

dr inż. Witold Luty

Wydział Transportu

Politechnika Warszawska

Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska

E-mail: wluty@wt.pw.edu.pl

Symulacyjna analiza wpływu masy pojazdu na drogę zatrzymania

Słowa kluczowe: *bezpieczeństwo samochodu, droga zatrzymania, badania ogumienia*

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych ogumienia pojazdu ciężarowego w warunkach dynamicznego hamowania. Na przykładzie wyników pomiaru pokazano, że zwiększenie obciążenia normalnego koła skutkuje wzrostem czasu narastania wzdłużnej reakcji stycznej oraz spadkiem wartości współczynnika przyczepności opony do podłoża (przyłgowej oraz poślizgowej). Przedstawiono wyniki symulacji procesu hamowania awaryjnego pojazdu ciężarowego, którego masa zmienia się znacząco. Wyniki wykazały że zwiększenie masy pojazdu może istotnie wydłużyć jego drogę zatrzymania w warunkach hamowania awaryjnego.

1. Wprowadzenie

Przyczepność kół jezdnych do podłoża może decydować zachowaniu pojazdu w ekstremalnych warunkach hamowania lub jazdy po łuku drogi na granicy przyczepności kół jezdnych do podłoża [13,14,15,17,3]. W procesie hamowania, długość drogi zatrzymania pojazdu można wyrazić jako [2,12,16]:

$$s_z = v_0 \left(t_{rk} + t_{rs} + \frac{t_n}{2} \right) + \frac{v_0^2}{2a_h} \quad (1)$$

gdzie:

- a_h – średnie opóźnienie hamowania
- v_0 – prędkość początkowa pojazdu
- t_{rk} – czas reakcji kierowcy
- t_{rs} – czas reakcji układu hamulcowego
- t_n – czas narastania siły/opóźnienia hamowania

W warunkach hamowania awaryjnego, wartość opóźnienia hamowania a_h jest ograniczona siłą przyczepności kół jezdnych pojazdu do podłoża. W klasycznym ujęciu siła przyczepności każdego z kół jezdnych pojazdu zależy współczynnika przyczepności [1,17,3]. Zatem, w przypadku hamowania na poziomym podłożu, przy założeniu stałej wartości współczynnika przyczepności μ_2 kół jezdnych do podłoża (w stanie zablokowania kół), wyrażenie (1) przybiera następującą postać [2]:

$$s_z = v_0 \left(t_r + \frac{t_n}{2} \right) + \frac{v_0^2}{2\mu_2 g} \quad (2)$$

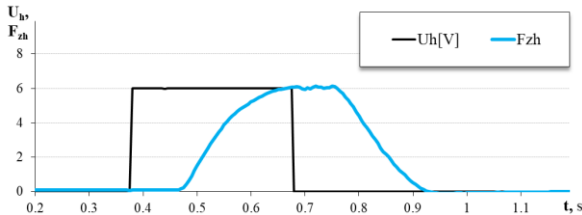
W przedstawionym wyrażeniu masa pojazdu nie ma udziału, co sugeruje, że nie wpływa na jego drogę zatrzymania podczas hamowania awaryjnego. Jednak doświadczenia własne oraz dane literaturowe pokazują, że wartość współczynnika przyczepności opony do podłoża może się zmniejszać wraz ze wzrostem wartości obciążenia normalnego koła [9,8,11], a wzrost masy pojazdu może wydłużyć drogę hamowania awaryjnego [18].

Zmiany masy (ciężaru) samochodów osobowych na ogół nie są znaczne, ale masa współczesnych samochodów ciężarowych może się zmieniać znacznie bo nawet 3 krotnie, od masy własnej do masy odpowiadającej Dopuszczalnej Masie Całkowitej (DMC).

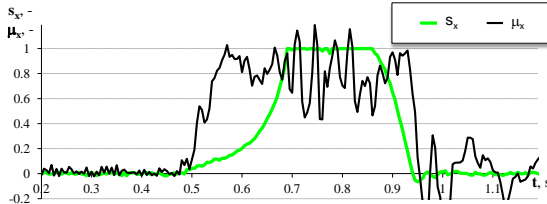
Wyniki własnych badań eksperymentalnych ogumienia pokazują, że wartość obciążenia normalnego koła zmienia przebieg zmian wartości wielkości fizycznych, które charakteryzują przebieg procesu hamowania. Pokazano to na rysunku 1. Przebieg całego procesu dynamicznego hamowania koła został opisany w innych publikacjach [7,8,6]. Na przykładowych wynikach pomiaru widać, że mimo zadania skokowego sygnału sterowania otwarciem zaworu pneumatycznego hamulca U_h , siła zacisku klocków hamulcowych na tarczy hamulcowej F_{zh} narasta z określonym przesunięciem w czasie, a jednocześnie z określonym, ograniczonym tempem, aż do osiągnięcia wartości maksymalnej. Z podobnym przesunięciem w czasie oraz z właściwym sobie tempem narastają: poślizg wzdłużny koła s_x oraz siła reakcji wzdłużnej F_x (zwana dalej reakcją wzdłużną) przenoszona przez koło. Przebieg tej siły pokazano na rysunku 1.b w postaci siły jednostkowej ($\mu_x = \frac{F_x}{F_z}$).

Przy określonej konstrukcji zacisku hamulcowego, wartość maksymalna siły zacisku klocków hamulcowych na tarczy hamulcowej F_{zh} , która determinuje wartość momentu hamowania koła M_h , jest ograniczona wartością ciśnienia powietrza dostarczonego do siłownika.

- a) napięcie sterowania zaworem hamulca U_h oraz siła zacisku klocków hamulcowych F_{zh}



- b) poślizg wzdłużny s_x i jednostkowa reakcja wzdłużna μ_x przenoszona przez koło



Rys. 1. Przykładowy zestaw wyników pomiaru wielkości fizycznych charakteryzujących proces dynamicznego hamowania koła samochodu ciężarowego średniej ładowności w warunkach laboratoryjnych ($F_z=15000N$, prędkość początkowa toczenia koła $v_0=60km/h$)

Zatem zmiana wartości obciążenia normalnego koła F_z nie powinna prowadzić do zmiany przebiegu oraz wartości maksymalnej siły zacisku hamulcowego F_{zh} , a tym samym momentu hamowania koła M_h . Jednak dynamika hamowania koła zmienia się. Widać to na rysunku 2.

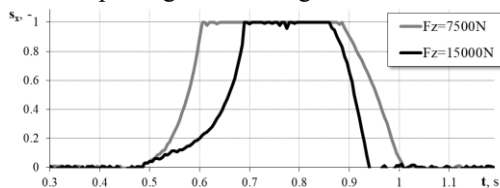
Wyniki pomiaru pokazują, że w wzrost obciążenia normalnego F_z , podczas dynamicznego hamowania koła, powoduje:

- wydłużenie czasu spadku prędkości kątowej koła, aż do jego zablokowania (Rys. 2a,b),
- wydłużenie czasu narastania wartości reakcji wzdłużnej F_x przenoszonej przez koło w wyniku hamowania do osiągnięcia wartości siły przyczepności w stanie zablokowania koła (Rys. 2b),
- spadek wartości współczynnika przyczepności przylgowej μ_1 oraz poślizgowej μ_2 koła do podłoża (Rys. 2c).

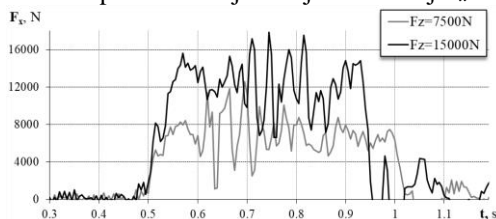
Na podstawie przedstawionych wyników badań laboratoryjnych koła ogumionego oraz w odniesieniu do równania (2) można stwierdzić, że wzrost masy pojazdu powodujący bezpośredni wzrost wartości obciążenia normalnego każdego z kół jezdnych, może spowodować wydłużenie jego drogi zatrzymania w procesie hamowania awaryjnego poprzez:

- wydłużenie czasu narastania siły hamowania, do osiągnięcia wartości odpowiadającej sile przyczepności kół jezdnych do podłoża,
- spadek wartości współczynnika przyczepności koła do podłoża.

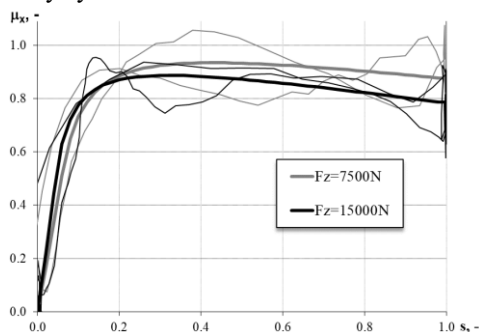
a) przebiegi zmian wartości poślizgu wzdłużnego s_x



b) przebiegi zmian wartości przenoszonej reakcji wzdłużnej F_x



c) porównanie charakterystyk hamowania koła



Rys. 2. Wpływ obciążenia normalnego F_z na przebieg procesu dynamicznego hamowania koła w warunkach laboratoryjnych (koło samochodu ciężarowego średniej ładowności, $v_0=60\text{km/h}$, podłoże typu bęben stalowy gładki)

Są to istotne wnioski z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu pojazdu oraz z punktu widzenia procesu rekonstrukcji zdarzenia drogowego, w którym miało miejsce awaryjne hamowanie pojazdu [15,20,19]. Przedstawiony problem dotyczy głównie samochodów ciężarowych, które mogą przewozić ładunek o masie wyższej niż ich masa własna.

Wydłużenie drogi zatrzymania pod wpływem wzrostu masy pojazdu można oszacować metodą symulacyjną. Zaplanowano i wykonano badania symulacyjne, których celem było przedstawienie wpływu wzrostu masy

pojazdu, a tym samym obciążenia normalnego jego kół jezdnych na wydłużenie drogi zatrzymania w procesie hamowania awaryjnego na podstawie wyników badań eksperymentalnych ogumienia wykonanych w warunkach laboratoryjnych.

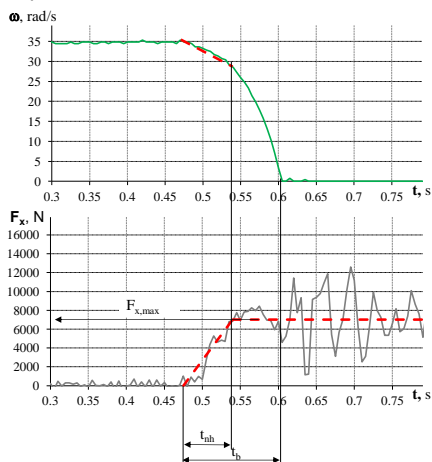
2. Wpływ obciążenia normalnego na przebieg procesu narastania wartości wzdłużnej reakcji stycznej przenoszonej przez koło

Wykonanie zaplanowanych badań symulacyjnych wymagało przygotowania i sparametryzowania uproszczonego opisu procesu narastania wartości wzdłużnej reakcji stycznej przenoszonej przez koło w procesie dynamicznego hamowania.

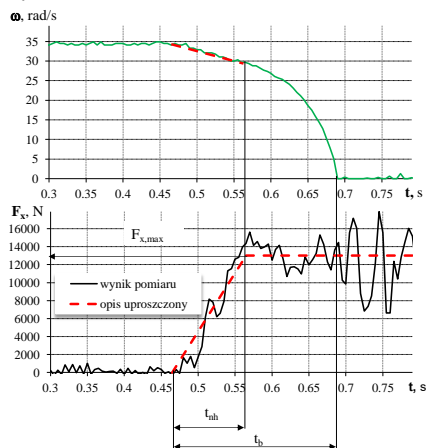
Proces narastania reakcji wzdłużnej F_x podczas dynamicznego hamowania koła można opisać w sposób uproszczony zależnością liniową, z wykorzystaniem następujących wielkości (Rys. 3):

- wartość graniczna reakcji wzdłużnej $F_{x,max}$ osiągnięta i utrzymana w procesie hamowania koła,
- czas narastania t_{nh} reakcji wzdłużnej F_x .

a) $F_z=7500\text{ N}$



b) $F_z=15000\text{ N}$



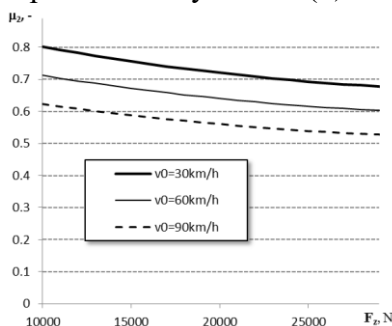
Rys. 3. Uproszczony opis oraz parametryzacja procesu dynamicznego hamowania koła

W czasie narastania t_{nh} reakcji wzdłużnej zachodzi również spadek prędkości kątowej koła ω , a tym samym wzrost wartości poślizgu wzdłużnego s_x (Rys. 3). Dla celów prowadzonej analizy wartość graniczną $F_{x,max}$ reakcji wzdłużnej F_x można ustalić na podstawie współczynnika przyczepności koła do podłoża. Wyniki własnych badań eksperymentalnych koła ogumionego w warunkach

hamowania pokazanych na rysunku 2 oraz przedstawionych w literaturze [7,8] wykazują, że obciążenie normalne koła wpływa na wartość współczynnika przyczepności pojedynczego koła do podłoża. Wraz ze wzrostem obciążenia normalnego koła zmniejsza się zarówno wartość współczynnika przyczepności przylgowej μ_1 jak i poślizgowej μ_2 . Można przyjąć, że w procesie hamowania awaryjnego, gdy koła pojazdu ulegają blokowaniu, realna wartość współczynnika przyczepności rozkłada się wokół wartości współczynnika przyczepności poślizgowej μ_2 (Rys. 3).

Na rysunku 3 widać również, że wartość graniczna reakcji wzdłużnej $F_{x,max}$ została osiągnięta w czasie znacznie krótszym niż czas zablokowania koła t_b . Z punktu widzenia prowadzonej analizy, istotnym faktem jest to, że w obu obserwowanych przypadkach styczna reakcja wzdłużna F_x osiągała umowną wartość graniczną $F_{x,max}$, odpowiadającą sile przyczepności poślizgowej, gdy prędkość kątowna koła zmniejszała się od początkowej prędkości kątownej $\omega=\omega_0$ do wartości równej około $\omega\approx 4/5\omega_0$. Podobne względne spadki prędkości kątownej występują podczas hamowania koła z poziomu innych wartości prędkości początkowej.

Wpływ obciążenia normalnego na przyczepność koła do podłoża w stanie jego zablokowania z uwzględnieniem prędkości toczenia koła przedstawiono na rysunku 4. Wartości współczynnika przyczepności poślizgowej μ_2 koła do podłoża, wyznaczone w szerokim zakresie zmian wartości obciążenia normalnego koła, można bezpośrednio wykorzystać do oszacowania długości drogi zatrzymania pojazdu na podstawie wyrażenia (2).

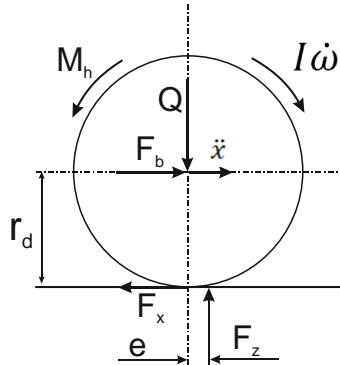


Rys. 4. Wpływ obciążenia normalnego F_z na wartości współczynnika przyczepności poślizgowej μ_2 koła do podłoża (wyniki uzyskane na gładkim podłożu bębna stalowego w warunkach laboratoryjnych)

Na podstawie wniosków z przeprowadzonej obserwacji wyników pomiaru, dla celów realizacji zaplanowanych badań przyjęto następujące założenia upraszczające:

- w procesie hamowania dynamicznego na koło działa maksymalny moment hamowania M_h zadany skokowo, a wartość tego momentu wynika z możliwości mechanizmu sterowania hamulcem koła,
- czas narastania momentu hamowania wynikający z bezwładności mechanizmu sterowania ($t_{sh} \approx 0.2s$) nie zależy od obciążenia normalnego koła – czas ten uwzględniono w procesie symulacji, jako stały składnik czasu narastania siły hamowania $t_n = t_{sh} + t_{nh}$,
- w czasie od $t=0$ do t_{nh} ruch obrotowy koła jest jednostajnie opóźniony, zatem prędkość kątowna ω zmienia się liniowo od wartości początkowej $\omega = \omega_0$ (wynikającej z początkowej prędkości toczenia v_0 i promienia dynamicznego koła r_d) do prędkości kątownej $\omega \approx \frac{4}{5} \omega_0$ (Rys. 3),
- w czasie narastania t_{nh} , wzdłużna reakcja styczna przenoszona przez koło narasta liniowo od wartości $F_x=0$ do wartości granicznej $F_{x,max}$ według zależności $F_x(t) = \frac{F_{x,max}}{t_{nh}} t$ (Rys. 3),
- wartość graniczna wzdłużnej reakcji stycznej ograniczona przyczepnością poślizgową koła do podłoża we zależności $F_{x,max} = \mu_2 F_z$ (Rys. 3),
- wartość współczynnika przyczepności poślizgowej koła do podłoża μ_2 jest zależna od obciążenia normalnego koła F_z według zależności pokazanych na rysunku 4.

Przyrost czasu narastania t_{nh} wzdłużnej reakcji stycznej F_x wywołany wzrostem obciążenia normalnego koła można oszacować na podstawie analizy dynamiki ruchu obrotowego koła podczas dynamicznego hamowania. Na rysunku 5 przedstawiono schemat sił i momentów działających na hamowane koło [2].



Rys. 5. Siły i momenty działające na koło jezdne pojazdu podczas hamowania

gdzie:

M_h – moment hamowania koła,

I – sumaryczny moment bezwładności koła wraz z elementami wirującymi związanymi z kołem,

Q – siła obciążająca koło, część ciężaru pojazdu przypadającego na koło ,

F_z – reakcja normalna działająca na koło od nawierzchni drogi,

F_x – reakcja wzdłużna działająca na koło od nawierzchni drogi,

ω – prędkość kąтова koła,

\ddot{x} – przyspieszenie w ruchu postępowym koła,

F_b – siła popychająca koło, część siły oporu bezwładności pojazdu podczas hamowania.

Na podstawie schematu przedstawionego na rysunku 5 zapisano równanie dynamiki koła w ruchu obrotowym:

$$I\dot{\omega} = -M_h - F_z e + F_x r_d \quad (3)$$

Może się wydawać, że opóźnienie kątowe koła podczas hamowania, a tym samym czas t_{nh} osiągnięcia granicznej wartości reakcji wzdłużnej F_x są w liniowej relacji z obciążeniem normalnym koła F_z . Jednak w warunkach hamowania, na skutek działania reakcji wzdłużnej F_x , opona ulega odkształceniu w kierunku wzdłużnym zgodnie ze zwrotem tej siły. Dlatego równanie powinno być uzupełnione o udział ugięcia wzdłużnego opony. Przebieg charakterystyki sprężystości obwodowej współczesnych opon jest zbliżony do liniowego. Dlatego dla celów obliczeń szacunkowych wartość ugięcia wzdłużnego opony, poczynając od wartości $u_x=0$, można wyrazić w postaci uproszczonej jako [5,10]:

$$u_x = \frac{F_x}{c_o} \quad (4)$$

c_o – sztywność obwodowa opony

Po uzupełnieniu, równanie dynamiki koła przybiera postać:

$$I\dot{\omega} = -M_h - F_z\left(e - \frac{F_x}{c_o}\right) + F_x r_d \quad (5)$$

Po wprowadzeniu dodatkowych założeń uzupełniających:

- w stanie toczenia swobodnego koła przesunięcie reakcji normalnej e jest związane ze współczynnikiem oporu toczenia koła poprzez zależność

$$e = f_t r_d \quad (6)$$

- ugięcie wzdłużne opony u_x narasta liniowo wraz z wartością wzdłużnej reakcji stycznej F_x według zależności

$$u_x(t) = \frac{u_{x,max}}{t_{nh}} t = \frac{F_{x,max}}{c_o t_{nh}} t \quad (7)$$

równanie (5) przybiera postać:

$$I \frac{d\omega}{dt} = -M_h - F_z \left(f_t r_d - \frac{\mu_2 F_z}{c_o t_{nh}} t \right) + \frac{\mu_2 F_z r_d}{t_{nh}} t \quad (8)$$

Poprzez kolejne przekształcenia równania z uwzględnieniem przyjętych wcześniej założeń upraszczających można wyznaczyć czas narastania t_{nh} reakcji wzdłużnej F_x :

$$I d\omega = \left(-M_h - F_z f_t r_d + F_z \frac{\mu_2 F_z}{c_o t_{nh}} t + \frac{\mu_2 F_z r_d}{t_{nh}} t \right) dt \quad (9)$$

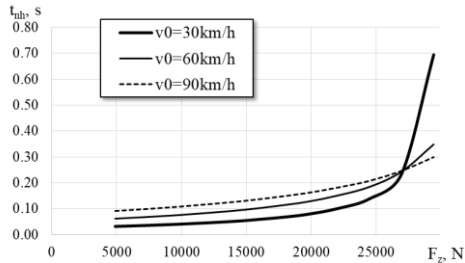
$$\int_{\omega_0}^{\frac{4\omega_0}{5}} I d\omega = \int_0^{t_{nh}} \left(-M_h - F_z f_t r_d + F_z^2 \frac{\mu_2}{c_o t_{nh}} t + F_z \frac{\mu_2 r_d}{t_{nh}} t \right) dt \quad (10)$$

$$I \frac{\omega_0}{5} = M_h t_{nh} + F_z f_t r_d t_{nh} - F_z^2 \frac{\mu_2}{2c_o} t_{nh} - F_z \frac{\mu_2 r_d}{2} t_{nh} \quad (11)$$

$$I \frac{\omega_0}{5} = t_{nh} \left(M_h + F_z f_t r_d - F_z^2 \frac{\mu_2}{2c_o} - F_z \frac{\mu_2 r_d}{2} \right) \quad (12)$$

$$t_{nh} = \frac{I \omega_0}{5 \left(M_h + F_z f_t r_d - F_z^2 \frac{\mu_2}{2c_o} - F_z \frac{\mu_2 r_d}{2} \right)} \quad (13)$$

Wyniki oszacowania czasu narastania t_{nh} reakcji wzdłużnej F_x do wartości granicznej $F_{x,max}$ przedstawiono na rysunku 6.



Rys 6. Wpływ obciążenia normalnego koła F_z i prędkości toczenia v_0 na wartości czasu narastania t_{nh} siły hamowania koła F_x do wartości granicznej $F_{x,max}$ (wyniki uzyskane na podstawie symulacji, z wykorzystaniem danych typowych dla samochodu ciężarowego średniej ładowności)

Wartość momentu bezwładności koła z oponą o rozmiarze 275/70R22.5 wraz z piastą i tarczą hamulcową oraz wartość momentu hamowania przyjęto na podstawie wyników badań przedstawionych w innych pracach [7,6].

Wyrażenie (13) pokazuje zależność czasu narastania t_{nh} reakcji wzdłużnej F_x od wielu współczynników charakteryzujących warunki ruchu koła podczas hamowania. Widać bezpośrednią zależność czasu narastania t_{nh} reakcji wzdłużnej F_x od początkowej prędkości toczenia koła v_0 (poprzez związek z prędkością kątową koła ω_0), mimo że wzrost prędkości początkowej toczenia koła v_0 jest częściowo kompensowany spadkiem wartości współczynnika przyczepności koła do podłoża μ_2 . W efekcie wyniki przeprowadzonej symulacji wykazały, że czas narastania t_{nh} reakcji wzdłużnej F_x do wartości granicznej $F_{x,max}$ rośnie nieliniowo wraz ze wzrostem obciążenia normalnego koła F_z (Rys. 6). Zależność długości odcinka czasu t_{nh} osiągnięcia przez koło granicznej wartości reakcji wzdłużnej $F_{x,max}$ jest szczególnie nieliniowa w zakresie wysokich wartości obciążenia normalnego koła. Tu widoczny jest udział podatności obwodowej opony, która poprzez sztywność obwodową c_o występującą w równaniu (13) może spowodować znaczne wydłużenie szacowanego czasu t_{nh} szczególnie w zakresie wysokich wartości reakcji wzdłużnej F_x , którym sprzyja występowanie wysokiej wartości obciążenia normalnego koła F_z .

Długości odcinka czasu narastania t_{nh} reakcji wzdłużnej F_x nie są znaczne. Wykazano jednak istotne wydłużenie czasu t_{nh} pod wpływem wzrostu obciążenia normalnego F_z koła. Takie wydłużenie powoduje wydłużenie odcinka czasu narastania siły hamowania t_n pojazdu. Może więc przyczyniać się do zwiększenia długości drogi zatrzymania pojazdu zgodnie z przedstawionym wcześniej równaniem (2).

3. Ocena wpływu masy pojazdu na długość drogi zatrzymania

Obciążenie normalne kół jezdnych pojazdu zmienia się wraz ze zmianą jego masy. Znaczne zmiany masy mogą dotyczyć szczególnie samochodów ciężarowych, gdy dopuszczalna ładowność może nawet dwukrotnie przekraczać masę własną pojazdu.

Wyniki badań eksperymentalnych ogumienia samochodu ciężarowego oraz wyniki obliczeń wykorzystano do symulacji procesu hamowania awaryjnego pojazdu ciężarowego o zmiennej masie. Oprócz wcześniej przedstawionych założeń, przed przygotowaniem aplikacji obliczeniowej przyjęto następujące założenia upraszczające:

- pojazd porusza się na 4 kołach o porównywalnych właściwościach,
- masa pojazdu rozkłada się równomiernie na poszczególne koła,
- kierowca rozpoczyna proces hamowania awaryjnego od chwili zauważenia zagrożenia $t=0$,
- na każde z kół działa moment hamowania M_h o jednakowej wartości maksymalnej, wynikającej z możliwości mechanizmu sterowania i hamowania,
- intensywność hamowania jest ograniczona współczynnikiem przyczepności poślizgowej μ_2 kół jezdnych do podłoża, o wartości określonej w chwili początku hamowania dla prędkości początkowej v_0 oraz w zależności od obciążenia normalnego każdego z kół (nie zmieniano jego wartości w trakcie hamowania w przyjętym uproszczonym modelu pojazdu),
- współczynnik przyczepności poślizgowej każdego z kół do podłoża jest taki sam, a wynika z ciężaru pojazdu oraz prędkości początkowej hamowania,
- promień dynamiczny każdego z kół jest taki sam,
- nie uwzględniono zmiany obciążenia normalnego osi jezdnych podczas hamowania,
- przyjęto typowe wartości czasu reakcji kierowcy oraz układu hamulcowego [20,4], jednak te jako stałe nie wpływają na obserwowane zjawiska.

Przygotowano arkusz kalkulacyjny umożliwiający wykonanie zaplanowanych obliczeń. Symulację procesu hamowania awaryjnego pojazdu wykonano na bazie równania (2) oraz danych do modelowania opisanych w rozdziale 2. Jednak przebieg zmian prędkości jazdy oraz przebytej drogi wyznaczano w trybie obliczeń iteracyjnych, wyznaczając w określonych

odstępach czasu wartości wielkości fizycznych charakteryzujących przebieg procesu hamowania, w tym:

- opóźnienia hamowania a_h ,
- prędkości jazdy v ,
- przebytej drogi s .

Zgodnie z założeniami, każdy zestaw wyników był uzyskany dla określonych wartości współczynnika przyczepności poślizgowej μ_2 kół pojazdu do podłoża, z uwzględnieniem masy pojazdu m oraz prędkości początkowej hamowania v_0 .

Obliczenia wykonano w następujących wariantach:

- początkowa prędkość jazdy $v_0=30, 60, 90 \text{ km/h}$,
- masa pojazdu $m=4000, 8000, 12000 \text{ kg}$ (odpowiednio masa własna pojazdu oraz masa częściowo i całkowicie załadowanego pojazdu ciężarowego do jego DMC),
- kąt nachylenia podłoża $\alpha=0^\circ$ (podłoże poziome).

Przykładowy zestaw wyników obliczeń przedstawiono na rysunku 7.

Dla celów prowadzonej analizy największe znaczenie ma dodatkowo wyznaczony przebieg zmian prędkości pojazdu v w funkcji przebytej drogi s , pokazany na rysunku 7.e.

Na przykładzie zestawienia wyników obliczeń pokazanych na rysunku 8 widać wyraźny wpływ zmiany masy pojazdu na wielkości charakteryzujące proces jego hamowania. Zgodnie z oczekiwaniami wyniki obliczeń pokazały, że wzrost masy pojazdu, a więc wzrost obciążenia normalnego każdego z kół wywołał:

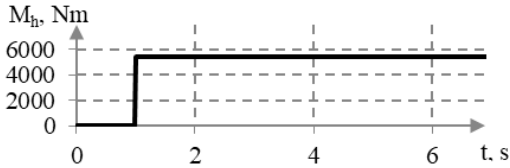
- przesunięcie w czasie początku fazy hamowania (Rys. 8.a),
- zmniejszenie intensywności hamowania pojazdu i wydłużenie czasu hamowania (Rys. 8.a, b),
- wydłużenie drogi zatrzymania pojazdu (Rys. 8.c).

Jednak najbardziej wymowny w skutkach wpływ zwiększenia masy pojazdu widać na rysunku 8.d. Przy nieznacznej początkowej prędkości jazdy ($v_0=60\text{km/h}$), wzrost masy pojazdu od masy własnej do masy z częściowym i pełnym obciążeniem ładunkiem spowodował wydłużenie drogi zatrzymania odpowiednio o ok. 4 m i 9 m. Takie wartości wydłużenia drogi zatrzymania są porównywalne odpowiednio z długością typowych pasów przejścia dla pieszych oraz połową długości typowego zestawu siodłowego.

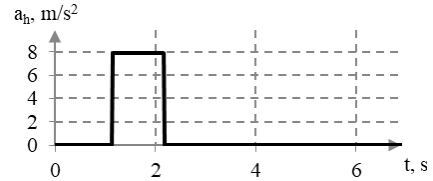
Jednak, z punktu widzenia bezpieczeństwa pojazdu oraz rekonstrukcji zdarzenia drogowego, istotne znaczenie ma zestawienie wyników na rysunku 8.d. Wyniki obliczeń pokazały, że w miejscu gdzie pojazd nieobciążony ($m=4000\text{kg}$)

zatrzymał się, prędkość pojazdu obciążonego w połowie ($m=8000\text{kg}$) wynosiła jeszcze około ponad 20 km/h, a prędkość pojazdu całkowicie obciążonego wynosiła ponad 30 km/h.

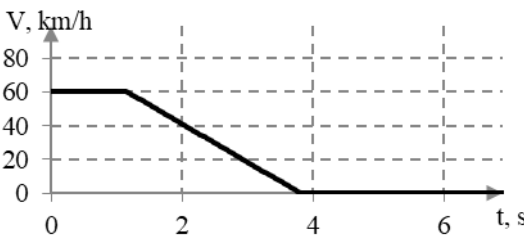
a) moment hamowania w kołach



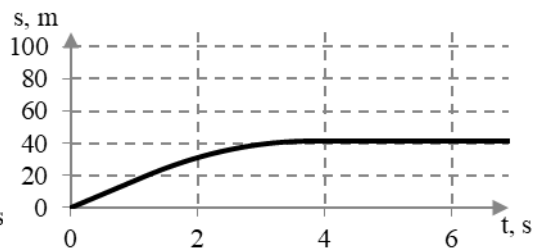
b) opóźnienie hamowania



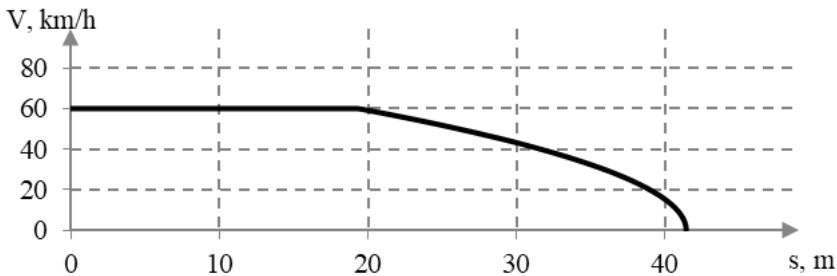
c) prędkość jazdy



d) przebyta droga



e) prędkość jazdy w funkcji przebytej drogi



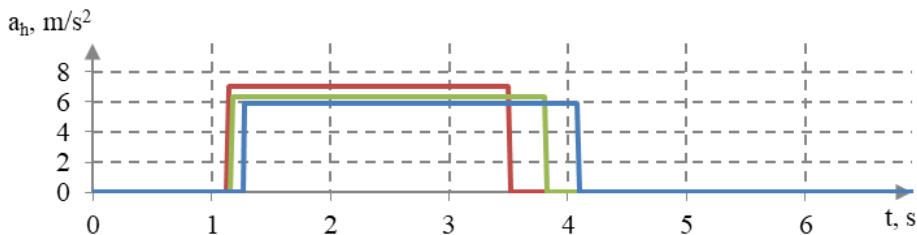
Rys. 7. Przykładowy zestaw wyników obliczeń wielkości fizycznych charakteryzujących proces hamowania awaryjnego pojazdu ($v_0=60 \text{ km/h}$, $m=8000 \text{ kg}$)

Mimo umiarkowanej początkowej prędkości jazdy, są to znaczne prędkości, których skutki w chwili uderzenia człowieka lub zderzenia pojazdu z dowolnym obiektem mogą być poważne.

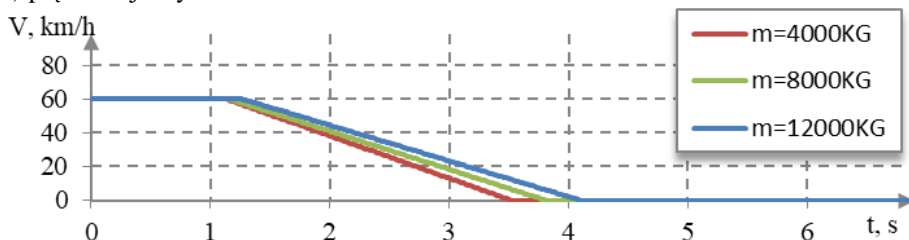
Badania wykazały nieznaczny wpływ zmiany masy pojazdu na czas rozpoczęcia procesu hamowania (Rys. 9). Zgodnie z wynikami obliczeń przedstawionymi na rysunku 6, czas narastania siły hamowania wydłużył się pod wpływem wzrostu masy pojazdu szczególnie w zakresie niskich wartości prędkości początkowej hamowania v_0 .

Natomiast wyraźny jest wpływ zmiany masy pojazdu na wartości opóźnienia hamowania, a tym samym na osiągnięte długości drogi hamowania i zatrzymania.

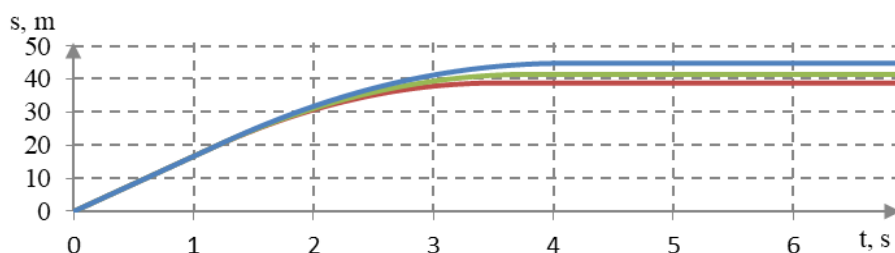
a) opóźnienie hamowania



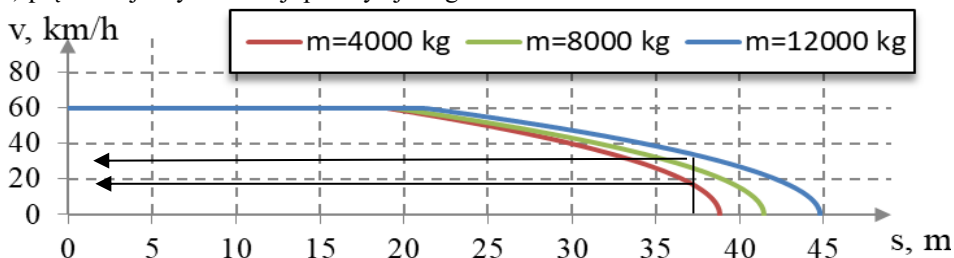
b) prędkość jazdy



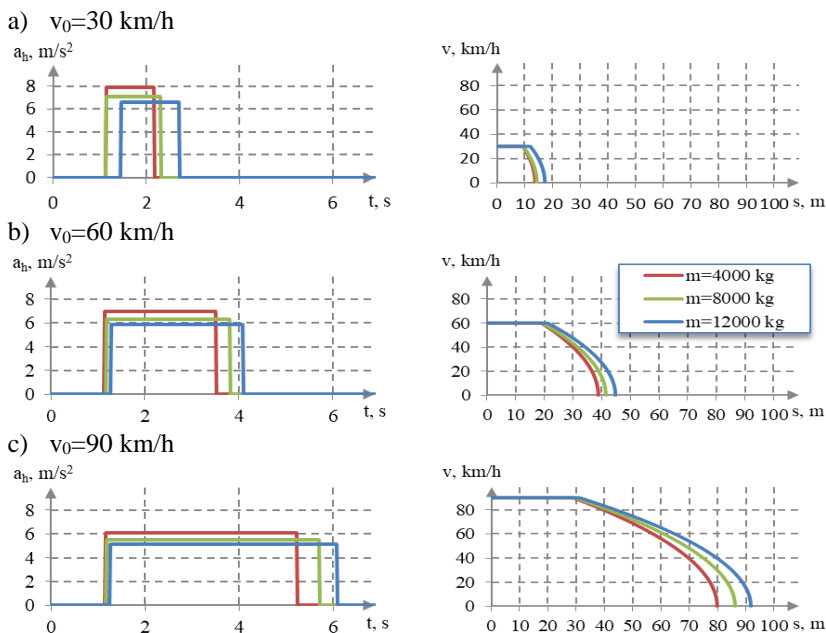
c) przebyta droga



d) prędkość jazdy w funkcji przebytej drogi



Rys. 8. Wpływ masy pojazdu na przebieg wielkości fizycznych charakteryzujących przebieg procesu hamowania awaryjnego ($v_0=60$ km/h)

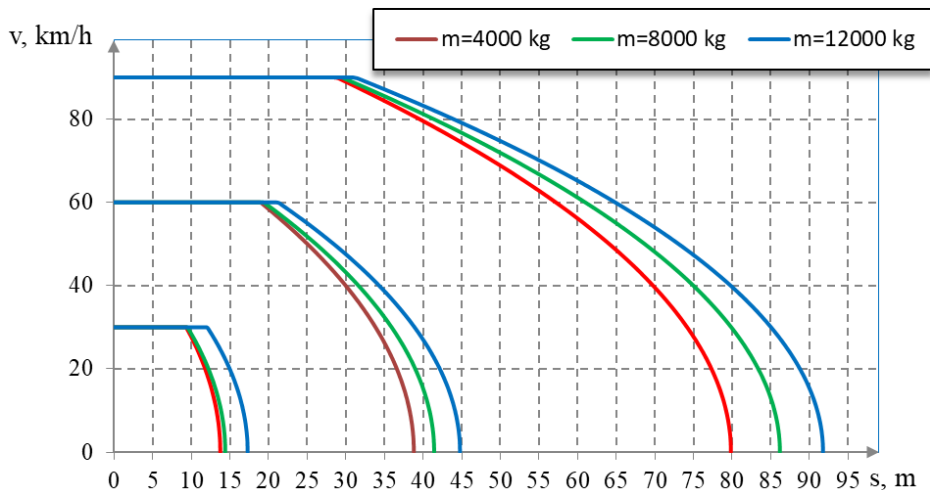


Rys. 9. Ocena wpływu masy pojazdu m na wielkości charakteryzujące proces hamowania awaryjnego przy różnych prędkościach początkowych hamowania

Zestawienie wpływu masy pojazdu na wynik hamowania awaryjnego w warunkach różnej prędkości początkowej hamowania v_0 pokazano na rysunku 10. Przy każdej prędkości początkowej hamowania wzrost masy pojazdu istotnie wydłuża drogę zatrzymania. Jednocześnie widać, że prędkość pojazdu całkowicie obciążonego ($m=12000$ kg) w miejscu gdzie pojazd nieobciążony ($m=4000$ kg) ulega zatrzymaniu może wynosić od około 25 km/h do nawet 40 km/h w zależności od prędkości początkowej hamowania.

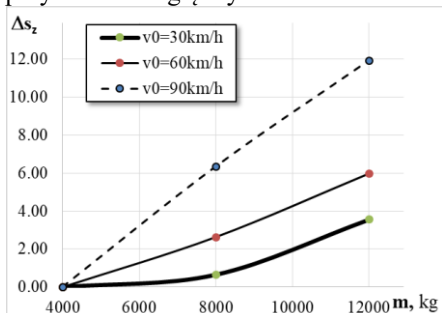
Na przykładzie uzyskanych wyników badań wykazano, że (Rys. 11):

- przyrost długości drogi zatrzymania pojazdu, na skutek wzrostu jego masy, jest największy w zakresie wysokich prędkości początkowej hamowania v_0 ,
- w ujęciu względnym, przyrost masy pojazdu od masy własnej do DMC może spowodować wydłużenie drogi zatrzymania pojazdu nawet o ponad 20%.

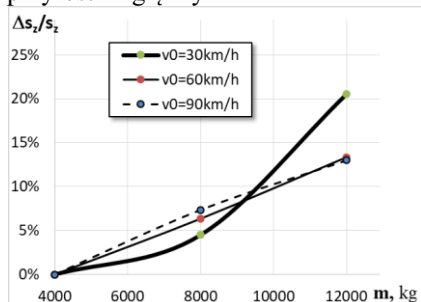


Rys. 10. Ocena wpływu masy pojazdu m długość drogi zatrzymania przy różnych prędkościach początkowych hamowania v_0

a) przyrost bezwzględny



b) przyrost względny



Rys. 11. Ilościowa ocena wpływu masy pojazdu m na przyrost drogi zatrzymania s_z w warunkach hamowania awaryjnego

4. Wnioski końcowe

Wykonane badania symulacyjne wykazały, że zwiększenie masy pojazdu może istotnie wydłużyć drogę zatrzymania awaryjnego pojazdu poprzez:

- zwłokę początku procesu hamowania,
- zmniejszenie intensywności hamowania.

Ponadto wykazano, że pojazd obciążony ładunkiem, może poruszać się ze znaczną prędkością w chwili gdy pojazd nieobciążony ulega zatrzymaniu. Są to istotne wnioski z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu pojazdu. Jednocześnie

wnioski te wskazują na konieczność uwzględniania tak istotnych zmian własności ogumienia w procesie analizy i rekonstrukcji zdarzenia drogowego.

Możliwa jest kontynuacja badań zarówno w części eksperymentalnej jak i modelowej. Pokazano, że u podstaw obserwowanych zjawisk zmian leżą ujawnione podczas badań eksperymentalnych własności koła ogumionego. Jednak w badaniach symulacyjnych przyjęto pewne założenia upraszczające, w tym uproszczony model tarcia zablokowanego koła względem podłoża, z ustaloną wartością współczynnika przyczepności w całym procesie hamowania. Spodziewany jest większy wpływ wzrostu masy pojazdu na wydłużenie jego drogi zatrzymania, gdy w badaniach zostaną uwzględnione:

- realne zmiany wartości współczynnika przyczepności poślizgowej koła do podłoża pod wpływem prędkości,
- obniżenie wartości współczynnika przyczepności koła do podłoża w znacznie wydłużonym czasie jego hamowania.

Te zagadnienia mogą stanowić główne kierunki dalszych badań.

Literatura

1. Andrzejewski R. Dynamika pneumatycznego koła jezdnego. WNT, 2010 Warszawa.
2. Arczynski S. Mechanika ruchu samochodu. Warszawa: WPW, 1984r.
3. Goudie D, Bowler J, Brown C, Heinrichs B. et al. Tire Friction During Locked Wheel Braking. 2000. SAE Technical Paper 2000-01-1314.
4. Jurecki R, Jaskiewicz M, Guzek M, Lozia Z, Zdanowicz P. Driver's reaction time under emergency braking a car – Research in a driving simulator. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (4): 295–301.
5. Kulikowski K, Szpica D. Determination of directional stiffnesses of vehicles' tires under a static load operation. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (1): 66–72.
6. Lawniczak S, Prochowski L. Analiza zmian predkosci katowej kola samochodu ciezarowego podczas hamowania *Zeszyty Instytutu Pojazdow/Politechnika Warszawska* 2001; z. 1/40: 83-92.
7. Luty W, Prochowski L. Analiza procesu narastania sily hamowania kola samochodu ciezarowego. *Zeszyty Instytutu Pojazdow/Politechnika Warszawska* 2001; 1(40): 9-24.

8. Luty W, Prochowski L. Modelowanie charakterystyk przyczepności ogumienia samochodów ciężarowych. *Zeszyty Instytutu Pojazdów/ Politechnika Warszawska* 2002; 1(44): 37-47.
9. Luty W. Analiza właściwości nowych konstrukcji ogumienia koł jezdnych samochodu ciężarowego średniej ładowności. Praca zbiorowa pt. Analiza wpływu ogumienia nowych konstrukcji na bezpieczeństwo samochodu w ruchu krzywoliniowym. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna, 2009; 7-18.
10. Luty W.: Badania eksperymentalne oraz opis analityczny właściwości ogumienia samochodów. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej* 2010; 1(77): 7-26.
11. Milliken W F, Milliken D L. *Race Car Vehicle Dynamics*, Warrendale 1995; SAE International.
12. Mitschke M. Teoria samochodu. Dynamika samochodu (Tom 1: Napęd i hamowanie). Warszawa 1987; WKŁ.
13. Parczewski K, Wnek H. Make use of the friction coefficient during braking the vehicle. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (2): 176-180.
14. Parczewski K. Effect of tyre inflation pressure on the vehicle dynamics during braking manoeuvre. *Eksploatacja i Niezawodność. Maintenance and Reliability* 2013; 15 (2): 134–139.
15. Prochowski L, Unarski J, Wach W, Wicher J. Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych. Warszawa 2008; WKŁ.
16. Prochowski L. *Pojazdy samochodowe. Mechanika ruchu*. Warszawa 2005; WKŁ.
17. Reed W. Keskin A. Vehicular Deceleration and Its Relationship to Friction. 1989. SAE Technical Paper 890736.
18. Sharizli A, et al. Simulation and Analysis on the Effect of Gross Vehicle Weight on Braking Distance of Heavy Vehicle, *Applied Mechanics and Materials* 2014, Vol. 564, pp. 77-82.
19. Warner C, Smith G, James M, Germane G. Friction Applications in Accident Reconstruction. 1983. SAE Technical Paper 830612.

20. Wiercinski J, Reza A, i inni. Wypadki drogowe. Krakow 2010;
Vademecum biegłego sadowego. Wydanie 2 uaktualnione, IES.