

Wyznaczanie charakterystyk przyczepności ogumienia podczas krótkotrwałego hamowania koła samochodu ciężarowego

LEON PROCHOWSKI, ANDRZEJ ŻUCHOWSKI

Instytut Pojazdów Mechanicznych, Wojskowa Akademia Techniczna

W pracy przedstawiono wyniki badań ogumienia samochodu ciężarowego podczas hamowania. Badania prowadzono z wykorzystaniem specjalnie przygotowanej jednoosiowej przyczepy dynamometrycznej. Przygotowany układ pomiarowy przyczepy wykorzystano m.in. do obserwacji zmian siły wzdłużnej na kole podczas krótkotrwałego hamowania, prowadzącego do zablokowania koła. Przeprowadzone pomiary pozwoliły na szczegółową analizę zmian siły wzdłużnej, działającej na oś hamowanego koła i wyznaczenie na tej podstawie charakterystyk przyczepności ogumienia oraz ich zależności od obciążenia przypadającego na koło.

Wykaz głównych oznaczeń

- Z_K – obciążenie statyczne koła,
- F_Z – siła pionowa obciążająca koło,
- F_X – siła wzdłużna (hamująca),
- p_{ZH} – ciśnienie w siłowniku hamulca,
- ω_K – prędkość kątowa hamowanego koła,
- r_K – promień dynamiczny koła,
- V_K – prędkość liniowa na obwodzie koła,
- V_B – prędkość liniowa powierzchni bębnow stanowiska,
- V_O – prędkość początkowa hamowania.

1. Wprowadzenie

Częste zmiany wartości momentu tarcia w hamulcach samochodu ciężarowego, które obserwujemy podczas pracy ABS, ESP i innych układów wspomagających kierowcę podczas hamowania a także drgania kół jezdnych, mogą generować zmienne obciążenia dynamiczne w układzie jezdnym [1, 2, 3]. Właściwości dynamiczne ogumienia, jako ważnego elementu układu jezdnego samochodu, mają znaczący wpływ na przebieg procesu hamowania. Obecność drgań powłoki opony w strefie jej styku

z nawierzchnią może niekorzystnie wpływać na przyczepność ogumienia, która zależy od wielu czynników związanych z nawierzchnią, ogumieniem oraz warunków ruchu [4, 5, 6]. Zachodzi zatem potrzeba rozpoznania struktury i przebiegu obciążeń, które działają na ogumienie kół jezdnych podczas hamowania. W Instytucie Pojazdów Mechanicznych WAT zbudowano stanowisko badawcze, które rozszerzyło zakres i możliwości dotychczas prowadzonych badań właściwości nowych konstrukcji ogumienia.

Do obserwacji procesów dynamicznych, występujących podczas hamowania kół samochodu, wykorzystano jednoosiową przyczepę dynamometryczną. W przyczepie tej zastosowano tarczowe mechanizmy hamulcowe z pneumatycznym układem sterowania. Zawieszenie kół przyczepy jest zależne, z pneumatycznymi elementami sprężystymi, podłużnymi wahaczami i poprzecznym drążkiem Panharda. Ramę przyczepy unieruchomiono na czas badań. Koła przyczepy ustawiono na bębnach stalowych o średnicy 2 m.

Przyczepę wyposażono w układ pomiarowy, którego niektóre elementy pokazano na rys. 1. Umożliwia on obserwację następujących wielkości: siły wzdłużnej działającej na oś koła, ugięcia ogumienia, pionowego i wzdłużnego przyspieszenia osi kół, obciążenie normalne zawieszenia oraz prędkość koła i bębnow. Oś przyczepy (rys.1b) jest prowadzona przez dwie pary równoległych wahaczy wleczonych (1,2). Wahacze są połączone przegubowo z ramionami dźwigni kątowych (3,4). Dźwignie zamocowane są obrotowo na pionowej belce utwierdzonej do ramy przyczepy. Dźwignie kątowe są połączone ze sobą sztywnym cięgiem przegubowym (6). Dolna dźwignia kątowa połączona jest sztywnym cięgiem (5) z ramą. W cięgie tym wmontowano przetwornik siły. Siły R_1 i R_2 są przenoszone przez wahacze i działają na ramiona dźwigni kątowych. Ponieważ ramiona dźwigni mają jednakową długość, siły R_1 i R_2 są przenoszone prostopadłe przez dźwignie na sztywne cięgiło przegubowe (6), przy niezmiennych wartościach. Poniżej przedstawiono podstawowe równania równowagi określone dla dwóch podukładów:

1) koła i układu cięgieł sztywnych (dla środka koła):

$$\begin{aligned}\sum F_{ix} &= F_x - R_2 + R_1 = 0, \\ \sum F_{iy} &= Z_K - F_Z = 0, \\ \sum M_{iO} &= Z_K \cdot e - F_x \cdot r_K + R_2 \cdot h + R_1 \cdot h - M_B = 0,\end{aligned}\tag{1}$$

gdzie: M_B – moment bezwładności koła w ruchu obrotowym,

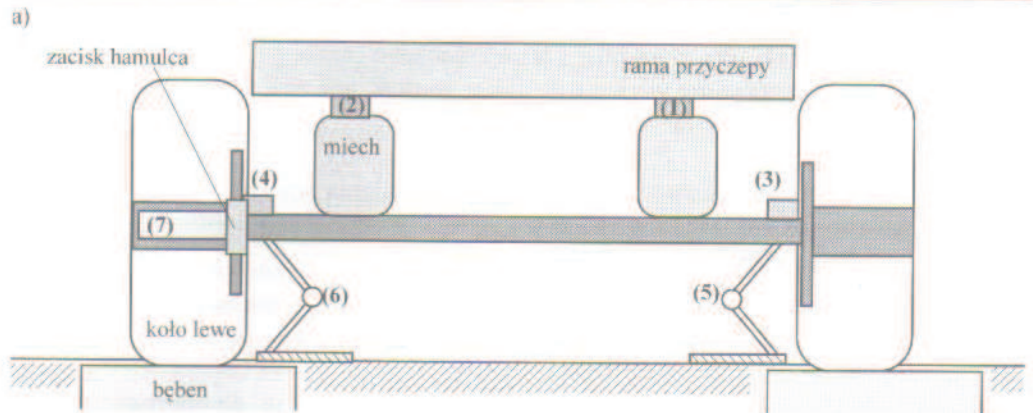
2) dla układu cięgien sztywnych związanych z dźwignią (3) wahacza dolnego:

$$\sum F_{iy} = R_2 - R_1 - R_L = 0.\tag{2}$$

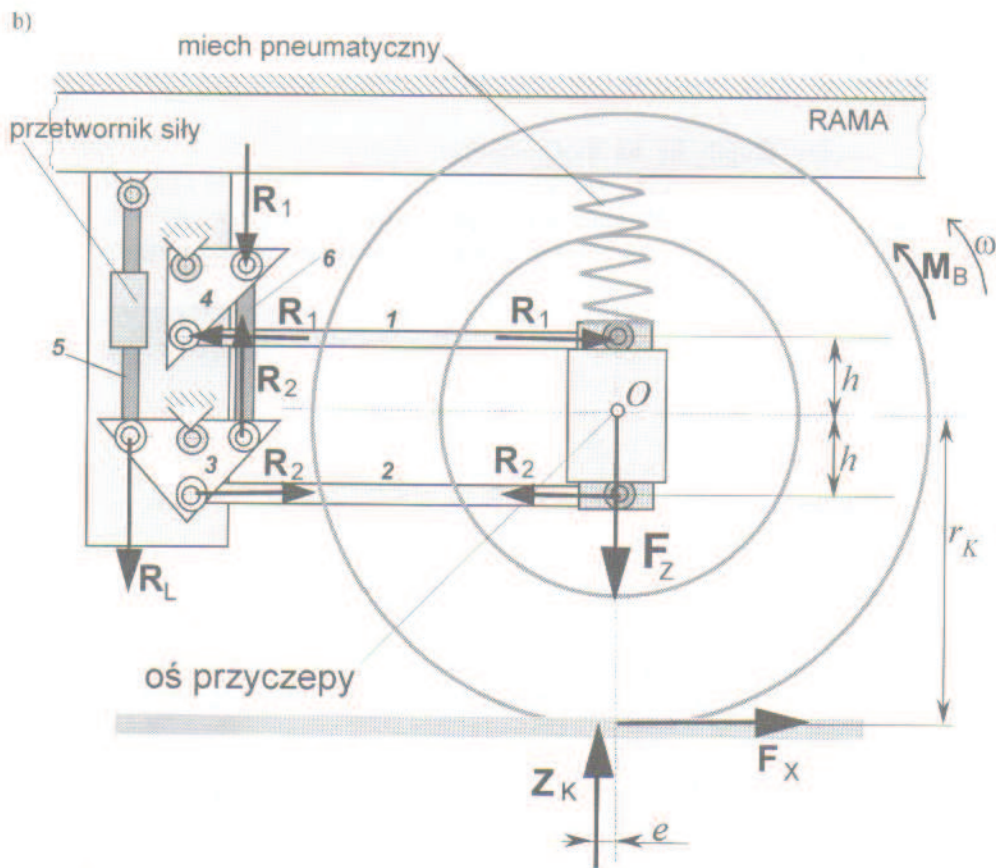
Z układu równań (1) wyznaczono reakcje R_1 i R_2 :

$$R_1 = F_x \cdot \frac{r_K - h}{2h} - Z_K \cdot \frac{e}{2h} - \frac{M_B}{2h},\tag{3}$$

$$R_2 = F_x \cdot \frac{r_K + h}{2h} - Z_K \cdot \frac{e}{2h} - \frac{M_B}{2h}.\tag{4}$$



1, 2 — czujniki sił w zawieszeniu przyczepy; 3, 4 — czujniki przyspieszenia osi jezdnej; 5, 6 — czujniki ugięcia ogumienia; 7 — czujniki prędkości koła



Rys. 1. Rozmieszczenie czujników pomiarowych na przyczepie dynamometrycznej (a) oraz siły działające na hamowane koło (b).

Fig. 1. Location of measurement transducers on dynamometer trailer (a) and forces acting on braking wheel (b)

Podstawiając (3) i (4) do równania (2) wyznaczono reakcję R_L , mierzoną przez przetwornik siły, zamocowany w cięgłe 5, której wartość jest równa sile F_X :

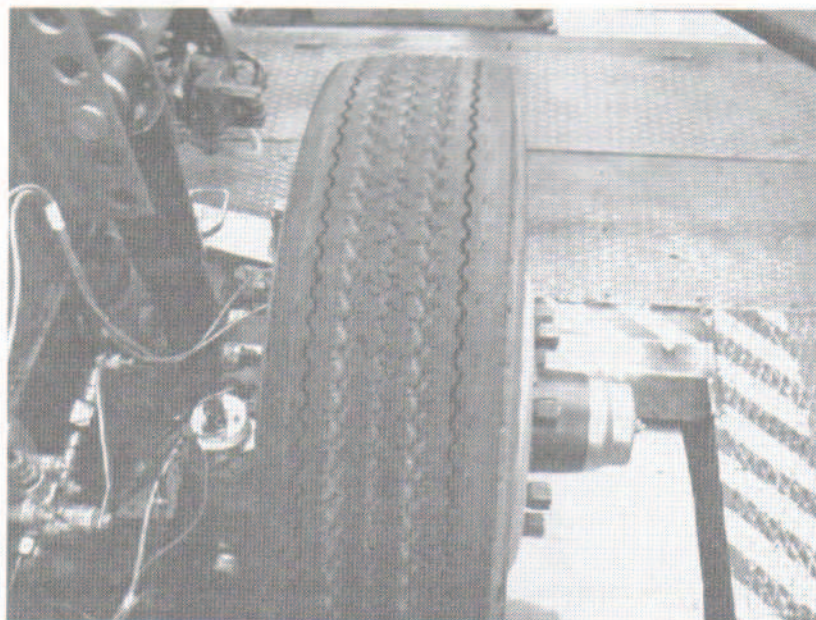
$$R_L = R_2 - R_1 = F_X. \quad (5)$$

W ten sposób, zamiast pomiaru sił R_1 i R_2 w celu określenia wartości siły F_X można za pomocą przetwornika siły zabudowanego w cięgłe 5 mierzyć bezpośrednio różnicę tych sił, równą sile F_X .

2. Badania przyczepności ogumienia

Przygotowany układ pomiarowy przyczepy wykorzystano m.in. do obserwacji zmian siły wzdłużnej działającej na oś koła podczas krótkotrwałego hamowania, prowadzącego do zablokowania koła. Proces krótkotrwałego hamowania koła samochodu ciężarowego opisywano wcześniej w pracach [2, 7, 8]. Podano tam wyniki analizy procesu formowania obciążeń dynamicznych, które powstają przy szybkich zmianach wartości momentu tarcia w hamulcach. Wskazano, że intensywne oscylacje siły wzdłużnej na hamowanym kole mogą być związane z drganiami promieniowymi i obwodowymi powłoki opony.

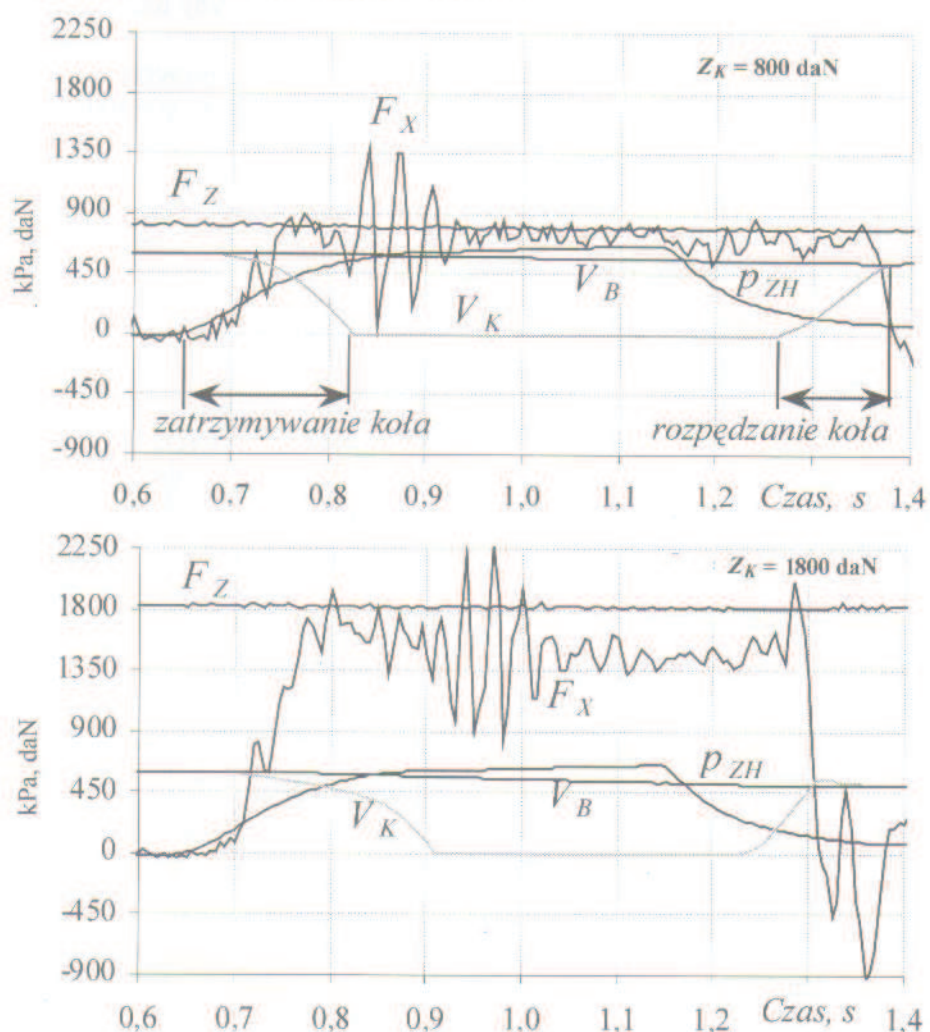
Obecnie autorzy skupili się na możliwościach wyznaczenia charakterystyki przyczepności ogumienia w warunkach szybkich zmian wartości momentu tarcia w hamulcach samochodu ciężarowego. W niniejszym opracowaniu, określenie „charakterystyka przyczepności ogumienia” wyraża zależność jednostkowej siły obwodowej na kole od



Rys. 2. Opona 255/70R22.5 na stanowisku bębnowym
Fig. 2. The 255/70R22.5 tire on the drum facility

poślizgu w styku opony z nawierzchnią bębna. Gwałtowne hamowanie, charakteryzujące się krótkim czasem, jaki upływa od początku hamowania koła do jego zablokowania, może mieć istotny wpływ na przebieg charakterystyki przyczepności [6]. Bardzo krótki okres przejściowy (do zablokowania koła) wpływa na możliwości ustalenia przebiegu charakterystyki przyczepności, co będzie przedstawione w dalszej części pracy.

Badaniom poddano ogumienie radialne o rozmiarze 255/70R22.5 i drogowej rzeźbie bieżnika (rys.2). Pomiary wykonywano przy krótkotrwałym przyhamowywaniu jednego koła, zadając maksymalną wartość ciśnienia powietrza w siłowniku zacisku hamulca (600 kPa). Obserwowano następujące wielkości:



Rys. 3. Przykładowe wyniki pomiarów wielkości obserwowanych podczas krótkotrwałego hamowania koła, przy dwóch różnych wartościach obciążenia normalnego Z_k , $V_0 = 60 \text{ km/h}$, (prędkość na rysunku podana jest w $\text{km/h} \cdot 10$)

Fig. 3. Measurement results examples of observed quantities during short-time wheel braking, for two different values of normal load Z_k , $V_0 = 60 \text{ km/h}$ (velocity on the pictures is shown in $\text{km/h} \cdot 10$)

- siła pionowa obciążająca koło, F_Z ;
- siła wzdłużna (hamująca), F_X ;
- ciśnienie w siłowniku hamulca, p_{ZH} ;
- prędkość kąтова koła hamowanego, ω_K , $V_K \cdot r_K$ (r_K – promień dynamiczny koła);
- prędkość liniowa powierzchni bębnow stanowiska V_B .

Przykładowe wyniki pomiarów podano na rys. 3. Charakterystyczne tu jest, że oprócz intensywnych oscylacji siły wzdłużnej, które pojawiają się po zablokowaniu koła, podobne oscylacje tej siły mogą wystąpić w czasie, kiedy koło zatrzymuje się i kiedy jest rozpędzane po odhamowaniu. Źródłem obserwowanych oscylacji siły wzdłużnej mogą być drgania powłoki opony, wywołane oddziaływaniem rzeźby bieżnika i poślizgiem nadmiernie obciążonych jego występów.

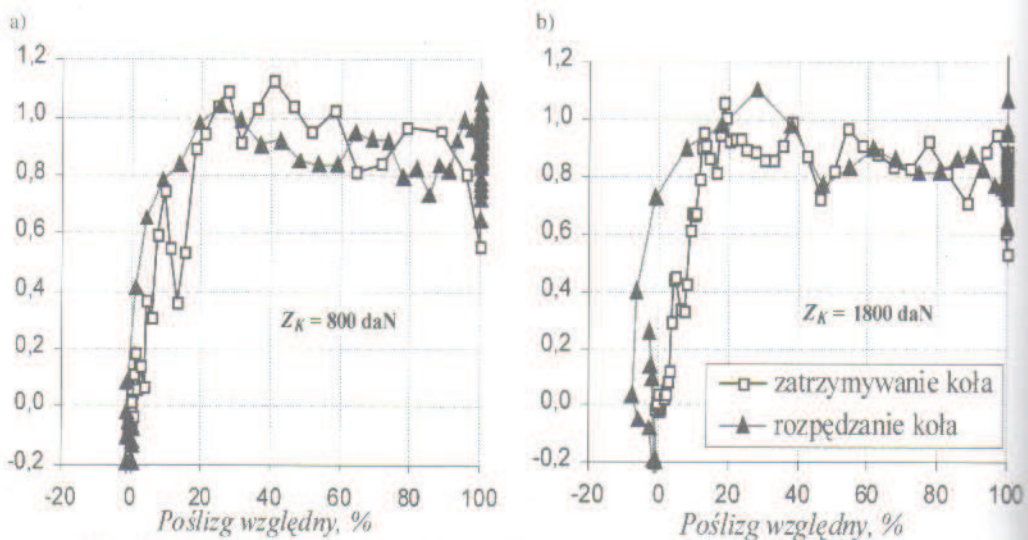
Wyniki pomiarów wykorzystano do określenia charakterystyki przyczepności wzdłużnej ogumienia w funkcji poślizgu pomiędzy bębmem a kołem $\varphi = f(s)$. Przyjęto następujące zależności:

$$\varphi(t) = \frac{F_x(t)}{F_z(t)} - \text{jednostkowa siła wzdłużna (obwodowa)}, \quad (6)$$

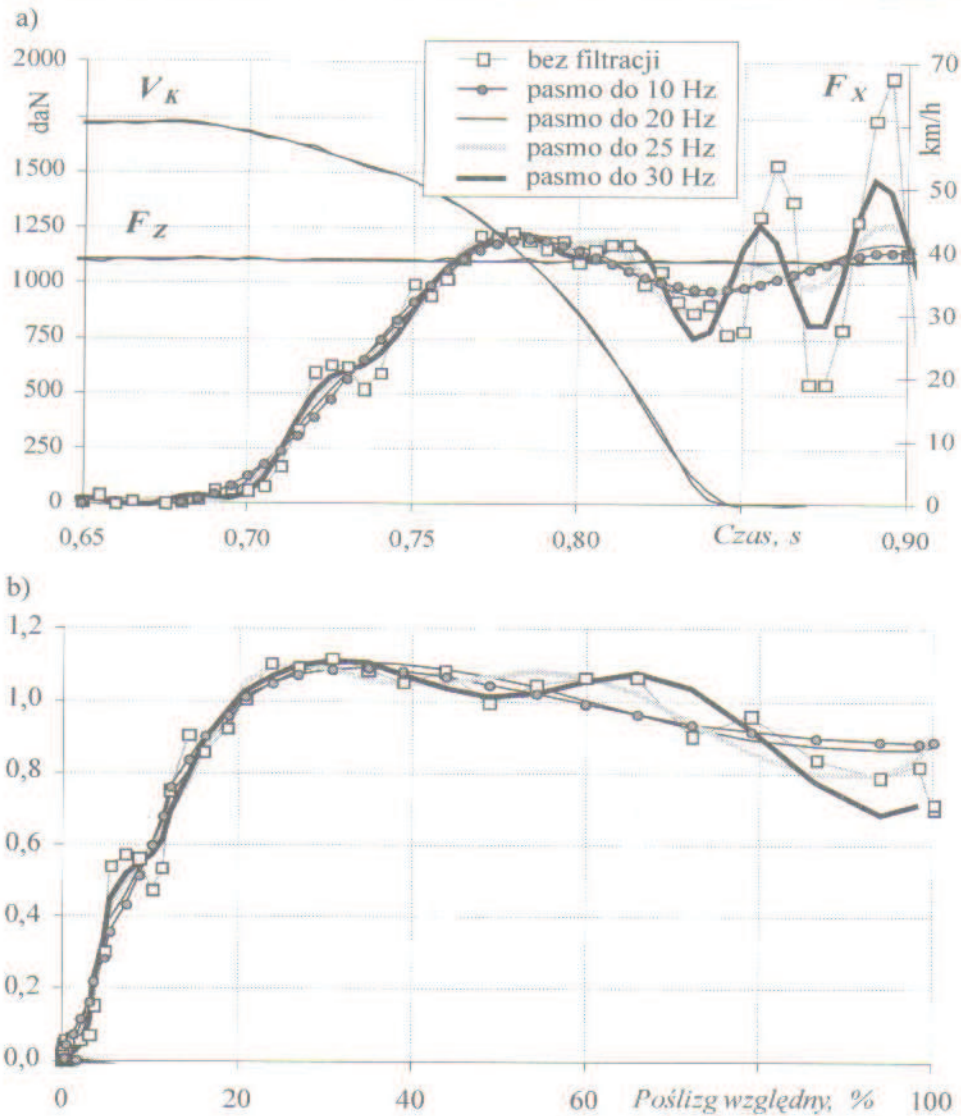
$$s(t) = \left[1 - \frac{V_K(t)}{V_B(t)} \right] \cdot 100\% - \text{poślizg pomiędzy bębmem a kołem}. \quad (7)$$

Wykorzystując wyniki pomiarów pokazane na rysunku 3, obliczono przebieg charakterystyki przyczepności opony 255/70R22.5 (rys. 4).

Oscylacje siły wzdłużnej F_X , przy praktycznie stałej wartości siły normalnej, wpływają bezpośrednio na zmienność przebiegu obliczonej charakterystyki przyczepności. Obserwowane oscylacje siły wzdłużnej F_X są zakłócone losowym oddziaływaniem niejednorodności opon, tarczy hamulcowej i bębnow. Ich przebieg, mimo dość po-



Rys. 4. Charakterystyki przyczepności określone na podstawie wyników pomiarów z rys. 3.
Fig. 4. Friction characteristics received basing on measure results shown on the picture 3



Rys. 5. Rezultaty filtracji wyników pomiarów, $V_0 = 60$ km/h, $F_z = 1100$ daN; a – wpływ filtracji na przebieg $F_z(t)$, $F_x(t)$, $V_k(t)$, b – wpływ filtracji na wyniki obliczeń charakterystyk przyczepności
 Fig. 5. Measurement results filtration effects, $V_0 = 60$ km/h, $F_z = 1100$ daN; a – filtration influence on the route of $F_z(t)$, $F_x(t)$, $V_k(t)$, b – filtration influence on results of friction characteristics calculation

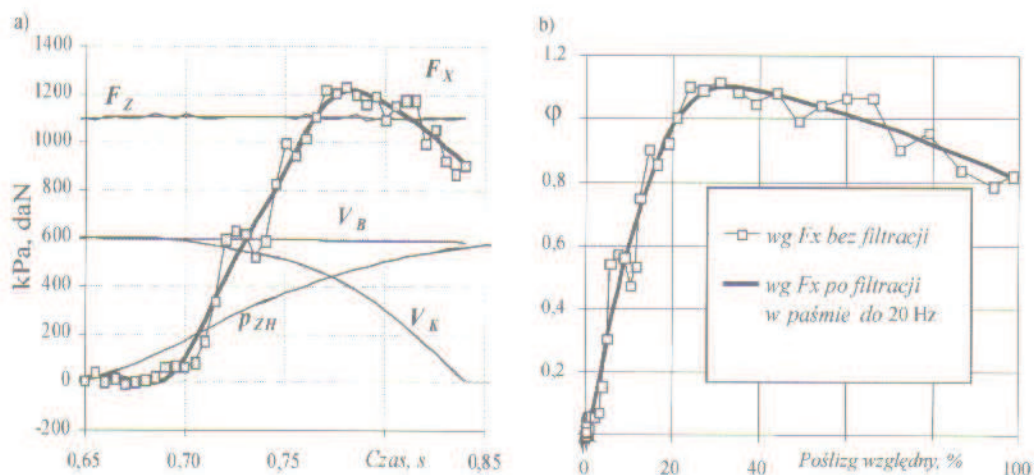
wtarzalnej struktury częstotliwościowej, wykazuje duży rozrzut wartości ekstremalnych tych oscylacji. W rezultacie wykorzystanie takiego przebiegu $F_x(t)$ do obliczeń charakterystyk przyczepności powoduje nierównomierny przebieg tej charakterystyki. Obliczony przebieg charakterystyki odbiega od podawanych w literaturze uśrednionych i wygładzonych charakterystyk przyczepności. Dlatego w dalszej części pracy po-

szukiwano efektywnego i racjonalnego sposobu stosownej obróbki pomierzonych realizacji przed ich wykorzystaniem do obliczeń charakterystyk przyczepności.

Eliminacje tych zakłóceń z pomierzonych realizacji prowadzi się na ogół poprzez ich filtrowanie [3,6]. Dobór parametrów procesu filtracji powinien być tak przeprowadzony, aby wraz z zakłóceniami nie usunąć z realizacji istotnych informacji o właściwościach badanego procesu. Dlatego przy badaniu układu dynamicznego celowe jest rozpoznanie właściwości tego układu, a przede wszystkim postaci jego drgań swobodnych. W pracy [2] wykazano, że koło w skojarzeniu z osią przyczepy stanowi układ dynamiczny, którego drgania swobodne w kierunku pionowym i wzdłużnym mieszczą się w granicach odpowiednio 8–12 Hz i 25–35 Hz. Obserwowane oscylacje siły F_x (rys. 3) występują właśnie w przedziale 25–35 Hz.

W celu zbadania wpływu procesu filtracji na uzyskiwany przebieg charakterystyki przyczepności, pomierzone realizacje $F_z(t)$, $F_x(t)$, $V_k(t)$, $V_B(t)$ poddano filtracji. Użyto filtru dolnoprzepustowego o paśmie do 30, 25, 20, 10 Hz. Przykład wpływu takiej filtracji na rezultaty obliczeń pokazano na rys. 5.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że filtracja realizacji $F_z(t)$, $V_k(t)$, $V_B(t)$ praktycznie nie wpływa na ich przebieg, bowiem podczas badań nie obserwowano znacznych zmian ich wartości. Natomiast filtracja w istotny sposób wpływa na przebieg zmian siły wzdłużnej (rys. 5a). Tym samym rezultat filtracji jest dobrze widoczny na przebiegach charakterystyki przyczepności (rys. 5b). Ma to miejsce zwłaszcza przy dużych wartościach poślizgu, rzędu 50–100%. Właśnie przy występowaniu tak dużego poślizgu ogumienie zostaje pobudzone do intensywnych drgań. W dalszych obliczeniach rozważano tylko fragment obserwowanych realizacji, odpowiadający czasowi, który upływa od początku hamowania do zablokowania koła. Efekt takiego postępowania pokazano na rys. 6. Biorąc pod uwagę dominujące oscylacje siły F_x w paśmie 25–35 Hz w obliczeniach wykorzystano filtrację do 20 Hz.

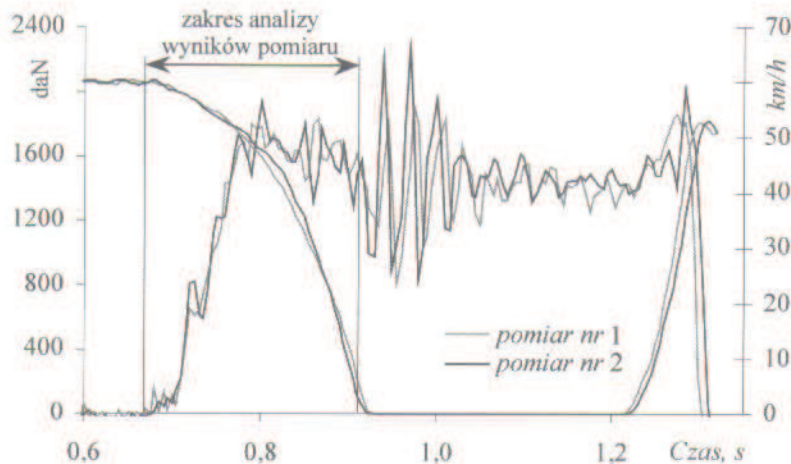


Rys. 6. Wyniki pomiarów procesu hamowania w czasie, który upływa od początku hamowania do zablokowania koła (a) oraz charakterystyka przyczepności (b); zastosowano skale wartości fizycznych jak na rys. 3

Fig. 6. Measurement results of brake process with time, from start of braking till wheel locking (a) and friction characteristic (b); there is applied a physical quantities scales like of the picture 3

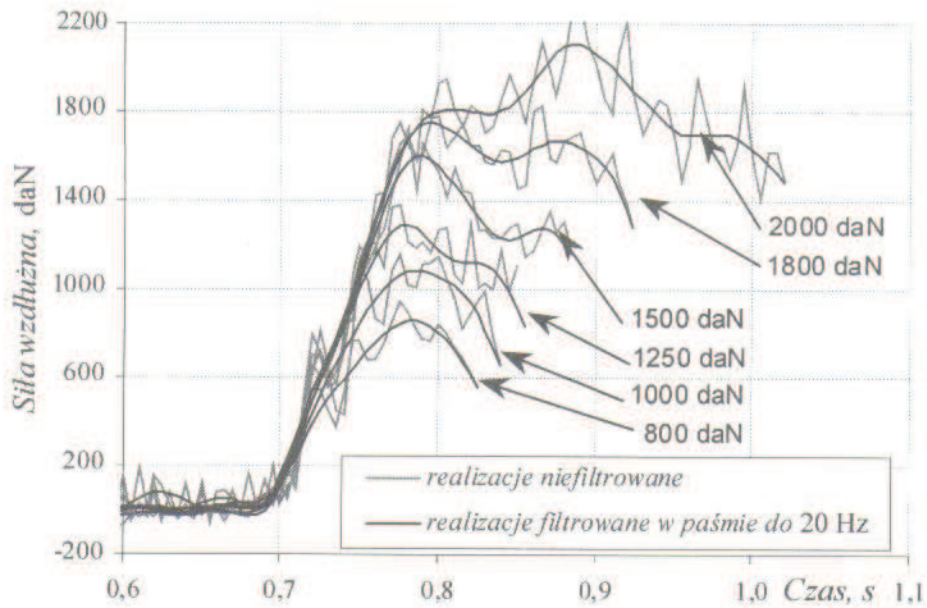
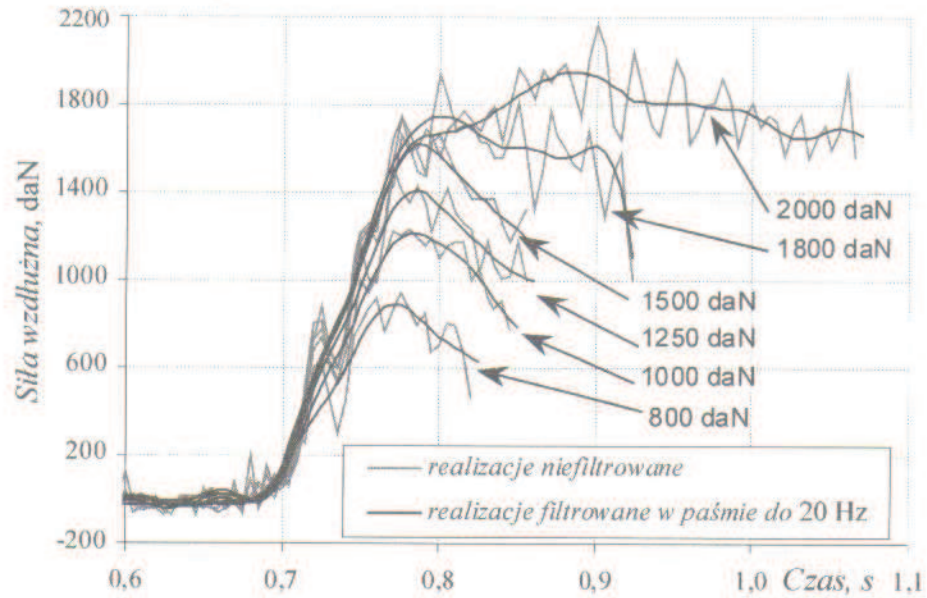
3. Wpływ obciążenia koła na charakterystykę przyczepności

Stosując opisaną wyżej metodykę obliczeń oraz wykorzystując wysoką powtarzalność wyników pomiarów i obliczeń (przykład na rys.7) wyznaczono charakterystyki przyczepności dla różnych wartości obciążenia normalnego, przypadającego na badane ogumienie. Zagadnienie wpływu obciążenia normalnego jest szczególnie ważne dla ogumienia stosowanego w samochodach ciężarowych, które eksploatowane jest w szerokim zakresie zmian obciążenia.



Rys. 7. Wyniki dwóch powtórzeń pomiarów procesu hamowania, $V_0 = 60$ km/h, obciążenie koła 1800 daN
 Fig. 7. Two repetitions measure results of braking process, $V_0 = 60$ km/h, wheel normal load 1800 daN

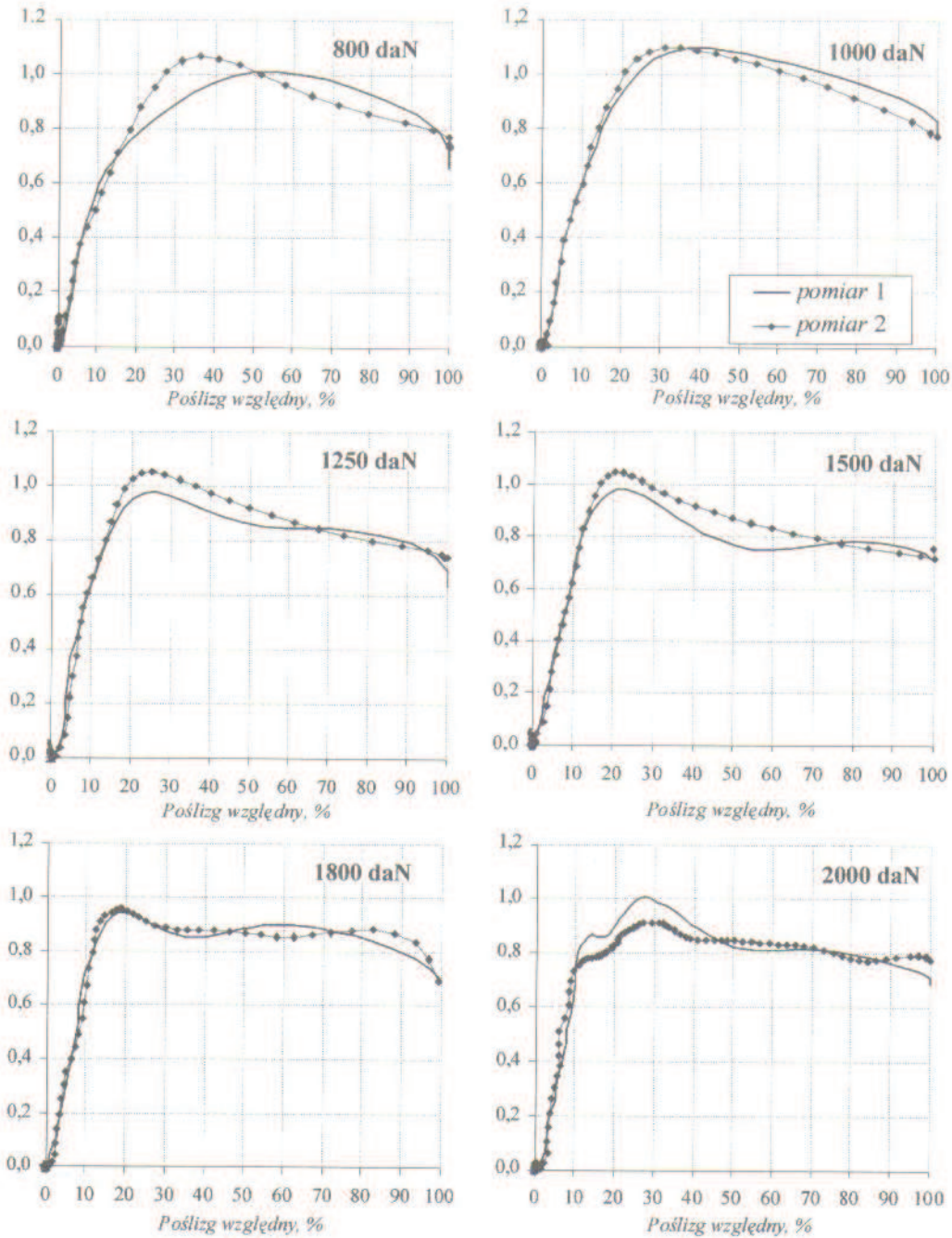
Na rysunku 8 pokazano fragmenty realizacji siły wzdłużnej odpowiadające czasowi, który upływa od początku hamowania do zablokowania koła. Realizacje te zarejestrowano podczas hamowania koła przy różnych wartościach jego obciążenia normalnego. Na rysunki naniesiono także linie odpowiadające realizacjom siły wzdłużnej, które uzyskano po ich filtracji w paśmie do 20 Hz. Wyznaczone charakterystyki przyczepności ogumienia, obliczone na podstawie realizacji przefiltrowanych w paśmie do 20 Hz, podano na rys. 9. Pokazane dwie linie na przebiegach charakterystyk przyczepności (rys.9) przy danym obciążeniu normalnym ogumienia obrazują jednocześnie rozrzut wyników obliczeń, uzyskanych dla kilku powtórzeń pomiarów. Wartości współczynnika przyczepności obliczone na podstawie wyników kolejnych powtórzeń pomiarów różnią się nawet o ok. 10%. Biorąc pod uwagę możliwość precyzyjnego powtarzania warunków pomiarów na stanowisku laboratoryjnym, takich jak prędkość toczenia koła, obciążenie normalne, rodzaj nawierzchni, temperatura ogumienia oraz moment hamujący koło, uzyskany rozrzut wyników obliczeń oceniono jako wysoki. Może on być istotny przy ocenie właściwości nowych konstrukcji ogumienia. Tym samym potwierdzono, że na wyniki obliczeń charakterystyki przyczepności ogumienia mogą mieć wpływ właściwości dynamiczne powłoki opony.



Rys. 8. Fragment realizacji siły wzdłużnej odpowiadający odcinkowi czasu od początku hamowania do zablokowania koła oraz przebiegi po filtracji w paśmie do 20 Hz;

a) pomiar nr 1; b) pomiar nr 2

Fig. 8. Longitudinal force route fragment corresponding with the time period from start of braking to wheel locking and routes after filtration in band up to 20Hz; a) measure 1, b) measure 2



Rys. 9. Charakterystyki przyczepności ogumienia o rozmiarze 255/70R22.5 przy $V_o = 60$ km/h oraz kilku wartościach obciążenia normalnego z zakresu 800÷2000 daN

Fig. 9. The tire 255/70R22.5 friction characteristics with $V_o = 60$ km/h and some values of wheel normal load in range from 800 to 2000 daN

Mimo widocznego rozrzutu wyników pomiarów i obliczeń potwierdzono ogólnie znaną zależność [1, 4], że wraz ze wzrostem obciążenia maleje wartość maksymalna współczynnika przyczepności, co pokazano na rys. 9. Wraz ze wzrostem obciążenia normalnego koła obserwuje się także przesunięcie wartości maksymalnej współczynnika przyczepności (przyczepność przylgowa) w kierunku mniejszych wartości poślizgu pomiędzy bębniem a kołem.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary obciążeń dynamicznych koła samochodu ciężarowego podczas jego krótkotrwałego hamowania pozwoliły na bardziej szczegółowe rozważenie charakteru zmian siły wzdłużnej, działającej na oś koła i w styku opony z nawierzchnią. Przedstawione w sposób przykładowy wyniki pomiarów i obliczeń wskazują na trudności w jednoznacznym określaniu charakterystyk przyczepności, których postać zależy nie tylko od właściwości ogumienia i nawierzchni ale także innych czynników związanych z metodą pomiaru i obliczeń.

Literatura

- [1] ERVIN R.D., *Measurements of the longitudinal and lateral traction properties of truck tires*, IMechE C30/76 str.93-99, 1976.
- [2] PROCHOWSKI L., ŻUCHOWSKI A., *Obciążenia dynamiczne koła samochodu ciężarowego w początkowym okresie jego hamowania*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej, 1(40), 2001.
- [3] ZANTEN A., RUF W., LUTZ A., *Measurement and Simulation of Transients in Longitudinal and Lateral Tire Forces*, SAE 900210.
- [4] DUGOFF H., FANCHER P.S., SEGEL L., *An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance*, SAE Paper No. 700377, 1970.
- [5] LANZENDOERFER J., ANDRZEJEWSKI R., *Współczynnik przyczepności koła do nawierzchni drogi*, Technika Motoryzacyjna nr 3, 1973.
- [6] SZWABIK B., POKORSKI J., *Dynamika hamowania a przebieg charakterystyk przyczepności wzdłużnej opon samochodowych i nawierzchni drogowych*, Teza Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, Oddział PAN w Krakowie, Zeszyt 20, Kraków 2000.
- [7] LUTY W., PROCHOWSKI L., *Analiza procesu narastania siły hamowania koła samochodu ciężarowego*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej, 1(40), 2001.
- [8] ŁAWNICZAK S., PROCHOWSKI L., *Analiza zmian prędkości kątowej koła samochodu ciężarowego podczas hamowania*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej, 1(40), 2001.

**Determination of friction grip characteristic
during short duration braking of truck****S u m m a r y**

Results of investigations of truck's tire while braking were presented in the paper. Investigations were carried out using special uniaxial dynamometer trailer. Prepared trailer's measuring system among other things was used for observation of longitudinal force changes on wheel, while short duration braking, leading to wheel locking. Those investigations allowed a more detailed analysis of longitudinal forces changes influencing braking wheel axle and their basis to determine friction grip characteristic as well as their interdependence of wheel load intensity.