowym oraz w sprzęgle,
- ogumienie kół jezdnych,
- inne części samochodu, ulegające zużyciu eksploatacyjnemu.

Emisja cząstek stałych zawartych w spalinach pochodzi głównie z silników o zapłonie samoczynnym, chociaż w najnowszych regulacjach prawnych na poziomie Euro 5 (ew. Euro V) i Euro 6 (Euro VI)⁴ przewiduje się również uwzględnianie emisji cząstek stałych z silników o zapłonie iskrowym, które mogą być znaczącym źródłem pyłu drobnego (w tym nanocząstek), szczególnie w wypadku silników o wtrysku bezpośrednim [8, 13].

Spośród par trybologicznych w samochodach szczególną rolę ze względu na wytwarzanie pyłów odgrywa układ hamulcowy. Pary trące w układzie hamulcowym są znaczącym źródłem emisji pyłów w związku z zadaniem spełnianym przez układ hamulcowy w postaci rozpraszania energii kinetycznej pojazdu. Ocenia się, że przeciętny samochód zużywa rocznie około 0,5 kg materiału ciernego z układu hamulcowego [3].

Dotychczasowy stan wiedzy o emisji pyłów z układów hamulcowych pojazdów wskazuje, że jest to zjawisko niedostatecznie przebadane. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań podjętych w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji (PIMOT) nad zjawiskiem emisji pyłów z układów hamulcowych pojazdów oraz sposobami zmniejszania tej emisji.

2. Badania laboratoryjnego urządzenia do ograniczania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego

Urządzenia laboratoryjne do zmniejszania emisji pyłów z układów hamulcowych zostały

⁴ Przyjęło się używać numeracji arabskiej do kategorii samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych, badanych na hamowni podwoziowej w testach jezdnych (wyznacza się emisję drogową zanieczyszczeń), oraz numeracji rzymskiej do silników samochodów ciężarowych i autobusów, dla których badania są wykonywane na hamowni silnikowej (wyznacza się emisję jednostkową zanieczyszczeń) [20], [21].

opracowane w PIMOT [3–5]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat urządzenia do zmniejszania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego, a na rysunku 3 – z bębnowego.

Dokładny opis metody zmniejszania emisji pyłów z układów hamulcowych pojazdów samochodowych zamieszczono w zgłoszeniach patentowych nr P 386829 i nr P 386923.

Wstępne badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku Krauss II RWS75A typu AB-738. Jest to stanowisko przeznaczone do badania współczynnika tarcia między materiałami ciernymi w tarczowym układzie hamulcowym.

W urządzeniu do zmniejszania emisji pyłów przeanalizowano dwie możliwości sterowania przemieszczania się pyłów w wyniku obiegu powietrza wymuszonego:

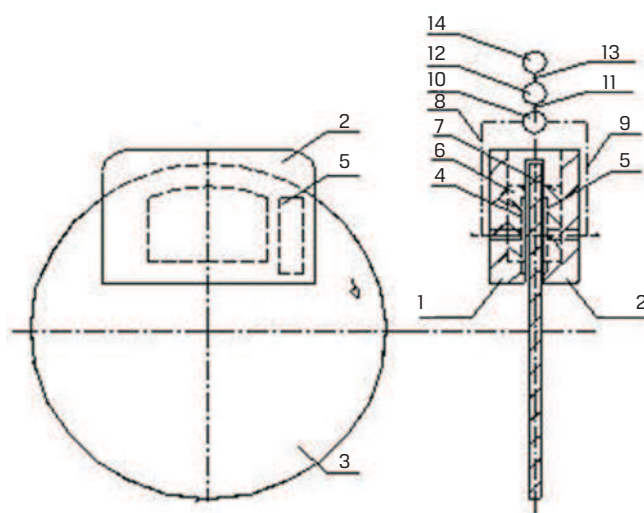
- nadciśnieniem,
- podciśnieniem.

W wyniku wstępnych badań rozpoznawczych wybrano rozwiązanie z zastosowaniem podciśnienia. Za takim rozwiązaniem przemawia m.in. możliwość wykorzystania w samochodzie podciśnienia z kolektora dolotowego silnika.

Do odsysania pyłów w układzie hamulcowym wykorzystano produkty firmy Schmalz: płaską owalną ssawkę NBR45G1/4, współpracującą z eżektorem SEM100SDA oraz filtrem STF3/4"-IGN do pyłów o wymiarach większych niż 3 μm . Prędkość obrotowa tarczy hamulcowej wynosiła w badaniach 667 min^{-1} .

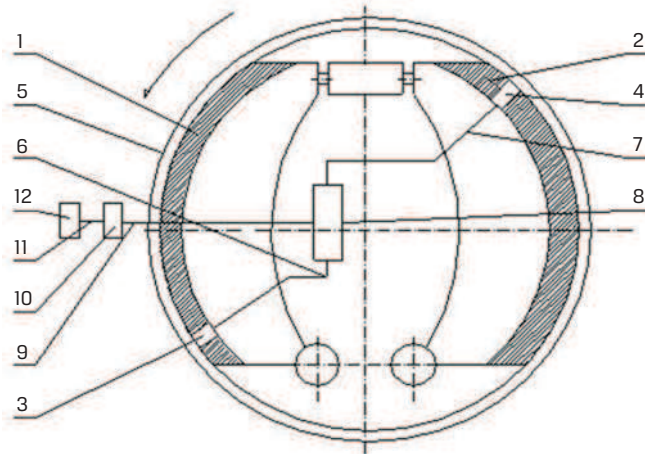
Obiektem wstępnych badań były:

- tarcza hamulcowa do samochodu Mercedes o grubości 12 mm i średnicy zewnętrznej 270 mm,



Rys. 2. Schemat urządzenia do zmniejszania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego.

Oznaczenia: 1 i 2 - zaciski, 3 - tarcza hamulcowa, 4 i 5 - otwory ssące, 6 i 7 - nakładki cierne, 8, 9, 13 - przewody metalowe, 10 - trójnik, 11 - przewody elastyczne, 12 - filtr, 14 - kolektor ssący.

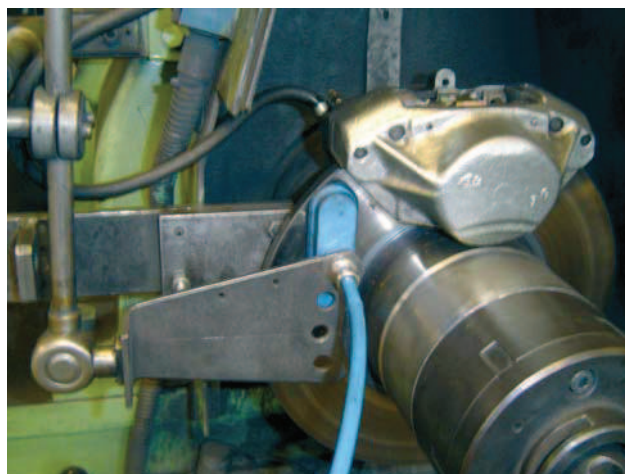


Rys. 3. Schemat urządzenia do zmniejszania emisji pyłów z bębnowego układu hamulcowego.
Oznaczenia: 1 i 2 - szczęki hamulcowe, 3 i 4 - otwory ssące, 5 - bęben hamulcowy,
6, 7 i 11 - przewody metalowe, 8 - trójnik, 9 - przewody elastyczne, 10 - filtr, 12 - kolektor ssący.

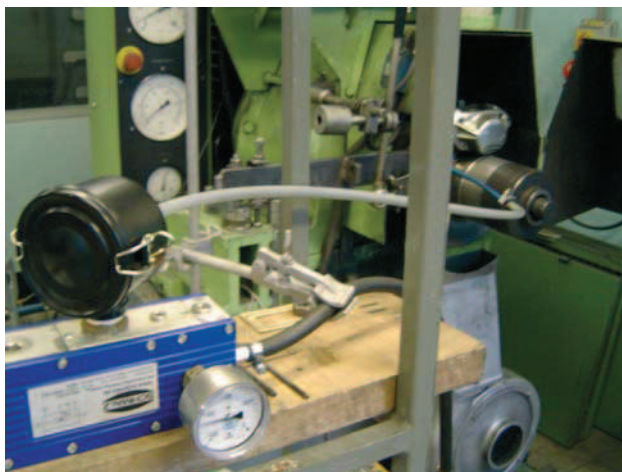
- zaciski W 123 dwustronnego działania do samochodu Mercedes,
- nakładki cierne o polu powierzchni 55 cm².

W wyniku wstępnych badań przyjęto położenie ssawki nad nakładkami ciernymi z zastosowaniem szczeliny o szerokości 1,5 mm.

Stanowisko badawcze do badania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego przedstawiono na zdjęciach - rysunki 4 i 5.



Rys. 4. Widok zestawu hamulcowego i położenia ssawki.



Rys. 5. Widok zestawu podciśnieniowego - dysza eżektorowa z wakuometrem i filtrem połączonym z ssawką.

Program badań obejmował możliwość sterowania następujących wielkości fizycznych:

- liczby cykli hamowań,
- temperatury tarczy hamulcowej, przy której następuje włączenie wyciągu – t_a ,
- temperatury tarczy hamulcowej, przy której następuje wyłączenie wyciągu – t_z ,
- podciśnienia w układzie pneumatycznym odsysania pyłów – Δp .

W wyniku badań wstępnych liczbę hamowań przyjęto równą 100.

Badania empiryczne zostały wykorzystane do opracowania modelu matematycznego zjawiska zmniejszania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego.

Do badania zjawiska zmniejszania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego przyjęto model (1), tworzony na zasadzie podobieństw funkcjonalnego (model behawiorystyczny) [6]:

$$k_{PM} = f(t_a, t_z, \Delta p) \quad (1)$$

gdzie k_{PM} jest współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji pyłów z układu hamulcowego samochodu:

$$k_{PM} = 1 - \frac{m_k - m_f}{m_k} \quad (2)$$

przy czym: m_f – różnica masy filtra przed badaniami i po nich,
 m_k – różnica masy klocka przed badaniami i po nich.

Strukturę modelu przyjęto w postaci funkcji stopnia drugiego zmiennych niezależnych:

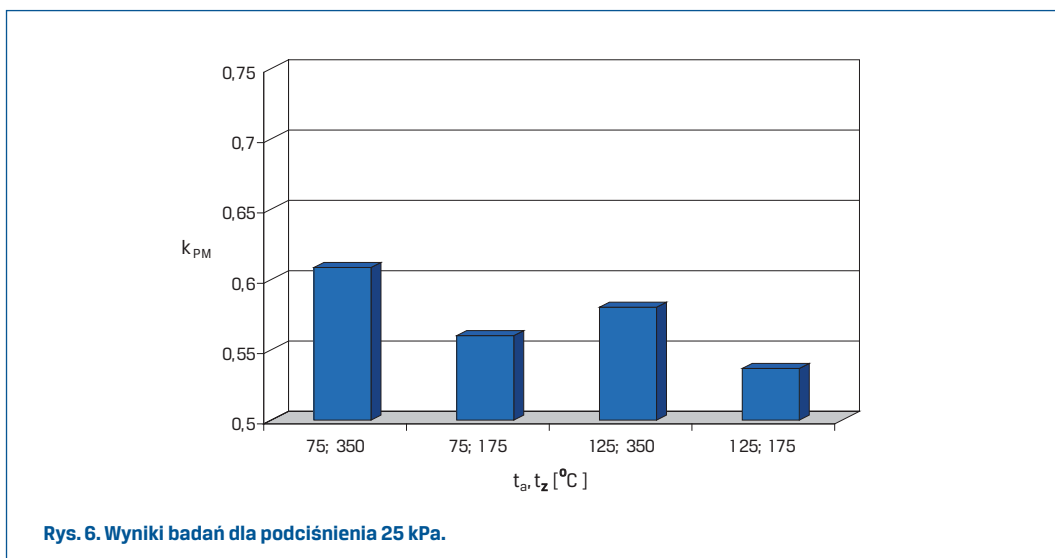
$$k_{PM} = a_0 + a_{a1} \cdot t_a + a_{a2} \cdot t_a^2 + a_{z1} \cdot t_z + a_{z2} \cdot t_z^2 + a_{p1} \cdot \Delta p + a_{p2} \cdot (\Delta p)^2 \quad (3)$$

Do zidentyfikowania siedmiu parametrów modelu przyjęto plan doświadczeń, przedstawiony wraz z wynikami w tabeli 1. Graniczne wartości zmiennych niezależnych zostały przyjęte w wyniku przeprowadzonych badań rozpoznawczych.

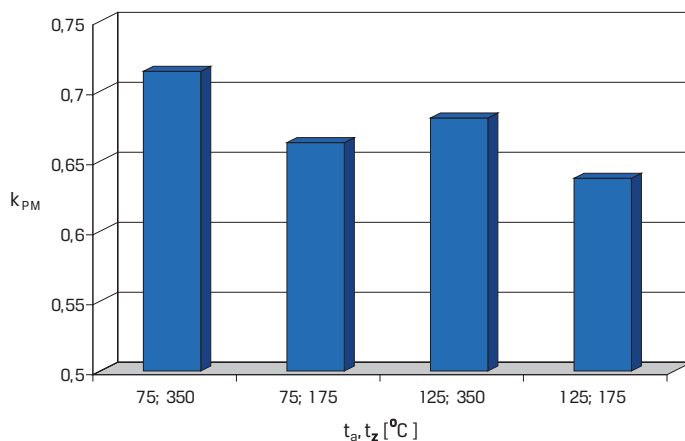
Tabela 1. Plan doświadczeń i wyniki badań.

Δp	t_a	t_z	kPM
[kPa]	[°C]	[°C]	
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

W postaci graficznej wyniki badań przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Wyniki badań dla podciśnienia 25 kPa.



Rys. 7. Wyniki badań dla podciśnienia 32 kPa.

Wyniki identyfikacji modelu, dokonanej zgodnie z kryterium minimum kwadratów [12], przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki identyfikacji modelu.

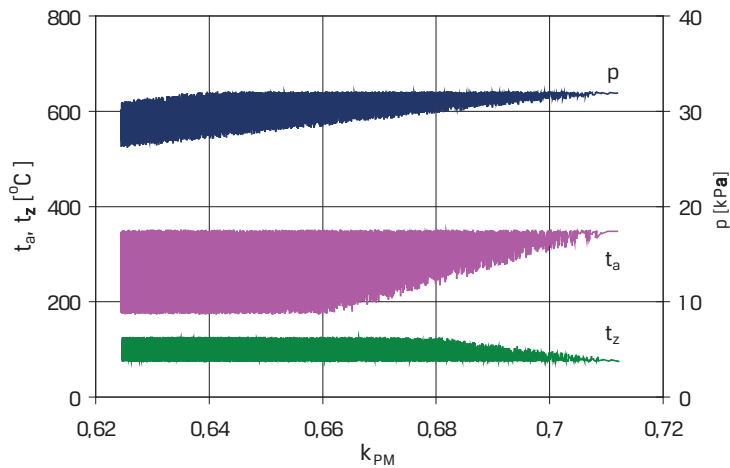
a_0	1,48E-01
a_{a1}	1,55E-02
a_{z1}	3,15E-04
a_{p1}	-6,91E-05
a_{a2}	8,20E-07
a_{z2}	-1,02E-05
a_{p2}	-7,29E-07

Pierwszy rodzaj badania modelu polega na ocenie zbieżności kombinacji zmiennych niezależnych do największej wartości zmiennej zależnej. Badanie przeprowadzono metodą Monte Carlo [2, 15].

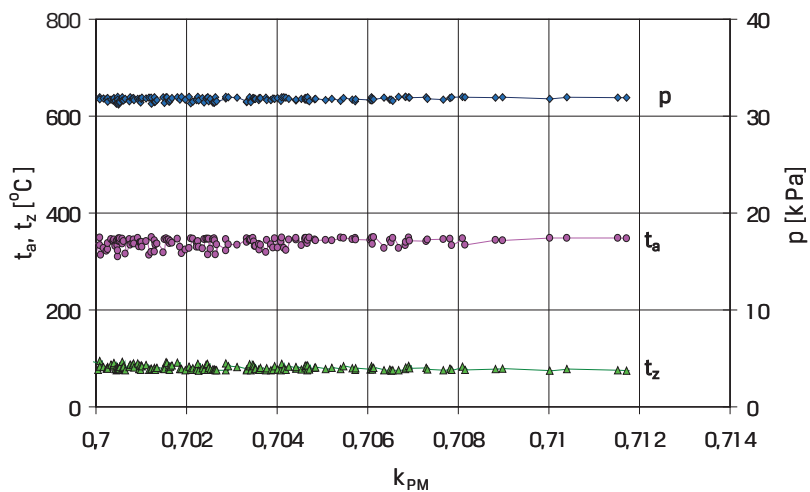
Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wyniki badania zbieżności kombinacji zmiennych niezależnych, zapewniających monotoniczne zwiększanie się zmiennej zależnej.

Drugi rodzaj badań modelu dotyczył analizy korelacyjnej między współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji pyłów z układu hamulcowego a zmiennymi niezależnymi. Badania przeprowadzono dla zbiorów wyników badań symulacyjnych modelu.

Analizy przeprowadzono z zastosowaniem teorii korelacji liniowej Pearsona [16] oraz metod nieparametrycznych [19]: korelacji rang Spearmana [18], korelacji tau Kendalla [9] i korelacji gamma Kruskala [10].

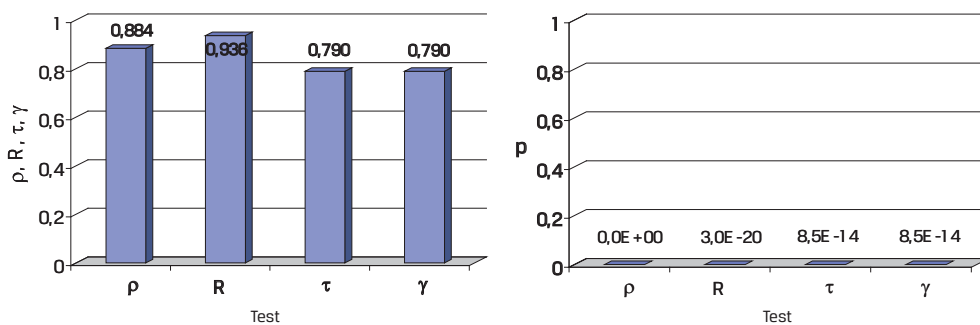


Rys. 8. Zbieżność kombinacji zmiennych niezależnych, zapewniających monotoniczne zwiększanie się wartości zmiennej zależnej.

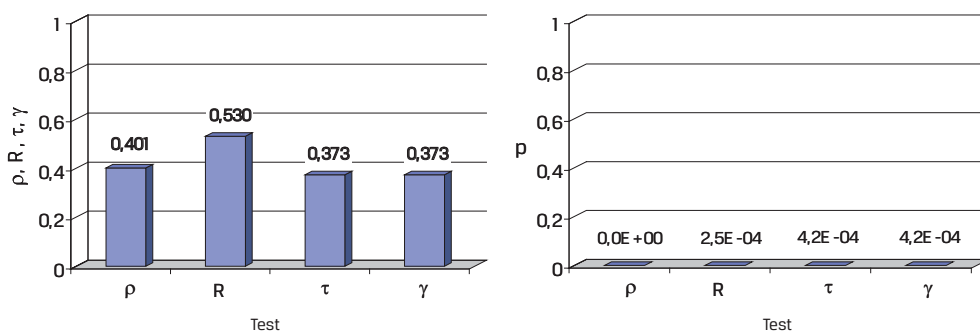


Rys. 9. Zbieżność kombinacji zmiennych niezależnych, zapewniających monotoniczne zwiększanie się wartości zmiennej zależnej.

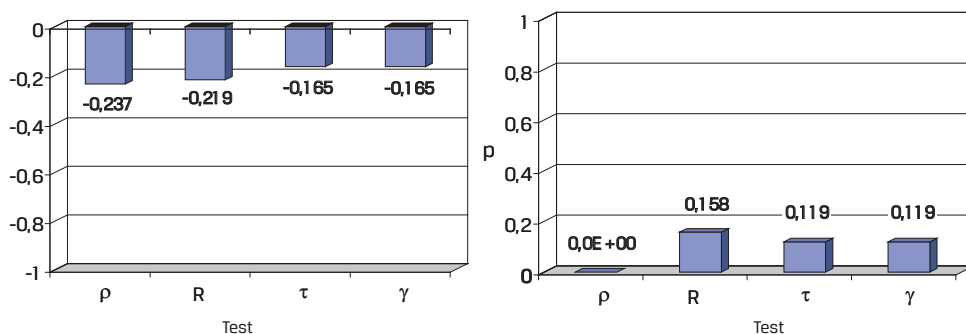
Na rysunkach 10 – 12 są przedstawione wyniki badań dla wyników badań symulacyjnych modelu. Każdy z rysunków zawiera wykres wartości współczynników korelacji Pearsona, Spearmana, tau Kendalla i gamma Kruskala oraz wykres prawdopodobieństwa nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji dla poszczególnych rodzajów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



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 pyłów z układu hamulcowego oraz prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji p.



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

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące szczegółowe wnioski:

- zwiększanie podciśnienia w układzie ssącym i podwyższanie temperatury tarczy hamulcowej przy włączaniu wyciągu oraz obniżanie temperatury tarczy hamulcowej przy wyłączeniu wyciągu jednoznacznie wpływają na zwiększenie współczynnika skuteczności zmniejszania emisji pyłów stałych z układu hamulcowego,
- najsilniejsza korelacja występuje między współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji pyłów z układu hamulcowego oraz podciśnieniem w układzie ssącym, najsłabsza – między współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji pyłów z układu hamulcowego oraz temperaturą tarczy hamulcowej przy wyłączeniu wyciągu.

Wyniki badań korelacyjnych zjawisk, związanych z ograniczaniem emisji pyłów 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.

Wstępne badania laboratoryjnego urządzenia do ograniczania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego wskazują, że metoda zaproponowana przez autorów jest skutecznym sposobem zmniejszania zagrożenia środowiska przez pyły. W badaniach wstępnych uzyskano współczynnik skuteczności zmniejszania emisji pyłów z układu hamulcowego samochodu przekraczający nawet 70%, co należy ocenić jako wynik bardzo obiecujący.

3. Plan rozwoju koncepcji urządzenia do ograniczania emisji pyłów z układów hamulcowych

Plany koncepcji urządzenia do ograniczania emisji pyłów z układów hamulcowych obejmują:

- badania przedprototypu urządzenia do ograniczania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego do badań na stanowisku Kraussa,
- badania przedprototypu urządzenia do ograniczania emisji pyłów z bębnowego układu hamulcowego do badań na stanowisku Kraussa,
- badania na stanowisku Kraussa ograniczania emisji pyłów z układów hamulcowych: tarczowego i bębnowego,
- badania na stanowisku hamulcowym ograniczania emisji pyłów z układów hamulcowych: tarczowego i bębnowego,
- badania na hamowni podwoziowej urządzeń przedprototypowych do ograniczania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego zabudowanych w samochodach,
- badania w eksploatacji nadzorowanej urządzeń przedprototypowych do ograniczania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego zabudowanych w samochodach,
- badania składu i wymiarów pyłów emitowanych z układów hamulcowych samochodów,
- badania optymalizacyjne parametrów urządzeń do ograniczania emisji pyłów z układów hamulcowych,

- badania weryfikacyjne skuteczności ograniczania emisji pyłów z układów hamulcowych.

W wyniku zaplanowanego programu badań mają powstać wytyczne do opracowania prototypów urządzeń do ograniczania emisji pyłów z układów hamulcowych.

4. Podsumowanie

Emisja pyłów ze źródeł antropogennych należy do najważniejszych problemów ekologicznych współczesności. Szczególnie duże zagrożenie pyłami występuje w centrach aglomeracji miejskich, gdzie źródła emisji pyłów są jednoznacznie związane z motoryzacją. Spośród motoryzacyjnych źródeł pyłów wyróżnia się układ hamulcowy, powodujący emisję pyłów o wymiarach i składzie szczególnie szkodliwych dla zdrowia ludzi. W związku z tym w PIMOT podjęto inicjatywę badań zjawiska emisji pyłów z układów hamulcowych pojazdów samochodowych oraz metod zmniejszania tej emisji. Zostały opracowane koncepcje i wykonano urządzenia laboratoryjne do zmniejszania emisji pyłów z układów hamulcowych samochodów.

Wstępne badania laboratoryjnego podciśnieniowego urządzenia do tarczowego układu hamulcowego umożliwiły opracowanie modelu matematycznego zjawiska zmniejszania emisji pyłów. Wielkościami sterowanymi w modelu są: podciśnienie w układzie pneumatycznym odsysania pyłów oraz temperatura włączania i wyłączania wyciągu. Z badań modelu matematycznego jednoznacznie wynika, że najsilniejszy wpływ na skuteczność zmniejszania emisji pyłów ma podciśnienie w układzie pneumatycznym. Badania korelacyjne modelu wykazały, że najsilniejsza korelacja występuje między współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji pyłów oraz podciśnieniem w układzie ssącym, najslabsza – między współczynnikiem skuteczności zmniejszania emisji pyłów z układu hamulcowego oraz temperaturą tarczy hamulcowej przy wyłączaniu wyciągu

Badania modelu skuteczności zmniejszania emisji pyłów 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. Zaproponowana metoda zmniejszania 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. Zaproponowano program badań, obejmujący budowę trakcyjnych urządzeń do zmniejszania emisji pyłów z układów hamulcowych zarówno tarczowych, jak i bębnowych. Planuje się prowadzenie badań w warunkach symulacyjnych na hamowni podwoziowej oraz w eksploatacji nadzorowanej. W wyniku realizacji programu badawczego zostaną opracowane wytyczne do budowy prototypów urządzeń do ograniczania emisji pyłów z układów hamulcowych.

5. Literatura

- [1.] AGRICOLA, G.: *De re metalica*. <http://www.farlang.com/gemstones/agricola-metallica/>.
- [2.] CHŁOPEK, Z.: *The cognitive interpretation of the Monte Carlo method for the technical applications*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 3 (43)/2009, ss. 38–46.
- [3.] CHŁOPEK, Z., JAKUBOWSKI, A.: *A study of the particulate matter emission from the braking systems of motor vehicles*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 4 (4)/2009, ss. 45–52.
- [4.] CHŁOPEK Z., JAKUBOWSKI A.: *The decrease of particulate matter emission from a brake system of a vehicle*. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji 1/2010, ss. 3–15.
- [5.] CHŁOPEK, Z., JAKUBOWSKI, A.: *The examination of the reduction of particulate matter emission from motor vehicle braking systems*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 4(48)/2010, ss. 29–36.
- [6.] CHŁOPEK, Z., PIASECZNY, L.: *Remarks about the modelling in science researches*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 4(11)/2001, ss. 47–57.
- [7.] CHŁOPEK, Z., ŻEGOTA, M.: *The emission of particulate matter PM10 from vehicles*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 1 (21)/2004, ss. 3–13.
- [8.] EASTWOOD, P.: *Particulate emissions from motor vehicles*. Chichester: John Wiley, 2008.
- [9.] KENDALL, M.G.: *A New measure of rank correlation*. 1938. *Biometrika*, 30, ss. 81–89.
- [10.] KRUSKAL, H., WALLIS, W.A.: *Use of ranks in one-criterion variance analysis*. *Journal of the American Statistical Association* 47 (260). 1952, ss. 583–621.
- [11.] LOHMEYE, R A., DÜRING, I., LORENTZ, H.: *Validierung von PM10-Immissions-berechnungen im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Staubbildung von Straßen, Schildhornstraße in Berlin*. Auftraggeber: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin, April 2001.
- [12.] MANCZAK, K.: *Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1971.
- [13.] MAYER, A. et al.: *Nanoparticle-emissions of EURO 4 and EURO 5 HDV compared to EURO 3 with and without DPF*. *SAE Emissions Measurement and Testing*. 2007, ss. 335–43.
- [14.] MERKISZ, J.: *Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1997.
- [15.] METROPOLIS, N., ULAM, S., 1949: *The Monte Carlo Method*. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 44, No. 247 (Sep., 1949), ss. 335–341.
- [16.] PEARSON, K.: *On the theory of contingency and its relation to association and normal correlation*. *Drapers' Company Research Memoirs. Biometric Ser. I*. 1904.
- [17.] SIEMIŃSKI, M.: *Środowiskowe zagrożenie zdrowia*. Warszawa: PWN, 2001.
- [18.] SPEARMAN, CH.: *The proof and measurement of association between two things*. *Americal Journal of Psychology*. 15 (1904), ss. 72–101.
- [19.] WASSERMAN, L.: *All of nonparametric statistics*. Springer, 2007.
- [20.] Worldwide emission standards. Heavy duty & off-road vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2010/2011.
- [21.] Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2011/2012.
- [22.] WU Y.-S. et al.: *The measurements of ambient particulates (TSP, PM2.5, PM2.5–10), chemical component concentration variation, and mutagenicity study during 1998–2001 in central Taiwan*. *Journal of Environmental Science and Health, Part C Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews*, Volume 20, Issue 1, 2002. 45–59.

Referat jest efektem realizacji projektu rozwojowego pt. „Opracowanie urządzeń do ograniczenia emisji pyłów z tarczowych i bębnowych układów hamulcowych pojazdów samochodowych”, finansowanego przez NCBiR, zgodnie z umową Nr 0977/R/T02?2010/10.