

**dr inż. Krzysztof Parczewski**  
**dr inż. Henryk Wnęk**

Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów  
Akademia Techniczno-Humanistyczna  
Ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała, Polska  
e-mail: [kparczewski@ath.bielsko.pl](mailto:kparczewski@ath.bielsko.pl), [hwnek@ath.bielsko.pl](mailto:hwnek@ath.bielsko.pl)

## **Wykorzystanie przyczepności podczas hamowania pojazdu**

**Słowa kluczowe:** przyczepność, badania pojazdu, hamowanie pojazdu, tor krzywoliniowy, poślizg kół, ABS

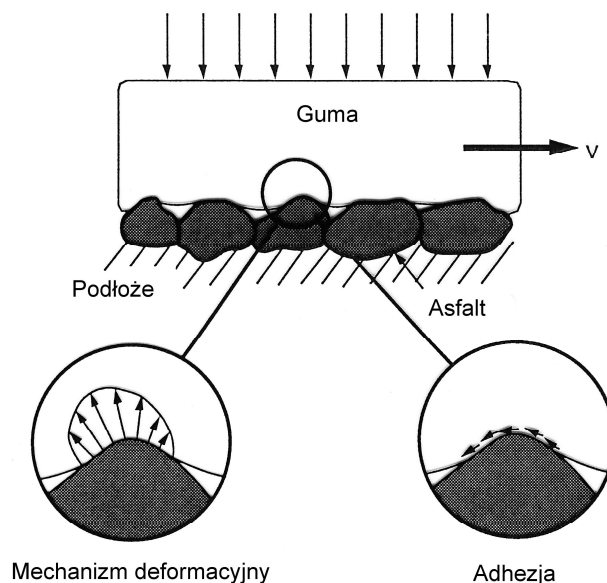
**Streszczenie.** W publikacji przedstawiono zagadnienie wykorzystania przyczepności opony do nawierzchni jezdni podczas hamowania. Wyniki prezentowane w publikacji oparto na badaniach drogowych pojazdu osobowego wyposażonego w układ zapobiegający blokowaniu kół. Przeprowadzono dwa rodzaje prób stosowanych do badania wykorzystania przyczepności - badania pojazdu wykonującego manewr hamowania na prostoliniowym odcinku drogi oraz na łuku drogi. Na podstawie badań określono siły hamowania oraz współczynniki przyczepności dla poszczególnych kół pojazdu, w tym wartości graniczne współczynnika przyczepności.

### **1. Wstęp**

Podczas ruchu pojazdu za przekazywanie sił z pojazdu na podłoże odpowiedzialne są opony oraz stan nawierzchni drogi. Wartości sił przenoszonych na nawierzchnię drogi zależą od parametrów pojazdu i jego ruchu. Są one ograniczone przyczepnością na styku opona - jezdnia. Zjawisko przyczepności zachodzi na styku koła z jezdnią i obejmuje wszystkie warunki oraz mechanizmy występujące podczas tej współpracy. Współczesne pojazdy są wyposażone w układy zapobiegające blokowaniu kół podczas hamowania, co ogranicza zakres zmian pracy układu hamulcowego do obszaru ograniczonych poślizgów. W pracy przedstawiono zagadnienia współpracy koła z jezdnią podczas hamowania pojazdów na drodze prostoliniowej i na łuku drogi, wyznaczone graniczne wartości współczynników przyczepności oraz przebiegi tych współczynników uzyskane z pomiarów.

### **2. Wykorzystanie przyczepności**

Podczas ruchu pojazdu mechanizm powstawania sił na styku opony z jezdnią wynika ze stycznych i normalnych naprężeń w obszarze tego styku. Naciski na jezdnię są różne w każdym miejscu styku z oponą i zmieniają się zarówno w kierunku wzdłużnym, jak i poprzecznym. Podczas toczenia dochodzi jeszcze problem niesymetryczności śladu współpracy. Każdy element opony, znajdujący się w obszarze kontaktu, jest odpowiedzialny za przenoszenie sił wzdłużnych i poprzecznych przez oponę. Są dwa główne mechanizmy [1, 2, 3, 4, 5, 6, 10] odpowiedzialne za powstawanie sił tarcia między oponą a jezdnią: tarcie odkształceniowe i adhezja. Na powierzchni przylegania (adhezja) powstaje siła w wyniku wiązania międzycząsteczkowego między gumą bieżnika i powierzchnią drobiny asfaltu. Oddziaływanie to zmniejsza się wraz z obecnością zanieczyszczeń lub wody w miejscu styku. Mechanizm tarcia odkształceniowego powstaje w wyniku straty energii podczas odkształcenia gumy na drobiny asfaltu. Tarcie powstające w następstwie tego mechanizmu nie jest „tak czułe” na zanieczyszczenia i obecność wody.



Rys. 1. Mechanizmy odpowiedzialne za powstawanie sił tarcia między oponą a nawierzchnią jezdni

Ruch samochodu może przebiegać zgodnie z osią wzdłużną pojazdu oraz w kierunku prostopadłym do tej osi. Przyczepność między oponą a jezdnią może być opisana za pomocą współczynnika przyczepności (stosunku sił przyczepności do siły nacisku koła na nawierzchnię drogi) [2]. Współczynnik przyczepności rozumiany jest, jako stosunek maksymalnej stycznej siły wypadkowej przenoszonej przez koło do siły nacisku działającej na to koło. W trakcie przeprowadzonych analiz wyznaczono chwilowe współczynniki przyczepności wykorzystując zależność:

$$\mu = \frac{W}{F_z}$$

Przyczepność obejmuje łącznie siłę przenoszoną na powierzchnię drogi w kierunkach obwodowym  $X_K$  i bocznym  $Y_K$ . Siła wypadkowa  $W$  jest ograniczona przyczepnością koła do nawierzchni  $F_{\mu}$ .

$$W = \sqrt{X_K^2 + Y_K^2} \text{ oraz } W \leq F_{\mu}$$

Rozpatrując poszczególne koła oddzielnie, można wyznaczyć graniczne wartości sił przyczepności, które mogą być przez nie przenoszone. Podczas ruchu pojazdu na prostym, poziomym odcinku drogi powyższa zależność uprości się ze względu na możliwość pominięcia siły poprzecznej. W takim przypadku cała siła przyczepności może być wykorzystana na hamowanie.

W przypadku ruchu pojazdu na łuku drogi, wpływ siły bocznej jest tym większy im mniejszy jest jego promień. W przypadku, gdy na koło działa jednocześnie siła wzdłużna i poprzeczna z pewnym uproszczeniem można zapisać zależność określającą współczynnik przyczepności [9].

$$\mu = \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}$$

gdzie:  $\mu_x$  – współczynnik przyczepności wzdłużnej,

$\mu_y$  – współczynnik przyczepności poprzecznej.

Podczas hamowania na łuku drogi na pojazd działa siła dośrodkowa zależna od prędkości jazdy  $F_R = m \cdot \frac{v^2}{R}$ , która ogranicza, możliwą do wykorzystania, siłę przyczepności w kierunku wzdłużnym. Z tego względu tylko część siły przyczepności może być

wykorzystana na hamowanie pojazdu. Analizując ruch pojazdu poruszającego się po torze kołowym można wyznaczyć, jaką część współczynnika przyczepności można wykorzystać na hamowanie.

$$\mu_h = \sqrt{\mu_m^2 - \left(\frac{v^2}{g \cdot R}\right)}$$

gdzie:  $\mu_h$  – część współczynnika przyczepności wykorzystywana na hamowanie pojazdu,  
 $\mu_m$  – współczynnik przyczepności przyłgowej (maksymalna wartość względnej siły przyczepności, jaka może być uzyskana w danych warunkach),  
 $v$  – prędkość jazdy,  
 $R$  – promień skrętu,  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie.

Podczas manewrów rozpędzania czy jazdy ze stałą prędkością (po drodze płaskiej) stosunkowo rzadko wykorzystywana jest cała przyczepność kół. W przypadkach manewrów hamowania na drodze prostoliniowej lub na łuku drogi znacznie częściej dochodzi do pełnego wykorzystania przyczepności, szczególnie podczas wykonywania manewrów na drodze mokrej, pokrytej śniegiem lub oblodzonej.

Zastosowanie mechanizmów zapobiegających blokowaniu kół podczas hamowania (ABS) ogranicza poślizgi kół. Będzie to powodowało ograniczenie sił hamujących działających na poszczególne koła pojazdu.

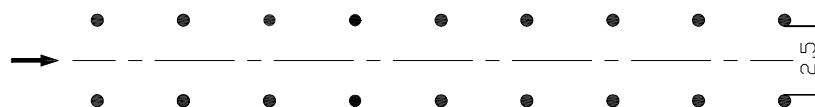
Poniżej przedstawiono badania wykorzystania przyczepności pojazdu podczas hamowania.

### 3. Badania przyczepności pojazdu

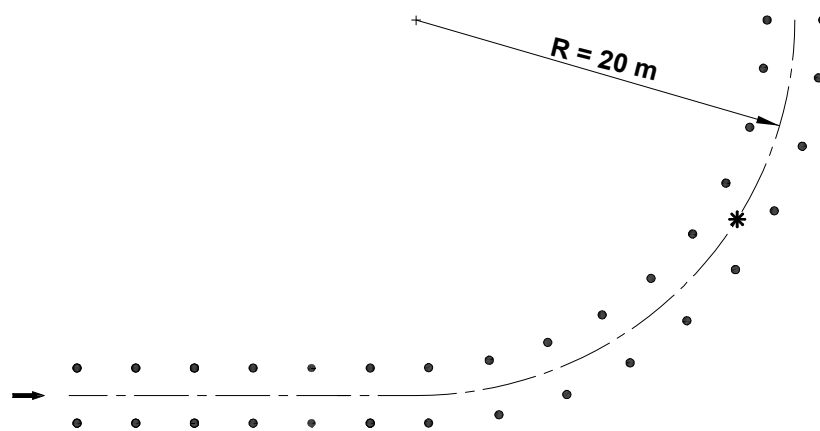
#### 3.1. Założenia do badań

Przeprowadzono dwa rodzaje prób stosowanych do badania wykorzystania przyczepności - badania pojazdu wykonującego manewr hamowania na prostoliniowym odcinku drogi oraz na łuku drogi.

a)



b)



\* - początek manewru hamowania

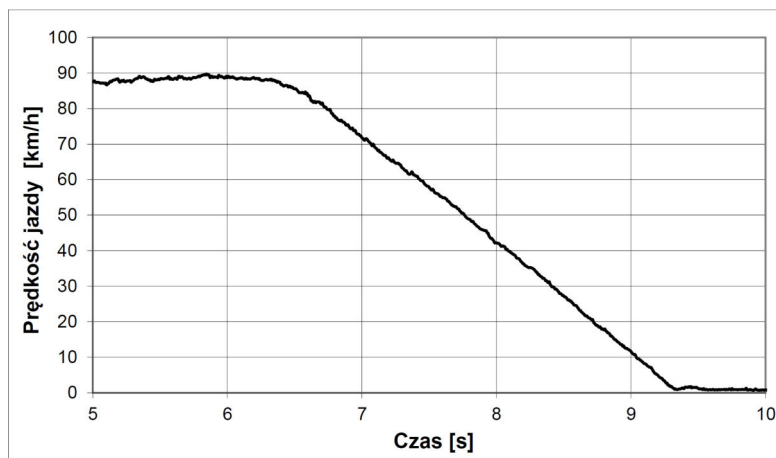
Rys. 2. Tory poszczególnych prób: a) hamowanie na prostoliniowym odcinku drogi, b) hamowanie na łuku drogi

Ze względów bezpieczeństwa badania wykonywano na suchej i czystej nawierzchni asfaltowej. Do badań wykorzystano czujniki ciśnienia zamontowane w układzie hamulcowym, głowicę do pomiaru prędkości wzdłużnej i poprzecznej, czujnik siły na pedale hamulca, czujniki pozwalające na pomiar przyspieszeń pojazdu w kierunkach X oraz Y, czujniki do pomiaru prędkości kątowych ruchu nadwozia samochodu oraz czujniki do pomiaru kąta obrotu i momentu na kole kierownicy [7, 8]. Masa pojazdu wynikała z jego masy własnej, masy aparatury pomiarowej i masy kierowcy.

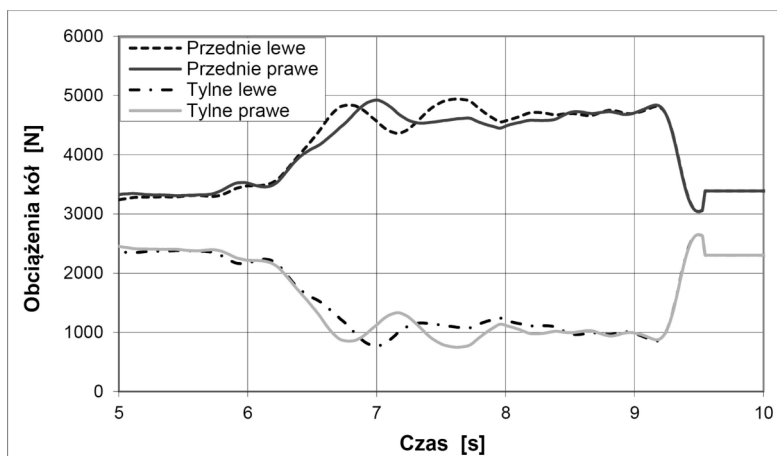
W trakcie hamowania następuje zmiana sił nacisku poszczególnych kół na jezdnię. Powoduje to zmianę granicznych sił przyczepności i w efekcie zastosowania układu ABS, ograniczenie sił hamujących generowanych przez hamulce poszczególnych kół. Obciążenia poszczególnych kół pojazdu wyznaczano na podstawie pomiarów położenia środka masy, oraz sił wzdłużnych i poprzecznych wynikających z warunków ruchu. Przy wyznaczaniu sił nacisku na poszczególne koła nie uwzględniono zmiany położenia środka masy wynikającej z pochylenia pojazdu. Na podstawie zmierzonych ciśnień w układzie hamulcowym oraz parametrów geometrycznych hamulców wyznaczono siły hamujące dla poszczególnych kół. Uwzględniono wpływ bezwładności kół na siły hamujące wywołane zmianą ich prędkości obrotowych.

### 3.2. Próba hamowania na prostoliniowym odcinku drogi

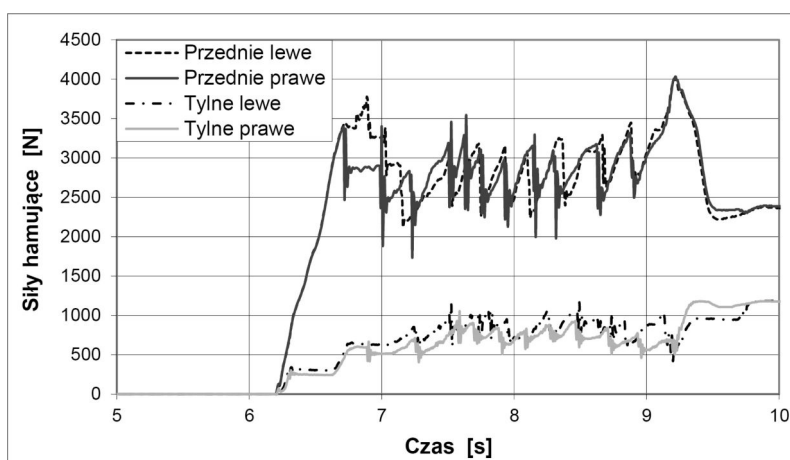
Pierwsza próba była przeprowadzana na prostoliniowym odcinku drogi. Kierowca utrzymywał prostoliniowy kierunek jazdy. Po uzyskaniu odpowiedniej prędkości naciskał na pedał hamulca. Siła nacisku na pedał zapewniała działanie układu zapobiegającego blokowaniu kół.



Rys. 3. Przebieg prędkości jazdy pojazdu podczas próby hamowania na prostoliniowym odcinku drogi



Rys. 4. Przebieg obciążeń kół pojazdu podczas próby hamowania na prostoliniowym odcinku drogi

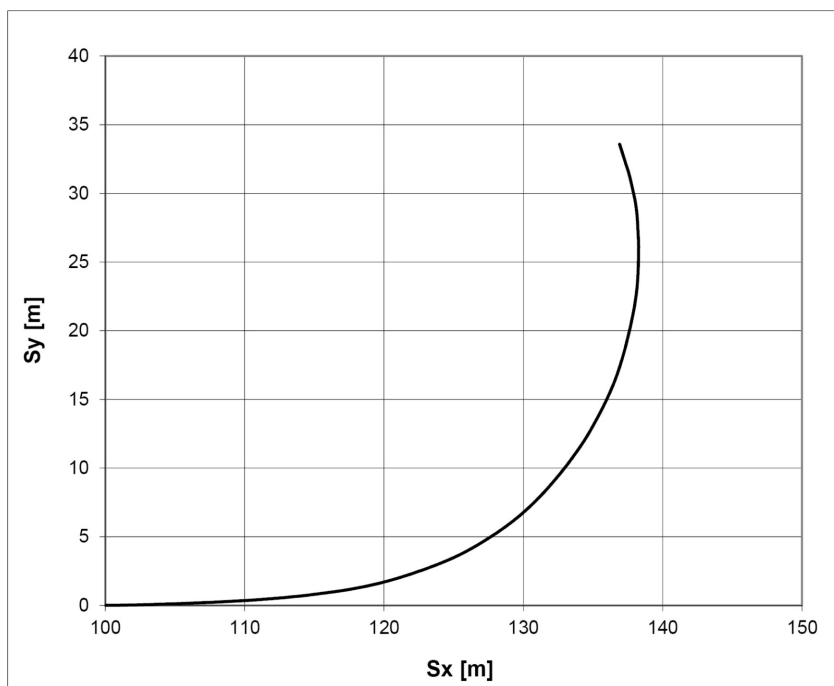


Rys. 5. Przebieg sił hamujących działających na poszczególne koła pojazdu

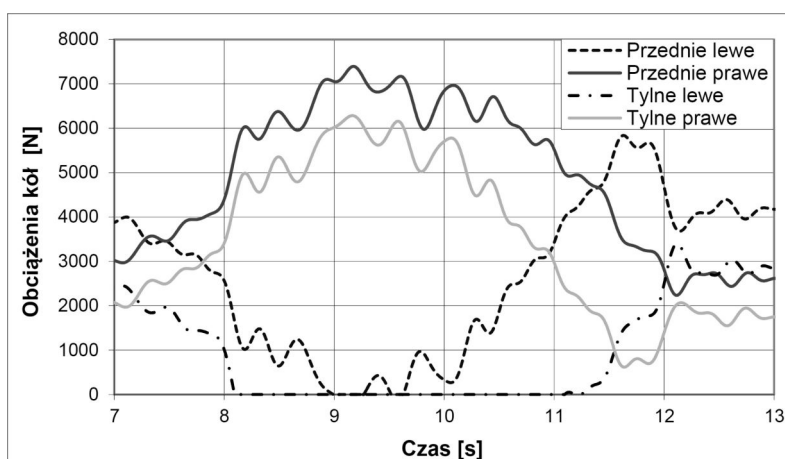
Na wykresach przedstawiono widoczne dociążenie kół przednich podczas hamowania oraz wyraźną różnicę wielkości sił hamujących osi przedniej i tylnej. Pewne przesunięcia działania hamulców kół prawych i lewych wynikają z niejednorodności podłoża oraz pewnej niesymetrii obciążenia pojazdu.

### 3.3. Próba hamowania na łuku drogi

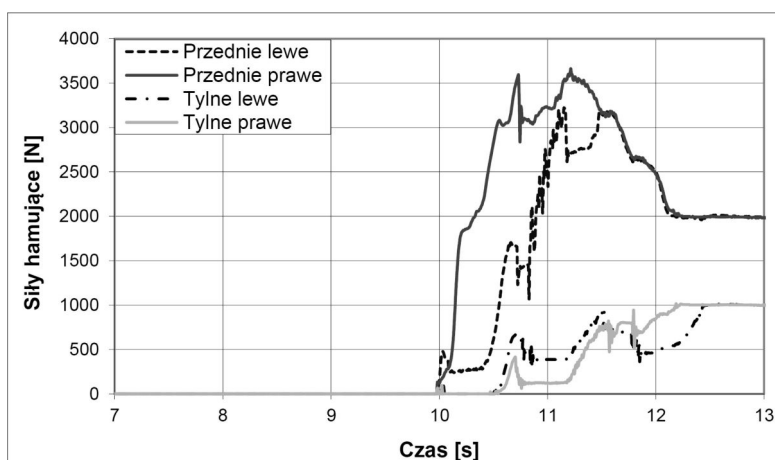
Druga próba była przeprowadzana na łukowym odcinku drogi. Kierowca utrzymywał kierownicę w taki sposób by pojazd poruszał się po torze kołowym. Po pokonaniu drogi około 15 m na torze kołowym, kierowca naciskał na pedał hamulca. Siła nacisku na pedał zapewniała działanie układu ABS. Na rysunku 6 przedstawiono tor ruchu pojazdu uzyskany na podstawie wyników badań. Na następnych wykresach kolejno pokazano przebiegi zmian obciążeń kół pojazdu (rys. 7) oraz sił hamujących działających na poszczególne koła pojazdu (rys. 8).



Rys. 6. Tor ruchu pojazdu podczas próby hamowania na łuku drogi



Rys. 7. Przebieg obciążeń kół pojazdu podczas próby hamowania na łuku drogi

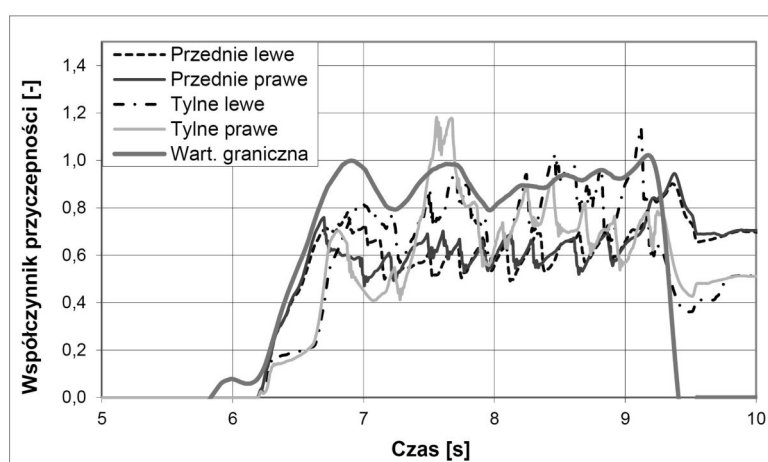


Rys. 8. Przebieg sił hamujących działających na poszczególne koła pojazdu

Na rysunkach przedstawiono widoczne zmiany obciążeń kół prawych i lewych podczas hamowania na torze krzywoliniowym oraz wyraźną różnicę wielkości sił hamujących osi przedniej i tylnej, skorygowane ze względu na rozkład nacisków oraz siłę dośrodkową działającą na pojazd. Można zauważyć, że w początkowej fazie hamowania nacisk koła tylnego lewego jest bliski zeru, co skutkuje ograniczeniem ciśnienia przez układ zapobiegający blokowaniu kół w obwodach hamulców kół tylnych i tym samym spadkiem sił hamowania do niewielkich wartości.

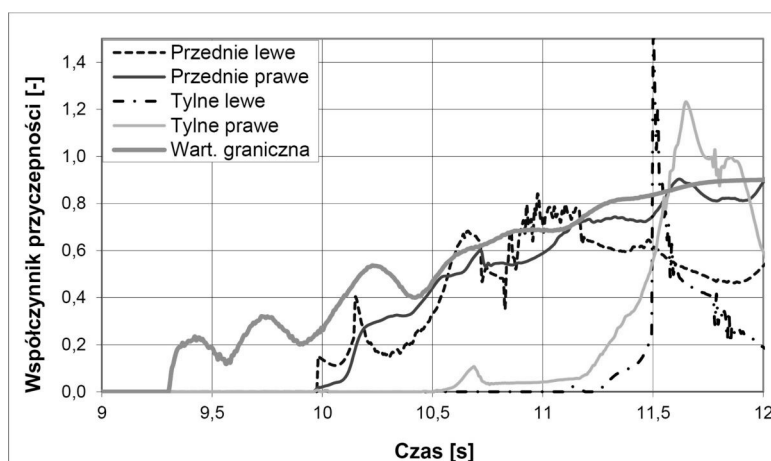
#### 4. Analiza pomiarów pod kątem wykorzystania przyczepności kół

Na podstawie przedstawionych powyżej analiz oraz wyników badań wyznaczono wykorzystanie przyczepności kół pojazdu podczas prób drogowych hamowania na prostoliniowym odcinku oraz podczas hamowania na łuku drogi. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wartości wyznaczonych, wykorzystywanych współczynników przyczepności oraz graniczne wartości tych współczynników wynikające z warunków ruchu.



Rys. 9. Współczynniki przyczepności podczas hamowania na prostoliniowym odcinku drogi

Można zauważyć, że w pierwszym przypadku maksymalna wartość wykorzystanego współczynnika przyczepności dla kół przednich oscyluje wokół wartości 0,75, a dla kół tylnych jest większa i oscyluje wokół wartości 0,8.

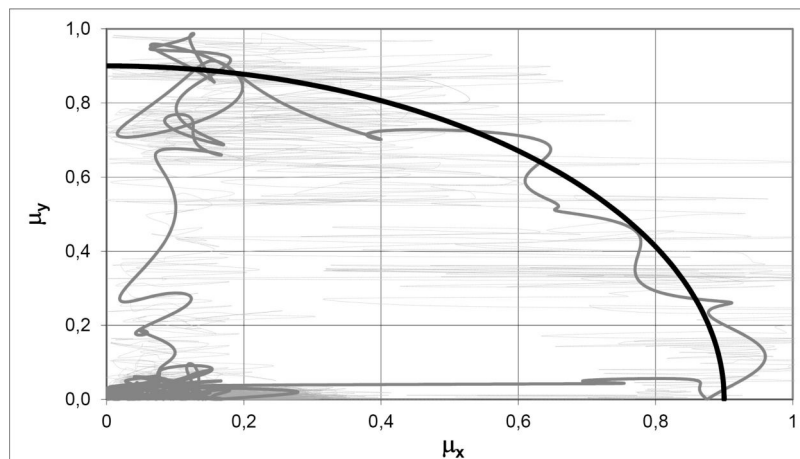


Rys. 10. Współczynniki przyczepności podczas hamowania na łuku drogi

W przypadku hamowania na łuku drogi wielkości wykorzystanego współczynnika przyczepności wzrastają od początku hamowania do wartości maksymalnej wraz ze zmniejszaniem się prędkości jazdy. Dla przedniego prawego koła (dociążanego) wartości

współczynnika przyczepności są większe niż dla lewego. Po zmniejszeniu prędkości jazdy wartości współczynników się stabilizują. Współczynniki przyczepności kół tylnych są wyraźnie mniejsze w początkowym stadium hamowania, po czym wzrastają do wartości maksymalnych. Różnice między wartościami współczynników dla kół przednich, wynikają z niedokładności ich oszacowania spowodowanego pominięciem wpływu pochylenia bocznego samochodu oraz ze znacznej różnicy obciążeń prawej i lewej strony pojazdu.

Badanie hamowania pojazdu na łuku drogi pozwoliło na wyznaczenie granicznego sumarycznego współczynnika przyczepności (rys. 11) wyznaczonego na podstawie elipsy przyczepności.



Rys. 11. Graniczne wartości współczynników przyczepności uzyskane podczas próby hamowania na łuku drogi (linią grubą oznaczono elipsę przyczepności)

## 5. Podsumowanie i wnioski

Badania przyczepności kół do nawierzchni jezdni pokazały, że podczas awaryjnego hamowania na drodze prostoliniowej przyczepność jest wykorzystana w pełni od początkowej chwili hamowania, aż do zatrzymania pojazdu. Dociążenie osi przedniej i odciążenie osi tylnej skutkuje wyraźnym zróżnicowaniem ciśnień w obwodach hamulcowych, co pozwala na wykorzystanie przyczepności kół. Niewielkie różnicę pomiędzy poszczególnymi kołami jednej osi, wynikają z miejscowych warunków przyczepności i są wywołane przez drobne nierówności i zabrudzenia.

W przypadku hamowania na łuku drogi ograniczenie przyczepności wzdłużnej wynika z występowania siły dośrodkowej. Układ ABS, zapobiegający blokowaniu kół podczas hamowania, nie pozwala na osiągnięcie dużych sił wzdłużnych, zapewniając odpowiednie warunki na rozwijanie sił poprzecznych i tym samym zachowanie stateczności ruchu pojazdu. Wraz ze zmniejszaniem się prędkości jazdy korekta wynikająca z ruchu po łuku drogi jest coraz mniejsza. Wyraźne zróżnicowanie nacisków poszczególnych kół, szczególnie stronami - prawą i lewą, wynika z działania siły dośrodkowej. Niesymetria wywołana przez obciążenie pojazdu tylko kierowcą dodatkowo wpływa na wielkości poszczególnych nacisków i rozwijanych sił hamujących. Podobnie jak podczas hamowania na prostym odcinku drogi, występują znaczne różnice ciśnień w obwodach hamulcowych kół przednich i tylnych. Przyczepność kół przednich jest wykorzystana w pełni, natomiast w przypadku kół tylnych, z których tylne lewe koło chwilowo traci kontakt z jezdnią a tylne prawe jest częściowo obciążone, pełne wykorzystanie przyczepności następuje dopiero przy niższych prędkościach jazdy. Po przekroczeniu granicznej prędkości, przy której układ ABS się wyłącza, następuje wyraźny wzrost siły hamującej na kołach tylnych, co powoduje znaczne zwiększenie sił hamujących. Stan ten pokazano na rysunku 11, na którym również graniczne wartości



współczynnika przyczepności wyznaczone z elipsy przyczepności i uzyskane z badań drogowych.

## 6. Literatura

1. Andrzejewski R. Dynamika pneumatycznego koła jezdnego. Warszawa: WNT 2010.
2. Arczyński St. Mechanika ruchu samochodu. Warszawa: WNT 1993.
3. Fundowicz P. Droga hamowania na łuku drogi. Zeszyty Instytutu Pojazdów, 1(77)/2010, Politechnika Warszawska, 2010; s. 103-110.
4. Gillespie T. D. Fundamentals of vehicle dynamics. Warrendale: SAE Inc. 1992.
5. Grzegożek W. Modelowanie dynamiki samochodu przy stabilizującym sterowaniu siłami hamowania. Kraków: Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Seria Mechanika, monografia 275, 2000.
6. Pacejka Hans B. Tire and vehicle dynamics. Warrendale: SAE 2006.
7. Parczewski K., Wnęk H., Wpływ niesprawności zawieszzeń na stateczność ruchu pojazdu - porównanie badań symulacyjnych i pomiarów. Archiwum Motoryzacji, 2006; nr 2, s.159-169.
8. Parczewski K., Wnęk H. Wykorzystanie modelu samochodu do analizy ruchu pojazdu po torze krzywoliniowym. Lublin: Eksploatacja i Niezawodność 2010; nr 4(48), s. 37-46.
9. Prochowski L., Unarski J., Wach W., Wicher J. Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych. Warszawa: WKŁ 2008.
10. Smith R.H. Analyzing friction in the design of rubber products and their paired surfaces. CRC Press 2008.