

Jerzy Kupiec, Hubert Pikosz, Grzegorz Ślaski

Parametry pracy hamulców samochodu osobowego w badaniach eksploatacyjnych

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.441
Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

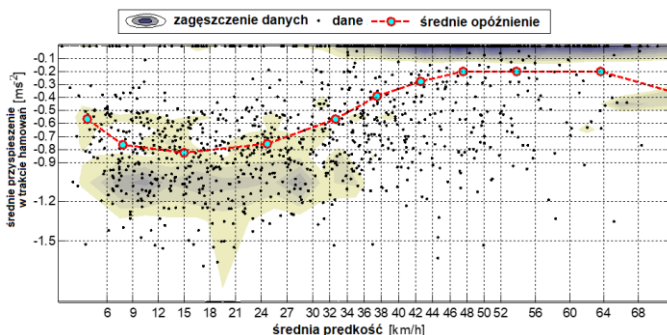
W artykule przedstawiono wyniki pomiarów i analizy statystycznej zmiennych charakteryzujących proces hamowania i pracę układu hamulcowego samochodu osobowego w zróżnicowanych warunkach eksploatacji. W części wstępnej przedstawiono system pomiarowy umożliwiający pomiary parametrów pracy układu hamulcowego podczas eksploatacji. Omówiono metodykę pomiaru i wyznaczenia takich wielkości jak temperatura tarcz, naciski jednostkowe i prędkość poślizgu na styku tarczy i klocka hamulcowego, ciśnienie hamowania, prędkość pojazdu i jego przyspieszenie wzdłużne. Eksploatacyjne warunki pracy objęły jazdę w ruchu miejskim, jazdę pozamiejską oraz autostradową. Na podstawie wykonanych pomiarów opracowano histogramy wartości mierzonych. Określono na podstawie uzyskanych wyników typowe przyrosty temperatury podczas pojedynczego hamowania w poszczególnych warunkach, oraz przeanalizowano przebiegi zmian temperatury podczas chłodzenia tarcz hamulcowych. Uogólniono zakresy typowych wartości badanych parametrów dla poszczególnych warunków eksploatacji i porównano je z wartościami charakterystycznymi dla hamowań awaryjnych, które można uznać za wartości maksymalne.

Słowa kluczowe: hamulce, proces hamowania, analiza statystyczna

Wstęp

Aby można było prowadzić badania trwałościowe podzespołów układu hamulcowego w warunkach laboratoryjnych konieczna jest znajomość obciążeń, jakim podlegają podczas normalnej eksploatacji. Obciążenia te są niższe niż obciążenia, jakim układ hamulcowy poddawany jest w sytuacjach ekstremalnych.

Badania prowadzone nad statystycznym rozkładem wybranych parametrów eksploatacyjnych cykli jezdnych w ruchu miejskim, związane z budową modeli zużycia energii przez samochód elektryczny [4], wykazały znaczne zróżnicowanie rejestrowanych opóźnień spowalniania lub hamowania samochodu w ruchu miejskim.



Rys. 1. Wynik analizy średnich opóźnień na odcinkach rzędu kilku-nastu do kilkudziesięciu metrów dla przejazdów miejskich [4]

Wynik takiej analizy przedstawiono na rys. 1. Zauważyć można, że najczęściej obserwowane wartości przyspieszenia wzdłużnego to wartości z przedziału $-0,9 \dots -1,3 \text{ m/s}^2$ [4]. Warto zwrócić uwagę, że

układowi hamulcowemu znacznie wyższe wymagania sprawdzane w ramach badań homologacyjnych, czy też podczas okresowej jego kontroli która decyduje o dalszym dopuszczeniu pojazdu do ruchu – jest to wymóg osiągnięcia minimalnej wartości opóźnienia 5 m/s^2 . W praktyce osiągalne są w typowych samochodach osobowych opóźnienia rzędu 1 g ($9,81 \text{ m/s}^2$) [2,3]. Dla takich opóźnień prowadzi się wiele z badań wymaganych w ramach badań homologacyjnych. Np. badanie tarczy hamulcowej przy wysokim obciążeniu prowadzi się dla opóźnienia 10 m/s^2 , a badanie na zmęczenie cieplne przy opóźnieniu 5 m/s^2 [6]. Aby można było osiągać takie opóźnienia wymagany jest zapewnienie niezmienności współczynnika tarcia pomiędzy współpracującymi elementami układu hamulcowego. Wartości tego współczynnika jak wykazują badania [7] wzrasta wraz z temperaturą od $0,3$ do $0,5$ (od 25°C do 200°C) a następnie przy dalszym wzroście temp. powyżej 300°C ponownie spada do $0,3$.

Znaczna różnica pomiędzy wartościami eksploatacyjnymi a tymi wynikającymi z warunków badań dopuszczających do ruchu była genezą prac opisanych w niniejszym artykule. Ich celem była realizacja pomiarów i analiza statystyczna zmiennych charakteryzujących proces hamowania i pracę układu hamulcowego samochodu osobowego w zróżnicowanych ale typowych warunkach eksploatacji.

1. Charakterystyka obiektu badań oraz testów

Badania drogowe zmiennych charakteryzujących proces hamowania przeprowadzono przy wykorzystaniu samochodu osobowego Opel Astra H 1.3 CDTI. Pojazd wyposażony jest w dwuobwodowy układ hamulcowy z podciśnieniowym układem wspomagania siły hamowania oraz system ABS. Hamulec roboczy działa na koła osi przedniej i tylnej poprzez pływające zaciski hamulcowe z pojedynczymi tłoczkami. Na osi przedniej zastosowano tarcze hamulcowe wentylowane natomiast oś tylną wyposażono w tarcze bez wentylacji. Średnica przedniej tarczy hamulcowej to 280 mm zaś średnica tłoczka zacisku hamulca to 57 mm [1]. Pojazd wraz z kierowcą, pasażerem oraz aparaturą pomiarową charakteryzował się następującym rozkładem nacisków na osie: przednia 866 kg , tylna 671 kg . Pojazd wyposażony był w ogumienie o rozmiarze $205/55 \text{ R } 16$.

Badania przeprowadzono w temperaturze otoczenia 16°C na terenie miasta Poznań oraz fragmencie autostrady A2 stanowiącej obwodnicę miasta. W badaniach zrealizowano cztery rodzaje testów nazwanych odpowiednio:

1. **Jazda miejska** - przejazd zgodnie z przepisami ruchu drogowego po drodze zaopatrzonej w typową infrastrukturę miejską (przejścia dla pieszych, sygnalizacja świetlna, ronda, itp.) w warunkach codziennego miejskiego ruchu drogowego (okresowe korki, itp.). Trasa przebiegała przez centrum Poznania, miała długość $13,5 \text{ km}$ a czas przejazdu wynosił 30 min .

2. **Jazda autostradowa** - dwukrotny przejazd typowego odcinka autostradowego (fragmentu obwodnicy Poznania od węzła Krzesiny do węzła Poznań Zachód) o długości 15 km . Jazda odbywała się prawym pasem z prędkością 120 km/h oraz okresowym hamowaniem ze względu na brak możliwości bezkolizyjnego wyprzedzenia pojazdów poprzedzających; styl jazdy w ocenie subiektywnej określono jako „kierowca przeciętny”.

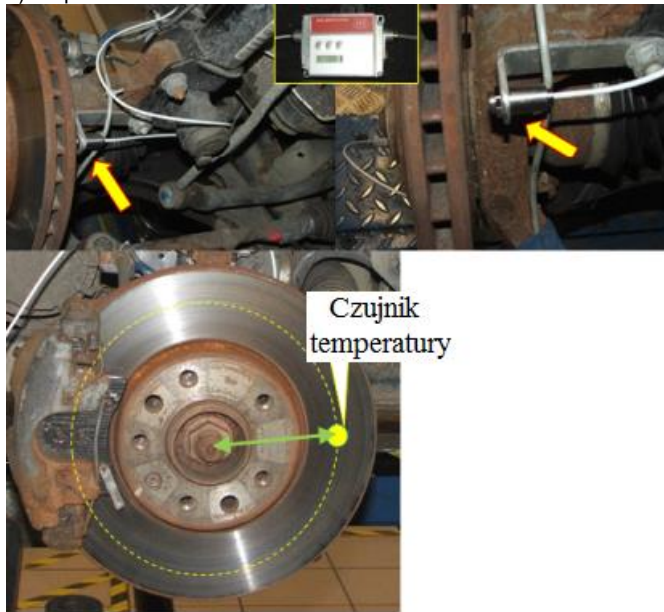
3. **Jazda autostradowa 120-80 km/h** - przejazd autostradą odcinka umożliwiającego bezpieczne wykonanie hamowań z prędkości 120 km/h do prędkości 80 km/h przy założeniu, że nie będą to hamowania awaryjne. Po rozpędzeniu pojazdu do prędkości 120 km/h i upewnieniu się, że nie stworzy to zagrożenia dla innych uczestników ruchu wykonano szybkie hamowanie do prędkości 80 km/h a następnie kontynuowano jazdę rozpędzając pojazd do wymaganej prędkości - procedurę hamowania powtarzano do momentu ustabilizowania się temperatury tarczy hamulcowej.

4. **Hamowanie awaryjne** - sekwencja prób gwałtownego hamowania z prędkości 100 km/h do zatrzymania przy maksymalnym wykorzystaniu przyczepności na płaskim odcinku drogi. Następnie ponownie rozpędzono samochód do prędkości 100 km/h i hamowano pojazd. Testy prowadzono do osiągnięcia temperatury tarczy 400°C.

2. Aparatura pomiarowa i sposób jej montażu

Pomiary drogowe wymagały specyficznej aparatury pomiarowej umożliwiającej działanie w warunkach ruchu pojazdu. W trakcie badań zdecydowano się rejestrować następujące zmienne:

- ciśnienie hamowania (dla zacisku koła przedniego lewego),
- temperatura powierzchni wewnętrznej strony tarczy hamulcowej (koła przedniego lewego),
- prędkość samochodu,
- opóźnienie hamowania samochodu.



Rys. 2. Sposób montażu czujnika temperatury

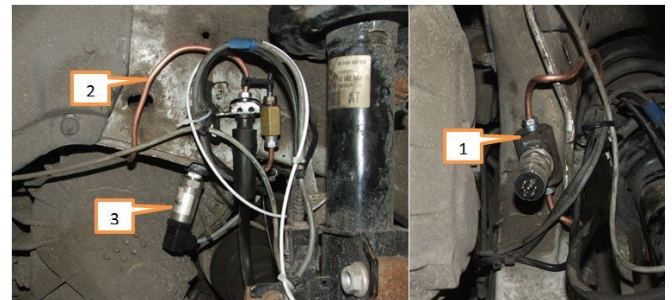
Temperaturę powierzchni tarczy mierzono przy pomocy czujnika temperatury IR CTM-3SF22-C3 przeznaczonego do metali i materiałów kompozytowych, firmy MicroEpsilon określającego temperaturę obiektu poprzez bezkontaktowy pomiar promieniowania pod-

czwonego emitowanego przez jego powierzchnię. Detektor przetwarza przychodzące promieniowanie podczerwone na sygnał elektryczny. Wynikiem jego działania jest wartość temperatury, która może być wykorzystana do dalszego przetwarzania. Sposób montażu czujnika jak i miejsce jego położenia względem tarczy hamulcowej pokazano strzałkami na rys 2.

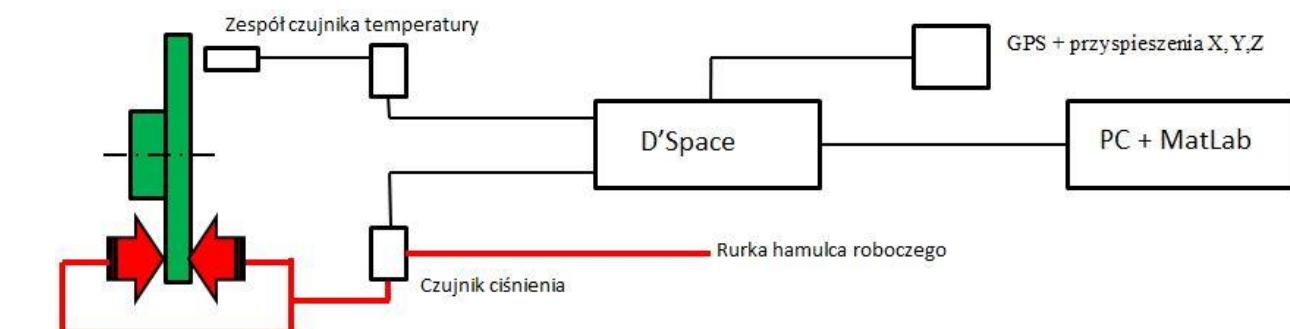
Czujnik zamontowano w odległości 15 mm od powierzchni wewnętrznej strony tarczy w połowie szerokości jej powierzchni czynnej (odległość od osi obrotu tarczy wynosiła 111 mm). Ze względu na brak jednoznacznych danych odnośnie współczynnika emisyjności badanych tarcz hamulcowych, wyznaczono ją, zgodnie z zaleceniami firmy MicroEpsilon, drogą eksperymentalną. Dla fragmentu badanej tarczy hamulcowej wykonano jednocześnie pomiar temperatury termometrem stykowym TES-1312 z termoelementem TP-K03 oraz bezstykowym czujnikiem temperatury CTM-3SF22-C3 (rys. 3.) Wartość współczynnika emisyjności, programowaną w sterowniku bezstykowego czujnika temperatury określono na $\epsilon=0,630$. Przy takiej jego wartości różnica wskazań obu termometrów w zakresie temperatur 50-200°C, nie przekraczała 2°C.



Rys. 3. Sposób ustalenia współczynnika emisyjności: 1-termometr stykowy TES-1312 z termoelementem TP-K03, 2-bezstykowy czujnik temperatury CTM-3SF22-C3, 3-wycinek badanej tarczy hamulcowej



Rys. 4. Sposób montażu czujnika ciśnienia w przewodzie hamulcowym koła przedniego lewego. 1- trójnik, 2 - rurka przedłużająca, 3 - czujnik ciśnienia



Rys. 5. Schemat toru pomiarowego wykorzystywany w badaniach drogowych

Do pomiaru ciśnienia panującego w przewodzie hamulcowym wykorzystano czujnik ciśnienia ADZ-SML-20.0-160. Czujnik ten posiada piezorezystancyjny przetwornik ciśnienia. Membrana ze stali szlachetnej jest całkowicie hermetyczna. Przetwornik jest odporny na drgania, uderzenia i szoki temperaturowe. Czujnik ciśnienia zamontowano przy zacisku hamulcowym koła przedniego lewego (rys.4).

Prędkość samochodu wyznaczono przy pomocy 10Hz odbiornika GPS firmy Garmin. Przyspieszenie samochodu podczas hamowania zmierzono przy pomocy mikromechanicznego dwuosowego czujnika przyspieszeń o zakresie pomiarowym 5 g firmy BOSCH. Wszystkie wykorzystywane czujniki współpracowały z systemem akwizycji danych korzystającym z platformy dSPACE a opisane zmienne rejestrowano z krokiem próbkowania 0,005s. Dalszą obróbkę danych prowadzono w środowisku Matlab [5]. Schemat toru pomiarowego przedstawiono na rys 5.

Korzystając z uzyskanych wyników pomiarów oraz parametrów układu hamulcowego wyznaczono dwie dodatkowe zmienne:

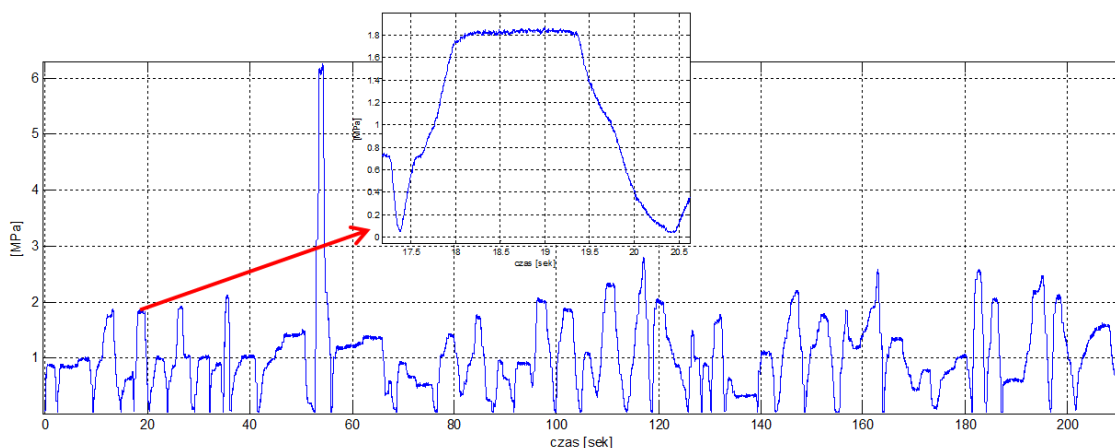
- nacisk jednostkowy klocka hamulcowego na tarczę - obliczono go dzieląc siłę docisku klocka hamulcowego do tarczy (mnożąc ciśnienie w zacisku przez pole powierzchni tłoczka o średnicy 57 mm) przez pole powierzchni klocka hamulcowego równe 52 cm²,
- wartość poślizgu względem tarczy - obliczono ją mnożąc prędkość pojazdu przez współczynnik uwzględniający przelicznik jednostek, promień koła oraz średni promień tarczy hamulcowej.

3. Wyodrębnienie danych do analizy

Podczas poszczególnych przejazdów testowych rejestrowano cały czas wybrane parametry jednak z całych zarejestrowanych przejazdów do analizy hamowania wyodrębniano dane związane tylko z samym procesem hamowania. Początek zakresu analizowanych danych – procesu hamowania – ustalano dla czasu odpowiadającego wzrostowi ciśnienia w przewodzie hamulcowym a koniec zakresu dla czasu spadku ciśnienia lub opóźnienia hamowania do wartości równej zero. Następnie wycięte fragmenty danych zapisywano kolejno do innego pliku. Na rys. 6 przedstawiono przykładowy przebieg złożonych w jedną całość danych z wyodrębnionych fragmentów dokumentujących przebiegi poszczególnych hamowań z całego zarejestrowanego przejazdu w warunkach jazdy miejskiej (w jej przypadku czas hamowania stanowił 14% całkowitego czasu przejazdu).

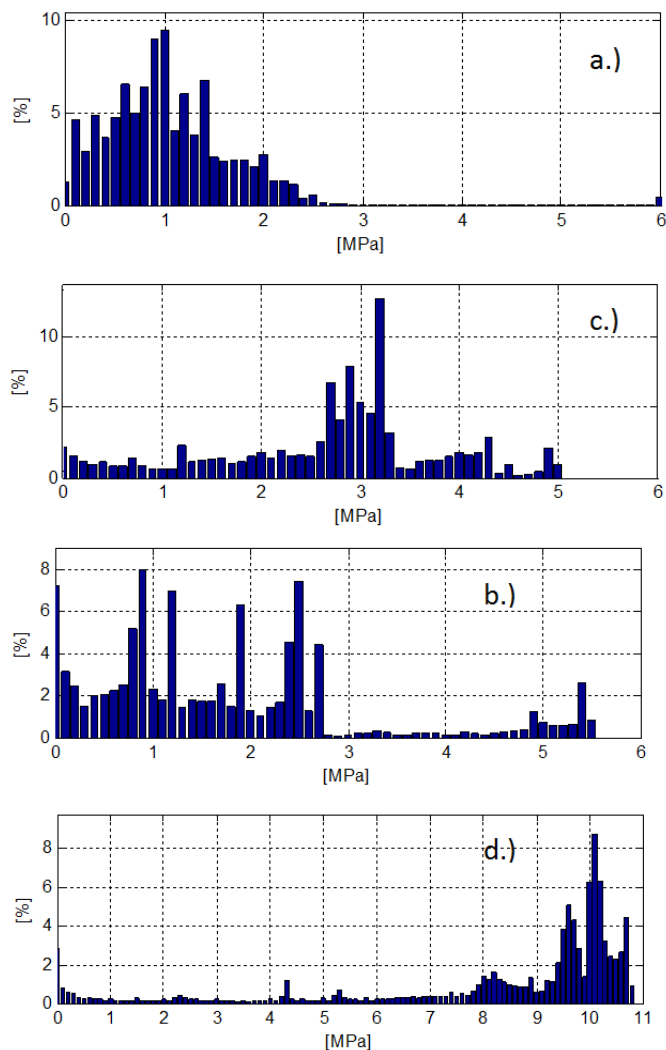
4. Analiza statystyczna zmian wartości ciśnienia podczas hamowania

Pierwszą wartością poddaną analizie była wartość ciśnienia



Rys. 6. Przykładowy przebieg zmian wartości ciśnienia w przewodzie hamulcowym podczas testu „jazda miejska”

hamowania dla realizowanych scenariuszy badań. Jest ona miarą obciążenia ciśnieniem elementów układu hamulcowego, ale także pozwala oszacować poziom nacisków jednostkowych pomiędzy tarczą a klockiem hamulcowym.



Rys. 7. Histogramy rozkładów wartości ciśnienia dla różnych warunków badań: a) jazda w warunkach miejskich, b) jazda autostradowa, c) hamowania na autostradzie z 120 do 80 km/h, d) hamowania awaryjne ze 100 km/h.

Najwyższe wartości ciśnienia hamowania zarejestrowano w badaniach nazwanych „hamowanie awaryjne” - była to wartość 10,8 MPa. Aby lepiej zaprezentować uzyskane wyniki dla zarejestrowa-

nych danych przygotowano histogramy przedstawiające liczebności obserwacji wystąpienia wartości ciśnienia w poszczególnych przedziałach, co 0,1 MPa - rys. 7 dla każdego z badań osobno. Trzy z nich analizowały ciśnienia do 6 MPa, ponieważ wyższych wartości nie obserwowano w tych testach. W teście hamowania awaryjnego osiągnęto wartości maksymalne dwukrotnie wyższe dochodzące do 10,8 MPa, natomiast wartości średnie i mediana były w hamowaniach awaryjnych od 3 do 8...10 razy wyższe niż w pozostałych badaniach. Histogramy obliczono dla wszystkich próbek z analizowanych zakresów, co oznacza, że ujmują one również fazy narastania i spadku ciśnienia a nie tylko wyłącznie zakresy dla fragmentu ustalonego procesu hamowania.

Dla uzyskanych zbiorów danych dla każdego z badań określono parametry statystyczne w celu opisanie rozkładów eksperymentalnych – przedstawiono je w tabeli 1. Ilustrują one przy pomocy pojedynczych wartości parametrów, że eksploatacyjne wartości ciśnień hamowania są kilkukrotnie (nawet 10-krotnie) mniejsze od wartości ekstremalnych.

Tab. 1. Zestawienie parametrów statystycznych obserwacji wartości ciśnienia dla poszczególnych testów

	Miasto	Autostrada	120 – 80 km/h	Hamowanie awaryjne ze 100 km/h
Wartość maksymalna [MPa]	6,25	5,51	4,99	10,80
Wartość średnia [MPa]	1,05	1,73	2,73	8,12
Mediana [MPa]	0,96	1,42	2,99	9,50
Wartość najczęściej występująca [MPa]	1	0,9	3,2	10

5. Analiza wartości opóźnień hamowania

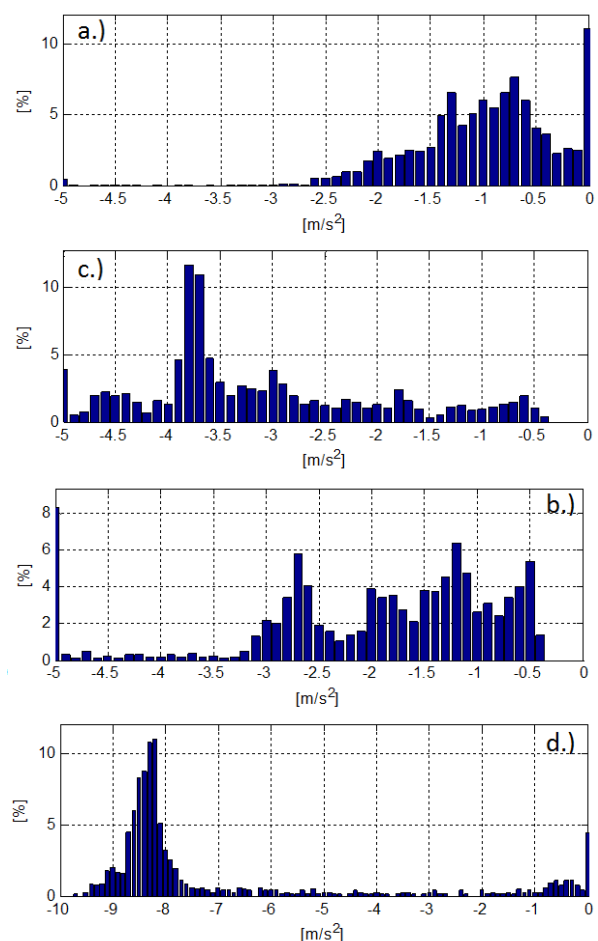
Wartości opóźnień hamowania (przyspieszeń o znaku ujemnym) są liniowo związane z siłami hamowania a te zależą od wartościami ciśnień podczas hamowania.

Analizę rozkładu wartości przyspieszeń wzdluznych zrealizowano tworząc histogramy dla tych wartości w różnych rodzajach badań. Ich kształt jest lustrzanym odbiciem kształtów histogramów wartości ciśnień, co wynika z ujemnego znaku przyspieszeń oraz wspomnianej, w znacznym przedziale sił hamowania, liniowej zależności pomiędzy ciśnieniem hamowania a jego opóźnieniem (rys.8). Zestawienie parametrów statystycznych dla opóźnień hamowania w poszczególnych badaniach przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie wartości przyspieszenia wzdluznego dla prób drogowych hamowania

	Miasto	Autostrada	120 – 80 km/h	Hamowanie awaryjne ze 100 km/h
Wartość maksymalna [m/s ²]	-6,1	-6,2	-5,7	-9,7
Wartość średnia [m/s ²]	-0,9	-2,1	-3,2	-6,8
Mediana [m/s ²]	-0,9	-1,7	-3,6	-8,0
Wartość najczęściej występująca [m/s ²]	-0,7	-1,2	-3,8	-8,2

Charakterystycznym jest, że dla opóźnień hamowania w jeździe miejskiej obserwowane wartości mieszczą się w przedziale do 2,5 m/s². Najczęściej występującą wartością jest wartość 0,7 m/s². W jeździe autostradowej obserwowano niewiele większe wartości – najczęściej występującą była wartość 1,2 m/s², a przedział zmienności większości obserwacji zawierał się w granicach do 3,2 m/s². Wyższe wartości zarejestrowano dla prób wymuszonego zwalniania ze 120 do 80 km/h - najczęściej około 3,8 m/s² i co oczywiste w hamowaniach awaryjnych gdzie najczęściej udawało się zaobserwować wartości 8,2 m/s², co jest wartością niemal 12-krotnie wyższą niż dla przeciętnych hamowań miejskich.



Rys. 8: Histogramy rozkładów wartości opóźnień hamowania dla różnych warunków badań: a) jazda w warunkach miejskich, b) jazda autostradowa, c) hamowania na autostradzie z 120 do 80 km/h, d) hamowania awaryjne ze 100 km/h

6. Analiza zakresów prędkości i czasów hamowania

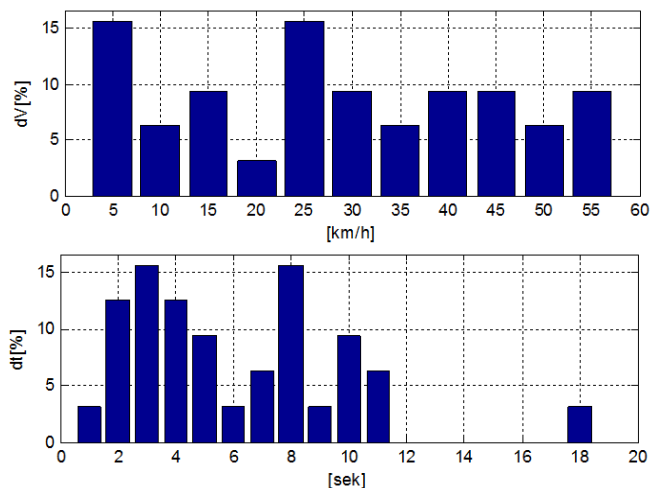
Poza wartością opóźnienia hamowania istotne są także zakresy prędkości, w jakich odbywa się hamowanie. Analizę statystyczną występujących zakresów zmian prędkości podczas hamowania (ΔV) oraz czasów hamowania (Δt) przedstawiono w tabeli 3. Przy czym istotne znaczenie ma ona dla hamowań w jeździe miejskiej i autostradowej. Pozostałe dwa testy w swoich warunkach definiują zarówno ΔV jak i prędkość początkową hamowania, ale wartość informacyjną i porównawczą mają pozostałe parametry.

Na rysunku 9 przedstawiono histogramy wartości zakresów zmian prędkości podczas hamowania (ΔV), oraz czasów hamowania (Δt) w jeździe miejskiej. W przypadku pozostałych badań zakresy te są skoncentrowane mocno wokół wartości średnich przedstawionych w tab. 3.

Tab. 3. Zestawienie wartości zmian prędkości dla prób drogowych hamowania

	Miasto	Autostrada	120 – 80 km/h	Hamowanie awaryjne ze 100 km/h
Początkowa średnia prędkość hamowania [km/h]	35,3	117,7	120	101,8
Średni zakres zmian prędkości (ΔV) [km/h]	28,9	17,8	31,4	101,8
Średni czas (Δt) trwania pojedynczego hamowania [s]	6,1	4,4	4,6	3,9
Zmiana prędkości w ciągu 1 s [km/h]	4,7	4,1	6,8	26,1

Średnia wartość czasu hamowania dla całej próby w jeździe miejskiej wynosiła 6,1 s przy średnim spadku prędkości na poziomie 28,9 km/h, najkrótszy czas uzyskano dla próby hamowania awaryjnego, który wyniósł 3,9 sekundy przy jednocześnie największym spadku prędkości - 101,8 km/h. Uzyskane wartości powiązane są bezpośrednio z prezentowanymi wcześniej opóźnieniami występującymi w poszczególnych próbach.



Rys. 9: Histogramy rozkładów wartości zakresów zmian prędkości podczas hamowania (ΔV) oraz czasów hamowania (Δt) w jeździe miejskiej

7. Analiza wartości temperatury powierzchni tarczy

Podczas procesu hamowania jak i chłodzenia tarczy po hamowaniu rejestrowano temperaturę powierzchni wewnętrznej strony tarczy hamulcowej przedniego lewego koła. Na rys. 10 przedstawiono przebiegi czasowe zmian wartości temperatury i rozkład tych wartości podczas badań w ruchu miejskim oraz przebiegi w czasie przyrostów temperatury od temperatury początkowej hamowania, o którą skorygowano wartość temperatury uzyskując wykres przyrostów temperatury w funkcji czasu. Wykreślono także histogram dla przyrostów temperatury uzyskując graficzną ilustrację eksperymentalnego rozkładu wartości tych przyrostów.

W tabeli 4 przedstawiono analizę parametrów statystycznych rozkładów obserwowanych wartości temperatury a w tabeli 5 parametrów statystycznych rozkładów obserwowanych wartości przyrostów temperatury dla wszystkich czterech typów badań.

Tab. 4. Parametry statystyczne dla obserwowanych wartości temperatury rzeczywistej

	Miasto	Autostrada	120 – 80 km/h	Hamowanie awaryjne ze 100 km/h
Wartość maksymalna [°C]	155	302	384	388
Wartość średnia [°C]	118	137	255	290
Mediana [°C]	121	118	270	295
Wartość najczęściej występująca [°C]	120	100	380	390

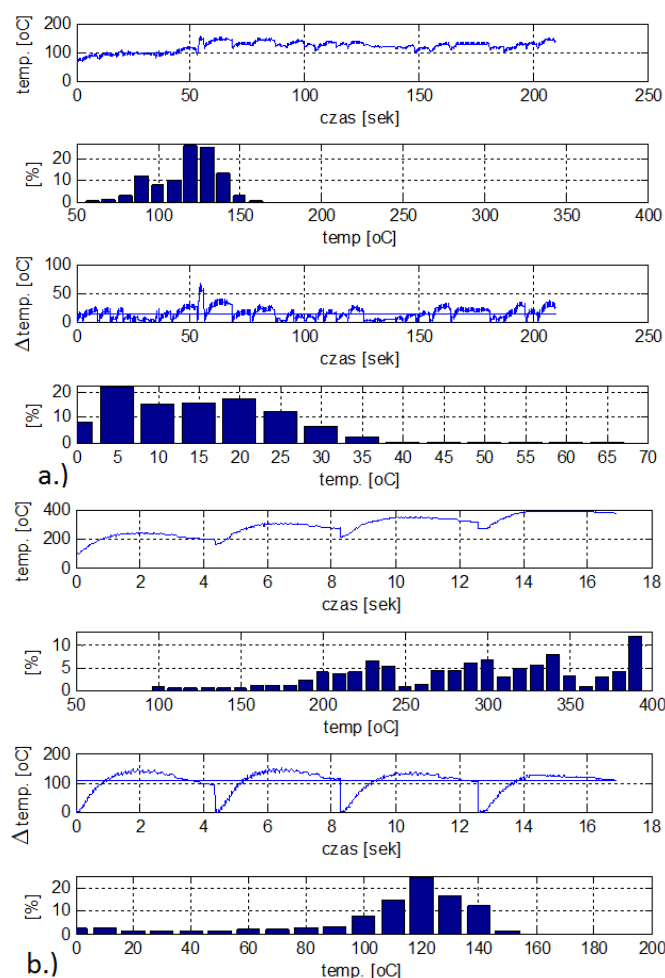
Tab. 5. Parametry statystyczne dla obserwowanych wartości przyrostów temperatury

	Miasto	Autostrada	120 – 80 km/h	Hamowanie awaryjne ze 100 km/h
Wartość maksymalna [°C]	66	190	153	150
Wartość średnia [°C]	15	52	82	106
Mediana [°C]	14	35	90	119

Uzyskane wyniki wskazują, że w jeździe miejskiej średni przyrost temperatury podczas pojedynczego hamowania wynosi około 15°C, jednocześnie rozkład wartości tych przyrostów jest dosyć

równomierny w przedziale 0...30°C. Maksymalne przyrosty temperatury sięgały 66°C. Podczas realizowanych testów ze względu na wstępne rozgrzanie hamulców ich temperatura utrzymywała się wokół wartości średniej 118°C. Nie jest to jednak wynik w pełni miarodajny – wymaga obserwacji dłuższych okresów eksploatacji i większej ilości obiektów. Obserwacje czynione na kilku samochodach wskazywały, że temperatura ta często sięga zaledwie kilku dziesięciu stopni Celsjusza – jest to mocno zależne od typu ruchu i stylu jazdy kierowcy.

W hamowaniach awaryjnych ze 100 km/h przyrosty temperatury są bardziej powtarzalne – ich wartości skoncentrowane są wokół wartości przeciętnej (mediany) wynoszącej 119°C, wartość maksymalna to 150°C. Niewiele mniejsze przyrosty obserwowano dla hamowań intensywnych autostradowych – wartości przeciętne rzędu 90°C. Różnica - rzędu 20% jest proporcjonalna do różnic w spadkach energii kinetycznej jaka dokonywała się podczas tych dwóch różnych hamowań.



Rys. 10: Przebiegi czasowe zmian temperatury i jej przyrostów oraz rozkłady temperatury i jej przyrostów w: a) jeździe w warunkach miejskich, b) hamowaniu awaryjnym ze 100 km/h

Ciągły pomiar temperatury tarcz podczas hamowania umożliwił także analizę procesów przejściowych związanych zarówno z nagrzewaniem się jak i chłodzeniem tarczy hamulcowej. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe zarejestrowane podczas przejazdów badawczych. Charakteryzowały się one różnymi przerwami pomiędzy kolejnymi hamowaniami i różnymi prędkościami jazdy pomiędzy hamowaniami.

Dla trzech z prowadzonych testów wyznaczono wartości średnie czasów nagrzewania i chłodzenia oraz towarzyszących im zmian

temperatur. Tak uzyskane wynik zestawiono w tabeli 6. Jak można zauważyć najkrótszy średni czas nagrzewania (1,8 s) występuje podczas hamowania awaryjnego, co jest związane z dużą intensywnością całego procesu. Również występuje tu największy przyrost temperatury na poziomie 131,6 °C oraz największa prędkość nagrzewania 71,4 °C/s.

W przypadku testu jazdy miejskiej uzyskiwane wartości są zdecydowanie mniejsze ze względu na znacznie mniejszą intensywność hamowania oraz znacznie mniejszy zakres zmian prędkości. Czas nagrzewania jest 2,7 razy dłuższy, przyrost temperatury jest prawie 7 krotnie mniejszy i wynosi 19,2 °C a prędkość nagrzewania jest mniejsza prawie 17 krotnie i wynosi 3,9 °C/s.

Tab. 6. Zestawienie średnich wartości czasów nagrzewania i chłodzenia oraz przyrostów temperatur podczas poszczególnych testów

	Miasto	120 – 80 km/h	Hamowanie awaryjne ze 100 km/h
t1 - czas nagrzewania [s]	4,9	4,5	1,8
T1 - przyrost temperatury [°C]	19,2	110,1	131,6
t2 - czas chłodzenia [s]	105,3	26,6	32,3
T2 - spadek temperatury [°C]	20,6	64,4	80,3
VT1 – prędkość nagrzewania [°C/s]	3,9	24,7	71,4
VT2 - prędkość chłodzenia [°C/s]	0,2	2,4	2,5
Prędkość początkowa hamowania	35,3	120	101,8
Prędkość jazdy na początku chłodzenia	0	80	0

Procesy chłodzenia uwidocznione na rys 11 i oznaczony symbolem t2 można scharakteryzować średnim czasem chłodzenia, który podczas jazdy miejskiej wynosi 105,3 s. Charakteryzuje się on bardzo małą prędkością chłodzenia 0,2 °C/s ze względu na niewielką prędkością ruchu pojazdu oscylującą w granicach 0 – 35,3 km/h i brakiem wymuszonego opływu powietrza. Przy większych prędkościach ruchu pojazdu występujących przy zwalnianiu 120-80 km/h oraz hamowaniu awaryjnym dzięki szybkiej wymianie powietrza otaczającego tarczę hamulcową jej prędkość chłodzenia jest znacznie większa i wynosi 2,4-2,5 °C/s. W przypadku hamowania awaryjnego samochód po zatrzymaniu natychmiast był rozpędzany do prędkości 100km/h. Są to jednak wartości wielokrotnie mniejsze od

prędkości nagrzewania.

8. Analiza wartości nacisków powierzchniowych

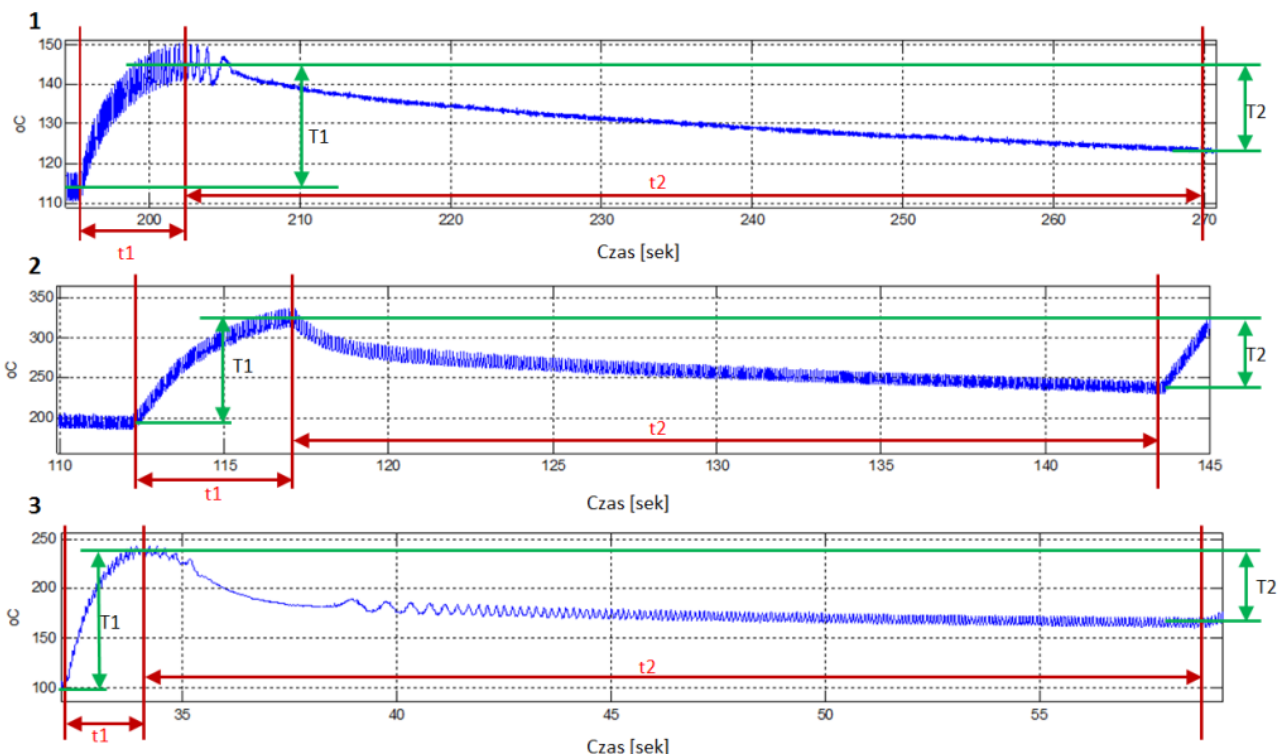
Naciski powierzchniowe są liniowo związane z wartościami ciśnienia hamowania - mają więc takie same charaktery rozkładów wartości.

Analiza statystyczna wartości nacisków powierzchniowych wykazała, że najwyższe wartości nacisków powierzchniowych zarejestrowano w badaniach „hamowanie awaryjne” - była to wartość 5,1 MPa. Dla zarejestrowanych danych opracowano również histogramy przedstawiające liczebności obserwacji wystąpienia wartości nacisku jednostkowego w przedziałach co 0,1 MPa (rys. 12) dla każdego z badań osobno. Dla wszystkich testów analizowano rozkład wartości nacisków do 5 MPa, ponieważ wyższych wartości nie obserwowano w tych testach. Podczas hamowań wymuszonych z prędkości 120 do 80 km/h najczęściej występującą wartością nacisku była wartość 1,5 MPa, a maksymalną 2,4 MPa. W przypadku jazdy miejskiej najczęściej występującą wartością nacisku była wartość 0,4 MPa natomiast zaobserwowana wartość maksymalna to 2,9 MPa.

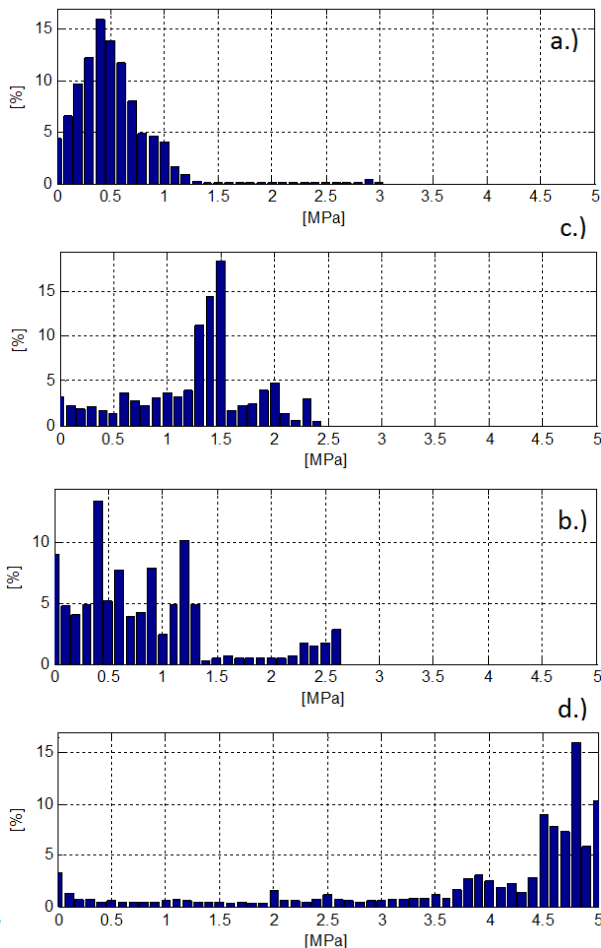
Dla uzyskanych zbiorów danych dla każdego z badań określono parametry statystyczne dla opisanego rozkładów eksperymentalnych – przedstawiono je w tabeli 7.

Tab. 7. Zestawienie parametrów statystycznych obserwacji wartości nacisków jednostkowych dla poszczególnych testów

	Miasto	Autostrada	120 – 80 km/h	Hamowanie awaryjne ze 100 km/h
Wartość maksymalna [MPa]	2,9	2,6	2,4	5,1
Wartość średnia [MPa]	0,5	0,8	1,3	3,8
Mediana [MPa]	0,5	0,7	1,4	4,5
Wartość najczęściej występująca [MPa]	0,4	0,4	1,5	4,8



Rys. 11: Przebiegi czasowe zmian temperatury podczas hamowania i chłodzenia hamulców w czasie dalszej jazdy: 1-jazda miejska, 2-hamowanie na autostradzie z 120 km/h do 80 km/h, 3-hamowanie awaryjne



Rys. 12: Histogramy rozkładów wartości nacisków powierzchniowych dla różnych warunków badań: a) jazda w warunkach miejskich, b) jazda autostradowa, c) hamowania na autostradzie ze 120 do 80 km/h, d) hamowania awaryjne ze 100 km/h

9. Analiza wartości prędkości poślizgu klocka względem tarczy

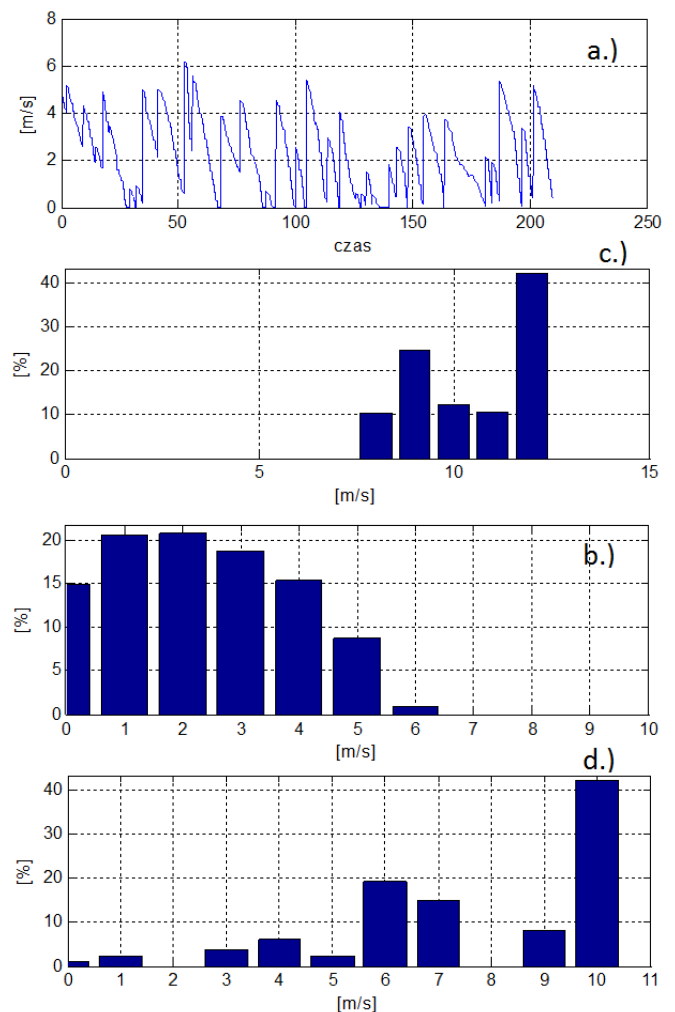
Znajomość wartości prędkości poślizgu pomiędzy klockiem hamulcowym a tarczą hamulcową jest istotna z punktu widzenia m.in. szacowania trwałości i zużycia elementów ciernych. Ma więc znaczenie przy konstruowaniu sprzężenia ciernego, w szczególności doboru materiałów zastosowanych na elementy współpracujące. Obserwowane wartości prędkości poślizgu występującego pomiędzy klockiem hamulcowym a tarczą oraz statystyczny ich rozkład zaprezentowano na rys 13. Wartości poślizgu są bezpośrednio i liniowo związane z prędkością samochodu i rozmiarami koła ogumionego oraz tarczy hamulcowej. Ich rozkłady związane są więc z rozkładem zmienności zakresów prędkości hamowania.

Tab. 8. Zestawienie parametrów statystycznych obserwacji wartości prędkości poślizgów dla poszczególnych testów.

	Miasto	120 – 80 km/h	Hamowanie awaryjne ze 100 km/h
Wartość maksymalna [m/s]	6,2	12,5	10,2
Wartość średnia [m/s]	2,3	10,7	8,0
Mediana [m/s]	2,2	11,1	9,7
Wartość najczęściej występująca [m/s]	1 i 2	12	10

Podczas hamowania z dużych prędkości, jakie pojawiają się podczas jazdy autostradowej wartości prędkości poślizgu będą również duże, co potwierdzają wartość maksymalna 12,5 m/s jak również wartość najczęściej występująca 12 m/s dla próby hamowania 120-80 km/h. W przypadku hamowania awaryjnego dominu-

jącą wartością poślizgu jest 10 m/s, co wynika również z wysokiej prędkości początkowej hamowania ustalonej na 100 km/h (tab.8).



Rys. 13: Charakterystyka zmian oraz histogramy rozkładów wartości prędkości poślizgu dla różnych warunków badań: a) zmiany wartości prędkości poślizgu w funkcji czasu, b) jazda w warunkach miejskich, c) hamowania na autostradzie z 120 do 80 km/h, d) hamowania awaryjne ze 100 km/h

Podsumowanie

Przedstawiona w artykule metodyka badań układu hamulcowego oraz zaprezentowany system pomiarowy oparty na czujnikach prędkości, ciśnienia i temperatury pozwolił na wykonanie badań drogowych układu hamulcowego w realnych warunkach eksploatacji. Przeprowadzone badania, uzyskane wyniki i ich analiza pozwoliły na sformułowanie kilku wniosków dotyczących eksploatacyjnych warunków pracy hamulców samochodu osobowego.

Analiza otrzymanych wartości zmian ciśnienia w układzie hamulcowym pozwala na stwierdzenie, że podczas testów hamowania maksymalne wartości ciśnienia w przewodzie hamulcowym zmieniały się od 1,1 MPa podczas jazdy miejskiej do 8,1 MPa podczas hamowań awaryjnych osiągając maksymalną wartość 10,8 MPa. W przypadku badanego samochodu były to wartości zbliżone co do wartości liczbowej do wartości uzyskiwanych opóźnień hamowania. Daje to obraz zakresu zmian ciśnienia jakim poddawany jest układ w trakcie eksploatacji.

Średnia intensywność spadku prędkości pojazdu mierzona w km/h/s wynosi w jeździe miejskiej i autostradowej około 4...5 km/h/s. To oznacza około 10 sekundowe okresy hamowania z prędkości około 50 km/h w typowym ruchu miejskim podczas

których samochód przejeżdża około 70..80 m. W hamowaniach awaryjnych intensywność hamowania jest około 5,5 razy większa, czasy hamowania o tyle samo krótsze a przejeżdżany podczas hamowania dystans skraca się prawie 8 krotnie do niecałych 10 metrów.

Analiza intensywności hamowania wykazała, że najczęściej występujące wartości opóźnienia w teście jazdy miejskiej to 0,7 m/s², a w teście jazdy autostradowej 1,2 m/s², maksymalne uzyskane podczas testu hamowania awaryjnego to 9,7 m/s².

Największe średnie przyrosty temperatury podczas hamowania występują podczas hamowania awaryjnego (131,6 °C) a najmniejsze podczas jazdy miejskiej (19,2 °C). Prędkość nagrzewania się tarczy jest również największa dla hamowań awaryjnych i wynosi ok. 71,4 °C/s natomiast jest znacznie mniejsza w ruchu miejskim i wynosi 3,9 °C/s.

Prędkość chłodzenia tarczy po zakończeniu procesu hamowania podczas jazdy z dużą prędkością osiąga wartości ok. 2,4 i 2,5 °C/s uzyskane w próbach hamowania awaryjnego i wymuszonego na autostradzie.

Warunki pracy pary klocek-tarcza hamulcowa wyrażały się wartościami nacisków jednostkowych oraz prędkością poślizgu - maksymalne występujące w teście jazdy miejskiej wartości nacisków jednostkowych wynosiły 2,9 MPa a średnie 0,5 MPa, natomiast największe to 5,1 MPa występujące podczas hamowania awaryjnego. Prędkość poślizgu pomiędzy klockiem a tarczą hamulcową uzyskana podczas testów hamowania ze 120 do 80 km/h była najwyższa i wartość ta wynosiła 12,5 m/s, podczas jazdy miejskiej ok. 5..6 m/s i 10 m/s przy hamowaniach awaryjnych.

Pozyskane dane mogą być pomocne przy szacowaniu parametrów modeli oraz weryfikacji modeli dla symulacji zjawisk zachodzących w sprzężeniu ciernym klocek-tarcza hamulcowa podczas hamowania jak również stanowić źródło danych niezbędnych do prowadzenia badań stanowiskowych nowych rozwiązań układu hamulcowego.

Bibliografia:

1. Etzold H.: Sam naprawiam samochód Opel Astra III i Zafira II, WKiŁ, Warszawa 2009r.
2. Kilar H.: Homologacje pojazdów samochodowych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2005.
3. Dziennik Ustaw z 15.12.2016r. poz. 2022 Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.
4. Ohde B., Ślaski G., Maciejewski M.: Statistical analysis of real-world urban driving cycles for modeling energy consumption of electric vehicles, Journal of Mechanical and Transport Engineer-

ing, Vol. 68 No. 2 2016, DOI 10.21008/j.2449-920X.2016.68.2.03

5. Zalewski A., Cegiela R.: Matlab – obliczenia numeryczne i ich zastosowanie, Nakom, Poznań 1997.
6. Regulamin nr 90 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – Jednolite przepisy dotyczące homologacji zamiennych zespołów okładzin hamulcowych, zamiennych okładzin hamulców bębnowych, zamiennych tarcz i zamiennych bębnow przeznaczonych do pojazdów o napędzie silnikowym i ich przyczep, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej 13.7.2012
7. Krupa M.: Wpływ temperatury na wartość współczynnika tarcia samochodowych hamulców ciernych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport z.64, Gliwice 2008r.

Parameters of the car's brakes work in real operation condition

The article presents the results of measurements and statistical analysis of the variables characterizing the braking process and the work of the car's braking system in diversified operating conditions. The introductory part presents a measuring system that allows measurements of brake system operation parameters during operation. Discussed are the methodology for measuring and determining such values as the temperature of the discs, unit pressures and the slip speed at the contact of the disc and brake pad, braking pressure, vehicle speed and its longitudinal acceleration. Operational working conditions included urban driving, extra-urban and motorway driving. Based on the measurements made, histograms of measured values were developed. On the basis of the obtained results, typical temperature gains during a single braking in individual conditions were determined and the course of temperature changes during cooling of the brake discs was analyzed. The ranges of typical values of the tested parameters for individual operating conditions were generalized and compared with the values characteristic for emergency braking, which can be considered as maximum values.

Keywords: brakes, braking process, statistical analysis

Autorzy:

dr inż. **Jerzy Kupiec** – Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu, Jerzy.Kupiec@put.poznan.pl, tel. 616652 2709
 dr inż. **Hubert Pikosz** – Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu, Hubert.Pikosz@put.poznan.pl, tel. 616652 2709
 dr hab. inż. **Grzegorz Ślaski** – Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu, Grzegorz.Slaski@put.poznan.pl, tel. 616652 2222