

Proces hamowania – aspekt prawny i techniczny w ujęciu symulacyjnym i analitycznym

Streszczenie

Hamowanie jest jednym z najczęściej wykonywanych manewrów w ruchu drogowym. W praktyce opiniowania bardzo często zachodzi konieczność analizy procesu hamowania w oparciu o utrwalone na miejscu zdarzenia ślady, które świadczą o tym iż właśnie taki manewr obronny wykonał kierujący reagując na stan zagrożenia. Do analizy procesu hamowania wykorzystywane są modele fizyczne o zróżnicowanym stopniu złożoności. Od najprostszych – stosowanych w obliczeniach analitycznych, do złożonych – stosowanych w programach symulacyjnych. W referacie omówiono aspekt prawny i techniczny odnoszący się do procesu hamowania. W części dotyczącej regulacji prawnych przypomniano kodeksowe wymogi stawiane układom hamulcowym. W części dotyczącej zagadnień technicznych omówiono modele fizyczne stosowane do analizy procesów hamowania. Szczególną uwagę zwrócono na interpretację uzyskanych wyników obliczeniowych.

1. Wstęp

W ostatnim czasie przedstawiciele towarzystw ubezpieczeniowych oraz biegli, zajmujący się problematyką wypadków drogowych, zwracają się z prośbą o wyjaśnienie zagadnień związanych z modelowaniem procesu hamowania w programie V-Sim. Wynika to z faktu, iż stają oni przed problemem odniesienia się do wyników obliczeń przeprowadzonych metodami analitycznymi. Na przykład wyznaczona metodami analitycznymi prędkość początkowa przy znanej długości śladów blokowania kół w wielu przypadkach nie odpowiada prędkości początkowej wyznaczonej dla takiej samej długości śladów hamowania wygenerowanych w programie V-Sim. Problem jest tym bardziej złożony, że w programie V-Sim istnieją trzy odrębne modele sterowania układem hamulcowym, co przy niepełnej wiedzy użytkownika na temat zastosowanych modeli może prowadzić do nieprawidłowej interpretacji otrzymanych wyników. Ponadto na uzyskane wyniki obliczeń istotny wpływ może mieć dokładność oszacowania zbioru danych wielkości wejściowych [4]. Nakładanie się ograniczeń zastosowanej metody obliczeniowej z niedokładnością oszacowania wielkości wejściowych może prowadzić do znacznych różnic w otrzymanych wynikach.

2. Proces hamowania w świetle obowiązujących przepisów

2.1. Przepisy międzynarodowe

W ujęciu międzynarodowym kwestie techniczne dotyczące wymagań stawianych układom hamulcowym i ich elementom składowym regulują jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów stanowione przez Europejską Komisję Gospodarczą Organizacji Narodów Zjednoczonych. Wspomniane wyżej wymagania opisano w regulaminach:

- Regulamin EKG ONZ nr 13 - *Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów kategorii M, N oraz O w zakresie hamowania.*
- Regulamin EKG ONZ nr 13H - *Jednolite przepisy dotyczące homologacji samochodów osobowych w zakresie hamowania.*
- Regulamin EKG ONZ nr 78 - *Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów kategorii L w zakresie hamowania.*
- Regulamin EKG ONZ nr 90 - *Jednolite warunki homologacji zamiennych zespołów okładzin ciernych do hamulców oraz okładzin ciernych do hamulców bębnowych do pojazdów o napędzie silnikowym i przyczep.*

Wszystkie wymagania stawiane układom hamulcowym odnoszą się do pojazdów zakwalifikowanych do odpowiedniej kategorii. Zgodnie z międzynarodową klasyfikacją rozróżnia się następujące kategorie pojazdów samochodowych i ich przyczep:

- **Kategoria M:** pojazdy samochodowe mające co najmniej cztery koła oraz zaprojektowane i wykonane do przewozu osób, w tym:
 - kategoria **M₁**: pojazdy zaprojektowane i wykonane do przewozu osób mające nie więcej niż osiem miejsc oprócz siedzenia kierowcy;
 - kategoria **M₂**: pojazdy zaprojektowane i wykonane do przewozu osób mające więcej niż osiem miejsc oprócz siedzenia kierowcy i mające maksymalną masę nieprzekraczającą 5 ton;
 - kategoria **M₃**: pojazdy zaprojektowane i wykonane do przewozu osób mające więcej niż osiem miejsc oprócz siedzenia kierowcy i mające maksymalną masę przekraczającą 5 ton.

Do kategorii **M₂** lub **M₃** należy także "autobus przegubowy".

- **Kategoria N:** pojazdy samochodowe mające co najmniej cztery koła oraz zaprojektowane i wykonane do przewozu ładunków, w tym:
 - kategoria **N₁**: pojazdy zaprojektowane i wykonane do przewozu ładunków mające maksymalną masę nieprzekraczającą 3,5 tony;
 - kategoria **N₂**: pojazdy zaprojektowane i wykonane do przewozu ładunków mające maksymalną masę przekraczającą 3,5 tony, ale nieprzekraczającą 12 ton;
 - kategoria **N₃**: pojazdy zaprojektowane i wykonane do przewozu ładunków mające maksymalną masę przekraczającą 12 ton.
- **Kategoria O:** przyczepy (z włączeniem naczep), w tym:
 - kategoria **O₁**: przyczepy o maksymalnej masie nieprzekraczającej 0,75 tony;
 - kategoria **O₂**: przyczepy o maksymalnej masie przekraczającej 0,75 tony, ale nieprzekraczającej 3,5 tony;
 - kategoria **O₃**: przyczepy o maksymalnej masie przekraczającej 3,5 tony, ale nieprzekraczającej 10 ton;
 - kategoria **O₄**: przyczepy o maksymalnej masie przekraczającej 10 ton.

W klasyfikacji kategorii pojazdów samochodowych wyróżniono ponadto pojazdy terenowe przyjmując oznaczenie literowe **G**. Są to pojazdy kategorii **M** i **N** charakteryzujące się cechami konstrukcyjnymi umożliwiającymi jazdę w trudnych warunkach terenowych (odpowiednio duże kąty natarcia i zejścia, blokady mechanizmów różnicowych, zdolność pokonywania wzniesień o dużym nachyleniu, itd.).

Dla każdej z podanych powyżej kategorii określono: sposób przeprowadzenia badań, warunki badań oraz minimalne wymagania dotyczące osiągow układu hamulcowego, które musi spełnić badany pojazd zakwalifikowany do określonej kategorii i grupy.

W Polsce przepisy dotyczące homologacji pojazdów w zakresie badań układów hamulcowych są równoważne przepisom międzynarodowym.

Poniżej przytoczono najistotniejsze parametry określone w regulaminach EKG ONZ dotyczące badań i wymagań stawianych układom hamulcowym pojazdów samochodowych kategorii M i N:

Osiągi układu hamulcowego są określone poprzez pomiar drogi zatrzymania pojazdu z określonej prędkości początkowej i/lub wartości średniego pełnego opóźnienia, uzyskanego podczas badań.

Droga zatrzymania jest odległością przebytą przez pojazd od chwili, kiedy kierowca rozpoczyna uruchamiać sterowanie układu hamulcowego do chwili zatrzymania pojazdu; **początkowa prędkość** pojazdu (v_1) jest prędkością w chwili, kiedy kierowca rozpoczyna uruchamiać sterowanie układu hamulcowego; początkowa prędkość pojazdu jest nie mniejsza niż 98% prędkości zalecanej dla danego badania. **Średnie pełne opóźnienie** a_m jest obliczane jako uśrednione zmniejszenie prędkości w odniesieniu do odległości na odcinku od v_b do v_e zgodnie z następującym wzorem:

$$a_m = \frac{v_b^2 - v_e^2}{25,92 \cdot (s_e - s_b)} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (1)$$

gdzie:

v_b - prędkość pojazdu odpowiadająca $0,8 v_1$ w km/h;

v_e - prędkość pojazdu odpowiadająca $0,1 v_1$ w km/h;

s_b - odległość przebyta między v_1 i v_b w metrach;

s_e - odległość przebyta między v_1 i v_e w metrach.

Dla pojazdów silnikowych kategorii M i N regulamin przewiduje trzy typy badań:

- **Badanie typu 0** - badanie osiągow przy zimnych hamulcach. Za hamulce zimne uznaje się hamulce, których temperatura mierzona na tarczy lub na zewnątrz bębna wynosi poniżej 100 °C. Próby wykonuje się dla dwóch wariantów z dołączonym i odłączonym silnikiem.
- **Badanie typu I** (badanie zaniku) – sprowadza się do sprawdzenia osiągow roboczego układu hamulcowego (w warunkach jak dla badań typu 0) po rozgrzaniu hamulców poprzez cykliczne hamowanie. Liczba cykli i czas trwania cyklu zależy od kategorii pojazdu i zawiera się w zakresie 15÷20 dla liczby cykli i 45÷60 s dla czasu trwania cyklu. Dla pojazdów silnikowych, osiągi dla hamulców gorących nie powinny być mniejsze niż 80% zalecanych dla hamulców zimnych, ani nie mniejsze niż 60% wartości odnotowanych w badaniu typu 0 przy odłączonym silniku.
- **Badanie typu II** - zachowanie przy zjeżdżaniu z pochyłości. Sprowadza się do sprawdzenia osiągow roboczego układu hamulcowego (w warunkach jak dla badań typu 0) po rozgrzaniu hamulców na skutek długotrwałego utrzymywania prędkości 30 km/h, na drodze o pochyleniu 6% i długości 6 km z włączonym stosownym przełożeniem i z używanym zwalniaczem, jeżeli pojazd jest w taki wyposażony.

Wymagane wartości drogi zatrzymania i średniego pełnego opóźnienia dla podstawowego badania typu 0 zestawiono w tabeli 1.

Skuteczność hamulca awaryjnego powinna być taka (nawet jeżeli sterowanie układu hamulca awaryjnego używane jest również do innej funkcji), żeby uzyskać drogę hamowania nie dłuższą i średnie pełne opóźnienie nie niższe, od wartości podanych w tabeli 2.

Tabela 1. Wymagane warunki i wskaźniki dla badań typu 0 pojazdów kategorii. M i N

Kategoria pojazdu		M ₁	M ₂	M ₃	N ₁	N ₂	N ₃
Typ badań		0-I	0-I	0-I-II	0-I	0-I	0-I-II
Badania typu 0 z odłączonym silnikiem	v	80 km/h	60 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	60 km/h
	$S \leq$	$0,1v + \frac{v^2}{150}$	$0,15v + \frac{v^2}{130}$				
	$a_m \geq$	5,8 m/s ²	5,0 m/s ²				
Badania typu 0 z dołączonym silnikiem	$v=80\%v_{max}$ ale nie przekracza	160 km/h	100 km/h	90 km/h	120 km/h	100 km/h	90 km/h
	$S \leq$	$0,1v + \frac{v^2}{150}$	$0,15v + \frac{v^2}{103,5}$				
	$a_m \geq$	5,0 m/s ²	4,0 m/s ²				
Siła na pedale hamulca	$f \leq$	50 daN	70 daN				

Tabela 2. Wymagane warunki i wskaźniki dla badań hamulca awaryjnego

Kategoria pojazdu		M ₁	M ₂	M ₃	N ₁	N ₂	N ₃
Warunki jak dla badań typu 0 z odłączonym silnikiem	v	80 km/h	60 km/h	60 km/h	70 km/h	50 km/h	40 km/h
	$S \leq$	$0,1v + \frac{2 \cdot v^2}{150}$	$0,15v + \frac{2 \cdot v^2}{130}$	$0,15v + \frac{2 \cdot v^2}{115}$			
	$a_m \geq$	2,9 m/s ²	2,5 m/s ²	2,2 m/s ²			
Siła na dźwigni lub pedale hamulca	$f_d \leq$	40 daN	60 daN				
	$f_p \leq$	50 daN	70 daN				

Hamulec postojowy powinien utrzymać pojazd obciążony na pochyłości 18%, a w pojazdach przystosowanych do ciągnięcia przyczep — powinien utrzymać zespół na pochyłości 12%.

Szczątkowa skuteczność hamowania roboczego układu hamulcowego w przypadku uszkodzenia części jego układu przenoszenia powinna zapewnić drogę zatrzymania oraz średnie pełne opóźnienie nie mniejsze niż wartości podane w tabeli 3. Równocześnie siła uruchamiająca nie powinna przekroczyć wartości 70 daN. Podane wymagania dotyczą prób typu 0.

Tabela 3. Droga zatrzymania i średnie pełne opóźnienia wymagane w przypadku uszkodzenia części układu przenoszenia

Kategoria	km/h	Obciążony	m/s ²	Nieobciążony	m/s ²
M ₁	80	$0,1v + \frac{100}{30} \cdot \frac{v^2}{150}$	1,7	$0,1v + \frac{100}{25} \cdot \frac{v^2}{150}$	1,5
M ₂	60	$0,15v + \frac{100}{30} \cdot \frac{v^2}{130}$	1,5	$0,15v + \frac{100}{25} \cdot \frac{v^2}{130}$	1,3
M ₃	60	$0,15v + \frac{100}{30} \cdot \frac{v^2}{130}$	1,5	$0,15v + \frac{100}{30} \cdot \frac{v^2}{150}$	1,5
N ₁	70	$0,15v + \frac{100}{30} \cdot \frac{v^2}{115}$	1,3	$0,15v + \frac{100}{25} \cdot \frac{v^2}{115}$	1,1
N ₂	50	$0,15v + \frac{100}{30} \cdot \frac{v^2}{115}$	1,3	$0,15v + \frac{100}{25} \cdot \frac{v^2}{115}$	1,1
N ₃	40	$0,15v + \frac{100}{30} \cdot \frac{v^2}{115}$	1,3	$0,15v + \frac{100}{30} \cdot \frac{v^2}{115}$	1,3

Rozdział sił hamowania między osie

Dla wszystkich stanów obciążenia pojazdu, krzywa przyczepności osi przedniej jest położona powyżej odpowiedniej krzywej dla osi tylnej:

Dla pojazdów kategorii M₁ w pierwszej kolejności powinny być blokowane koła osi przedniej do współczynnika przyczepności $\mu=0,8$ (możliwe jest odwrócenie kolejności blokowania osi w zakresie μ 0,3÷0,45 przy odpowiednim działaniu korektora sił hamowania).

Dla pojazdów kategorii N₁ w pierwszej kolejności powinny być blokowane koła osi przedniej do współczynnika przyczepności $\mu=0,5$ (możliwe jest odwrócenie kolejności blokowania osi w zakresie μ 0,15÷0,3 przy odpowiednim działaniu korektora sił hamowania). Pojazdy kategorii N₁ ze wskaźnikiem obciążenia osi tylnej nie przekraczającym 1,5 lub o masie całkowitej nie większej niż 2 tony powinny spełniać wymagania dla kategorii pojazdów M₁.

Dla pojazdów innych kategorii w pierwszej kolejności powinny być blokowane koła osi przedniej do współczynnika przyczepności $\mu=0,3$ (możliwe jest odwrócenie kolejności blokowania osi w zakresie μ 0,15÷0,3 przy odpowiednim działaniu korektora sił hamowania).

Układy przeciwblokujące

Hamulce z urządzeniami przeciwpoślizgowymi powinny pozwolić na wykorzystanie nie mniej niż 0,75 współczynnika przyczepności opon do jezdni.

2.2. Przepisy krajowe

Wymagania stawiane układom hamulcowym pojazdów eksploatowanych na terenie Polski oraz sposób przeprowadzenia badań tych pojazdów określone są w aktach wykonawczych:

- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia (Dz. U. z dnia 26 lutego 2003 r.)
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 grudnia 2003 r. w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach (Dz. U. z dnia 30 grudnia 2003 r.)

Poniżej przytoczono wymagania dotyczące pojazdów kategorii M i N.

Skuteczność hamowania uznaje się za odpowiednią, jeżeli wskaźnik skuteczności hamowania zmierzony (lub obliczony) na podstawie pomiaru sił hamowania lub opóźnienia hamowania jest nie mniejszy niż podany w tabeli 4. Przy czym za wymagany wskaźnik skuteczności hamowania hamulcem postojowym przyjmuje się wartość pochylenia: 16% w przypadku obciążonego pojazdu i 8% w przypadku obciążonego zespołu pojazdów.

Zmierzona (lub obliczona) siła hamowania jest nie mniejsza niż wymagana, określona na podstawie danych technicznych pojazdu i na podstawie wymaganego wskaźnika skuteczności hamowania.

Zmierzone siły hamowania kół po obu stronach osi pojazdu nie różnią się więcej niż o 30%, przyjmując za 100% siłę większą (nie dotyczy hamulca awaryjnego i postojowego).

Zmierzone opóźnienie hamowania jest nie mniejsze od wymaganego, określonego na podstawie wskaźnika skuteczności hamowania oraz jeżeli nie nastąpiła zmiana położenia osi kierunku poruszania się pojazdu podczas hamowania o więcej niż 0,5m względem kierunku początkowego (przy niekorygowanym kierownicą torze jazdy).

Tabela 4. Wskaźniki skuteczności hamowania

Pojazd	Przy użyciu hamulca	Wartość wskaźnika w % dla pojazdu zarejestrowanego po raz pierwszy:		
		Do 31.12.1993	Od 01.01.1994 do 30.06.1999	Od 01.07.1999
Samochód osobowy, karetka sanitarna pogotowia ratunkowego	roboczego	50	50	50
	awaryjnego	23	25	25
Autobus	roboczego	45	45	50
	awaryjnego	19	22	25
Samochód ciężarowy o dopuszczalnej masie całkowitej do 3,5 t	roboczego	40	40	45
	awaryjnego	17	20	22
Samochód ciężarowy o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3,5 t	roboczego	40	40	43
	awaryjnego	17	20	22
Pojazd samochodowy inny niż wymienione	roboczego	40	40	40
	awaryjnego	17	20	20

Wskaźnik skuteczności hamowania, określony na podstawie zmierzonej siły hamowania, oblicza się według wzoru:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^k X_i}{m_C} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

- z - wskaźnik skuteczności hamowania;
- i - wskaźnik hamowanego koła pojazdu;
- k - liczba kół hamowanych;
- X_i - siła hamująca i -tego koła;
- m_C - masa odpowiadająca dopuszczalnej masie całkowitej pojazdu.

Wskaźnik skuteczności hamowania określony na podstawie zmierzonego opóźnienia hamowania oblicza się według wzoru:

$$z = \frac{a_h}{g} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

- a_h - zmierzone opóźnienie hamowania (średnie pełne opóźnienie hamowania),
- g - przyspieszenie ziemskie (do obliczeń przyjmuje się wartość 10 m/s^2).

Wymagane wskaźniki skuteczności hamowania powinny być uzyskane przy sile wywieranej na pedał lub dźwignię hamulca nieprzekraczającej:

- w przypadku samochodów osobowych (kat. M_1) – 50 daN dla hamulca roboczego (hamulec nożny), 40 daN dla hamulca awaryjnego i postojowego (hamulec ręczny);
- w przypadku pozostałych pojazdów kategorii M, N – 70 daN dla hamulca roboczego (hamulec nożny), 60 daN dla hamulca awaryjnego i postojowego (hamulec ręczny).

3. Obliczenia analityczne

W obliczeniach analitycznych, z uwagi na złożoność zachodzących w procesie hamowania zjawisk fizycznych powszechnie stosowane są modele o znacznym stopniu uproszczenia. Dotyczy to zarówno modelu pojazdu, jak i modelu współpracy koła ogumionego z nawierzchnią drogi. Jednym z najczęściej stosowanych modeli obliczeniowych jest model pojazdu o jednym stopniu swobody (przemieszczenie wzdłużne). Rozważa się prostoliniowy ruch pojazdu przy następujących założeniach:

- nawierzchnia jezdni jest pozioma, gładka i nieodkształcalna,
- nie uwzględnia się przechyłu wzdłużnego,
- naciski kół lewej i prawej strony pojazdu są symetryczne,
- pomija się siłę oporu aerodynamicznego, siły oporów toczenia i bezwładności mas wirujących.

Przy uwzględnieniu powyższych założeń siły działające na pojazd podczas prostoliniowego hamowania przedstawiono na rys. 1.

Kierunki działania wszystkich sił stycznych są wówczas równoległe i zgodne z kierunkiem ruchu pojazdu. Wypadkowa siła styczna będzie równa sumie wszystkich sił stycznych:

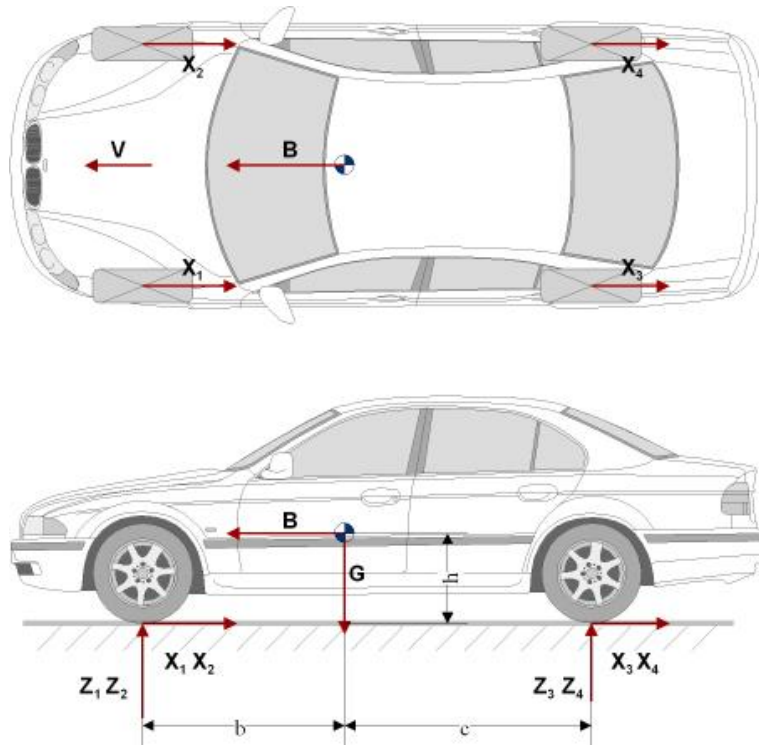
$$\vec{X} = \vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3 + \vec{X}_4 \quad (4)$$

Podczas hamowania prostoliniowego kierunek i zwrot siły bezwładności jest zgodny z kierunkiem wektora prędkości pojazdu, a jej wartość określona jest zależnością:

$$\vec{B} = m \cdot \vec{a}_h \quad (5)$$

gdzie:

- m – masa samochodu,
- $a_h = -\frac{dv}{dt}$ – opóźnienie hamowania.



Rys. 1. Siły działające na pojazd podczas hamowania

Na drodze poziomej, przy pominięciu innych oporów zewnętrznych (opór aerodynamiczny, toczenia, bezwładności mas wirujących), których wpływ jest niewielki przy intensywnym hamowaniu, pomiędzy wypadkową sił stycznych X a siłą bezwładności B zachodzi zależność:

$$\vec{X} \cong -\vec{B} \quad (6)$$

Jeżeli podczas hamowania dochodzi do pełnego wykorzystania przyczepności na wszystkich kołach pojazdu, to wartość wypadkowej siły hamującej można wyrazić następująco:

$$X_{\max} = \mu_s \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) = \mu_s \cdot G = \mu_s \cdot m \cdot g \quad (7)$$

Porównując zależności (5), (6) i (7) otrzymuje się:

$$a_{h,\max} = \mu_s \cdot g \quad (8)$$

Zatem największa wartość opóźnienia, jaką można osiągnąć podczas hamowania zależy od wartości współczynnika przyczepności opon do nawierzchni jezdni.

3.1. Rozdział momentu hamującego na osie pojazdu [8]

W rzeczywistości, wskutek specyfiki konstrukcji układów hamulcowych konwencjonalnych pojazdów, przeważnie nie dochodzi do pełnego wykorzystania przyczepności równocześnie na wszystkich kołach pojazdu. Na to, aby dla każdego koła można było w pełni wykorzystać przyczepność, mechanizmy hamulcowe kół

poszczególnych osi musiałyby każdorazowo wytwarzać różne, co do wartości, momenty hamujące, proporcjonalnie do zmiany nacisku pionowego wywołanego opóźnieniem osiąganym podczas hamowania. Samochody osobowe wyposażone w konwencjonalny układ hamulcowy wraz z korektorem sił hamowania na osi tylnej charakteryzują się stałym, charakterystycznym dla danego modelu pojazdu, rozkładem momentu hamującego na poszczególne osie w zakresie umiarkowanych intensywności hamowania, oraz korekcją sił hamowania kół osi tylnej po przekroczeniu granicznej wartości kryterium, wg którego działa dany korektor np. ciśnienia płynu hamulcowego, ugięcia zawieszenia, opóźnienia czy nacisków pionowych na osiach.

Wskaźnikiem charakteryzującym rozkład momentu hamującego na osie pojazdu jest tzw. współczynnik rozdziału sił hamowania zdefiniowany następująco:

$$\varphi = \frac{X_p}{X_p + X_t} \quad (8)$$

gdzie:

X_p – siła hamowania na kołach osi przedniej,
 X_t – siła hamowania na kołach osi tylnej.

Staość rozkładu momentu hamującego oznacza, że podczas hamowania nie jest możliwa zmiana proporcji pomiędzy wartościami momentu hamującego kół osi przedniej i tylnej. Zmieniając wielkość nacisku na pedał hamulca kierowca może zmienić wartość sumarycznego momentu hamującego pojazd, ale stosunek wartości momentu hamującego osi przedniej do momentu hamującego osi tylnej pozostaje stały, bez względu na wartość występującego opóźnienia. Rezultatem tego faktu jest to, że dla określonego pojazdu przy danym stanie jego obciążenia istnieje tylko jedna wartość opóźnienia $a = a_{gr}$, przy której nastąpić może równoczesne pełne wykorzystanie przyczepności na wszystkich kołach pojazdu. Dla każdej innej wartości opóźnienia, różnej od a_{gr} , pełne wykorzystanie przyczepności osiąga się tylko na kołach jednej osi, podczas gdy pozostałe koła są niedohamowane. Pojazdy, dla których wartość współczynnika rozdziału sił hamowania φ nie jest stała podczas hamowania to:

- motocykle, w których hamulec każdego koła jest sterowany indywidualnie,
- samochody wyposażone w układy optymalnopoślizgowe ABS,
- samochody mające w układzie hamulcowym korektory bądź ograniczniki sił hamowania.

Analityczne określenie wartości opóźnień osiąganych przez takie pojazdy, w różnych warunkach ruchowych, jest w praktyce znacznie utrudnione, m.in. ze względu na trudności w zgromadzeniu odpowiednich danych konstrukcyjnych.

W praktyce wskazane jest jako podstawowy parametr charakteryzujący przebieg hamowania pojazdu przyjmować nie współczynnik przyczepności μ , ale osiąganę przez pojazd opóźnienie a_h . Wartość tego opóźnienia zależy od współczynnika przyczepności i parametrów konstrukcyjnych pojazdu.

Wartość granicznego współczynnika przyczepności, przy którym możliwe jest pełne wykorzystanie przyczepności przyłgowej, dla samochodu o stałym rozdziale momentu hamującego wyraża się zależnością:

$$\mu_{gr} = \frac{\varphi - \frac{c}{h}}{\frac{l}{h}} \quad (9)$$

gdzie:

- φ - współczynnik rozdziału momentu hamującego,
- c - odległość środka masy od osi tylnej,
- h - wysokość położenia środka masy nad płaszczyzną jezdni,
- l - rozstaw osi pojazdu.

Wyliczoną ze wzoru wartość μ_{gr} należy porównać z wartością współczynnika przyczepności przyłgowej μ_p , którą to wartość, dla czasu i miejsca wypadku, należy określić doświadczalnie lub przyjąć orientacyjnie, kierując się doświadczeniem i wskazówkami zawartymi w literaturze.

Mogą zachodzić dwa przypadki:

- $\mu_{gr} > \mu_p$ - co może wystąpić dla jezdni o małym współczynniku przyczepności,
- $\mu_{gr} < \mu_p$ - co może wystąpić na jezdniach o dużym współczynniku przyczepności.

W pierwszym przypadku pojazd najpierw wykorzystuje przyczepność na kołach osi przedniej i te koła w pierwszym rzędzie będą znaczyć ślady hamowania. W drugim przypadku sytuacja jest odwrotna, a więc ujawnione ślady pochodzić będą najprawdopodobniej od kół osi tylnej.

Dla przypadku pełnego wykorzystania przyczepności kół osi przedniej ($\mu_{gr} > \mu_p$) opóźnienie hamowania na drodze poziomej dane jest wzorem:

$$a_h = g \frac{\mu_p \frac{c}{l}}{\varphi - \mu_p \frac{h}{l}} \quad (10)$$

gdzie:

- g - przyspieszenie ziemskie,
- μ_p - współczynnik przyczepności przyłgowej.

Dla przypadku pełnego wykorzystania przyczepności kół osi tylnej ($\mu_{gr} < \mu_p$), opóźnienie osiągnięte na drodze poziomej wyznacza się ze wzoru:

$$a_h = g \frac{\mu_p \frac{b}{l}}{(1-\varphi) + \mu_p \frac{h}{l}} \quad (11)$$

Stosowana powszechnie w praktyce przez biegłych metoda określania intensywności hamowania za pomocą współczynnika przyczepności μ , zakładająca osiągnięcie przez pojazd opóźnienia $a_h = \mu_p \cdot g$, jest jedynie wyidealizowanym przybliżeniem rzeczywistości. Przybliżenie to jest dostatecznie bliskie rzeczywistości jedynie w następujących przypadkach:

1. gdy stwierdzone na miejscu wypadku ślady hamowania wykazują, że wszystkie koła pojazdu uległy zablokowaniu, wtedy jednak do iloczynu $\mu_p \cdot g$ należy wstawiać ślizgową wartość współczynnika przyczepności μ_s .
2. gdy ma się do czynienia z pojazdem wyposażonym w urządzenie optymalno-poślizgowe (ABS). Wtedy do iloczynu $\mu_p \cdot g$ wstawić należy przyłgową wartość współczynnika przyczepności.

3.2. Długość drogi hamowania i zatrzymania

Droga hamowania to odległość, jaką przebywa samochód w czasie hamowania, natomiast drogą zatrzymania nazywa się odległość, którą przejedzie samochód od chwili zauważenia przez kierowcę przeszkody wywołującej konieczność hamowania do zatrzymania samochodu [9].

Od chwili zauważenia przez kierowcę przeszkody wywołującej konieczność hamowania do chwili zatrzymania samochodu upłynąć musi pewien okres czasu, który składa się z [8]:

- czasu reakcji psychofizycznej kierowcy t_r . Przy analizach wypadków drogowych przyjmuje się powszechnie, że przeciętna wartość tego czasu jest rzędu $0,8 \div 1,0$ s, co w przeważającej liczbie wypadków jest dostatecznie bliskie rzeczywistości. Należy jednak pamiętać, że czas ten w niektórych przypadkach może dość znacznie odbiegać od wartości przeciętnej, i może się wahać w granicach $0,4 \div 1,5$ s [9].
- czasu zwłoki zadziałania hamulców t_a . Czas ten jest potrzebny na przepływ czynnika roboczego (płyn hydrauliczny, powietrze) do siłowników uruchamiających mechanizmy hamulcowe, skasowanie luzów w tych mechanizmach i wywarcie nacisku na elementy cierne. W literaturze napotyka się na bardzo duży rozrzut wartości czasu zadziałania układów hamulcowych (por. tabela 5).
- czasu narastania opóźnienia t_n . Można z dużym przybliżeniem przyjąć, że narastanie opóźnienia ma przebieg liniowy, tzn. prędkość narastania opóźnienia jest stała. Prędkość ta zależy przede wszystkim od prędkości narostu siły, z jaką kierowca działa na pedał hamulca. Przy gwałtownym, emocjonalnym hamowaniu, z jakim zazwyczaj mamy do czynienia w kolizyjnych sytuacjach drogowych, czas narastania opóźnienia waha się w granicach $t_n = 0,35 \div 0,40$ s.
- czasu hamowania właściwego t_h . Czas tego hamowania zależy od prędkości początkowej hamowania v_0 oraz uzyskiwanego przez samochód opóźnienia a_h .

Tabela 5. Czas zadziałania hamulców wg danych literaturowych [8]

Źródło	Czas zadziałania hamulców t_a [s]	
	Układ uruchamiania	
	hydrauliczny	pneumatyczny
S. Arczyński	0,3	0,5
J. Lanzendoerfer	$0,05 \div 0,40$	$0,1 \div 0,5$
K. Studziński	$0,02 \div 0,05$	$0,2 \div 0,5$
Badania IES	$0,12 \div 0,30$	-
T. Wrzesiński	$0,1 \div 0,3$	

Jeżeli przyjąć przebieg opóźnienia hamowania z liniowym narostem (patrz rys. 2.), droga hamowania do prędkości końcowej może być wyrażona wzorem:

$$S_h = S_r + S_n + S_h = v_0 \cdot \left(t_r + t_a + \frac{t_n}{2} \right) + \frac{v_0^2 - v_k^2}{2 \cdot a_h} - \frac{a_h \cdot t_n^2}{24} \quad (12)$$

natomiast czas hamowania do prędkości końcowej może być wyznaczony z zależności:

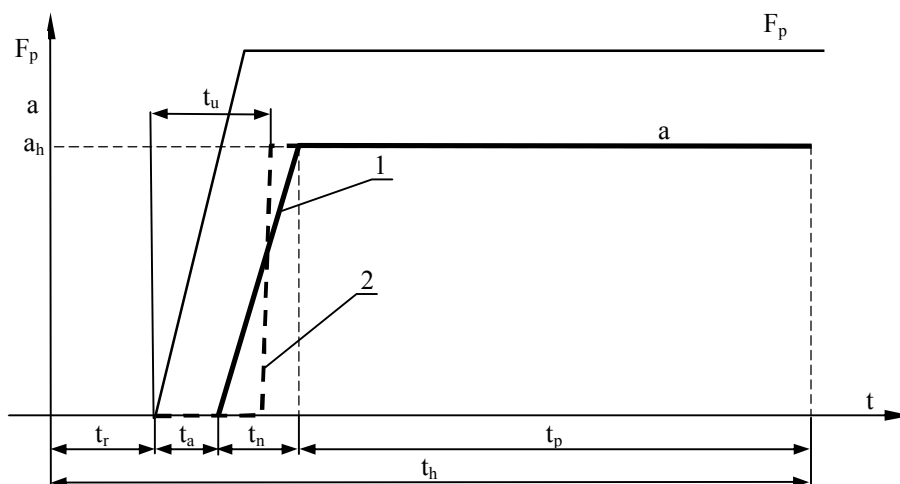
$$t = t_r + t_a + \frac{t_n}{2} + \frac{v_0 - v_k}{a_h} \quad (13)$$

W praktyce rzeczoznawczej bardzo często przyjmuje się, że ślady hamowania znaczone są w fazie hamowania ze stałym opóźnieniem [8], czyli na drodze:

$$S_{slad} = \frac{v_0^2 - v_k^2}{2 \cdot a_h} - \frac{v_0 \cdot t_n}{2} + \frac{a_h \cdot t_n^2}{8} \quad (13)$$

Jeżeli znamy prędkość końcową, wówczas prędkość początkową dla danej długości śladów hamowania można wyznaczyć ze wzoru:

$$v_0 = \frac{1}{2} t_n \cdot a_h + \sqrt{v_k^2 + 2 \cdot S_{slad} \cdot a_h} \quad (14)$$



Rys. 2. Zależność siły nacisku na pedał hamulca (F_p) oraz zastępczy przebieg opóźnienia w funkcji czasu hamowania: 1) przebieg z liniowym narostem opóźnienia, 2) przebieg ze skokowym narostem opóźnienia

W wyrażeniu na całkowitą drogę hamowania bardzo często pomija się składnik $\frac{a_h \cdot t_n^2}{24}$, co oznacza przejście na model ze skokowym narostem opóźnienia (rys. 2).

W takim przypadku wygodne jest wprowadzenie pojęcia czasu uruchamiania hamulców t_u , który jest sumą czasu zwłoki zadziałania hamulców t_a i połowy czasu narastania t_n :

$$t_u = t_a + \frac{t_n}{2} \quad (15)$$

Droga hamowania do prędkości końcowej, w takim przypadku, może być wyznaczona z zależności:

$$S_h = S_r + S_u + S_h = v_0 \cdot (t_r + t_u) + \frac{v_0^2 - v_k^2}{2 \cdot a_h} \quad (16)$$

natomiast czas hamowania do prędkości końcowej może być wyznaczony z zależności:

$$t = t_r + t_u + \frac{v_0 - v_k}{a_h} \quad (17)$$

Długość śladów hamowania można wówczas wyznaczyć ze wzoru:

$$S_{slad} = \frac{v_0^2 - v_k^2}{2 \cdot a_h} \quad (18)$$

Jeżeli znana jest prędkość końcową, to prędkość początkową dla danej długości śladów hamowania można wyznaczyć z zależności:

$$v_0 = \sqrt{v_k^2 + 2 \cdot s_{slad} \cdot a_h} \quad (19)$$

4. Symulacja procesu hamowania w programie V-Sim

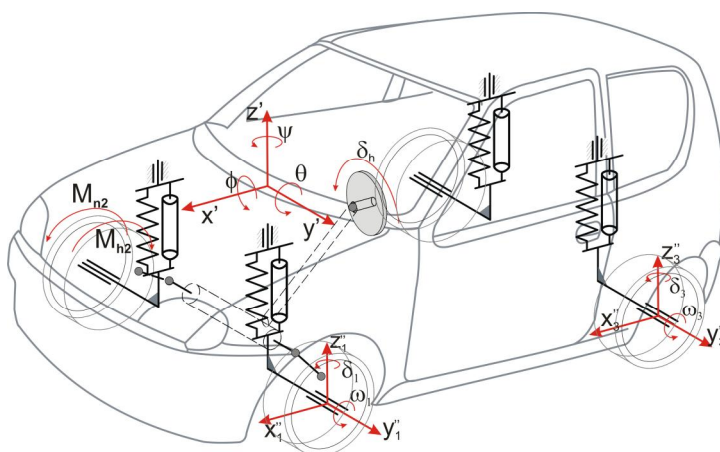
4.1. Model samochodu zastosowany w programie V-Sim

Pojazd w programie V-Sim zamodelowano jako układ 5 ciał sztywnych o 10 stopniach swobody (nadwozie – 6 stopni swobody, każde z kół – 1 stopień swobody) [1].

Model pojazdu uwzględnia następujące elementy:

- **Rozkład masy.** Program umożliwia swobodne zdefiniowanie rozkładu masy pojazdu poprzez wskazanie dowolnego położenia środka masy i głównych momentów bezwładności pustego pojazdu. Przy wyznaczeniu wypadkowego położenia środka masy oraz momentów bezwładności program uwzględnia rozmieszczenie ładunku i pasażerów wewnątrz pojazdu.
- **Zawieszenie.** Zastosowano prosty, kinematyczny model niezależnego zawieszenia kół, uwzględniający przemieszczenie pionowe i skręt koła. Siły reakcji wyznaczane są przy uwzględnieniu nieliniowych charakterystyce sprężysto-tłumiących zawieszenia. Zastosowany model umożliwia również analizowanie wpływu na ruch różnego stopnia zużycia lub awarii poszczególnych elementów zawieszenia.
- **Koła.** Dla każdego koła niezależnie analizowana jest dynamika jego ruchu obrotowego (uwzględniając po jednym stopniu swobody). Przy wyznaczaniu interakcji opona – nawierzchnia wykorzystano model opracowany w Instytucie Bezpieczeństwa Drogowego Uniwersytetu Michigan (HSRI) przez zespół Dugoffa z uwzględnieniem wprowadzonych później udoskonaleń [11].
- **Układ kierowniczy.** Realizowany jest przez prosty, kinematyczny model. W modelu tym uwzględniona jest podatność rzeczywistego układu poprzez korektę poprzecznych sił reakcji opon osi kierowanej. Układ ten realizuje lub, opcjonalnie nie, zasady Ackermana. Kierowane mogą być dowolnie wybrane osie pojazdu.
- **Układ hamulcowy.** Zastosowany model układu hamulcowego uwzględnia działanie korektora siły hamowania tylnej osi spełniającego wymagania załącznika nr X 13-go regulaminu EKG dla każdego stanu obciążenia z możliwością pracy regulatora liniowego. Parametry układu hamulcowego i rozdzielacza sił zadawane są parametrycznie. Układ hamulcowy może opcjonalnie uwzględniać działanie układu przeciwblokującego (ABS) działającego poprzez modulację momentu hamującego kół w oparciu o ich względny poślizg. Zastosowany model umożliwia również analizowanie wpływu nieprawidłowego funkcjonowania elementów tego układu.
- **Silnik.** Pojazdy mogą być wyposażone w modele silników o zadanej parametrycznie charakterystyce, umożliwiające uzyskanie przez pojazd rzeczywistych wartości przyspieszeń.
- **Układ przeniesienia napędu.** Pojazdy posiadają modele układów przeniesienia napędu zawierające takie elementy jak: sprzęgło, skrzynia biegów z możliwością ręcznej lub

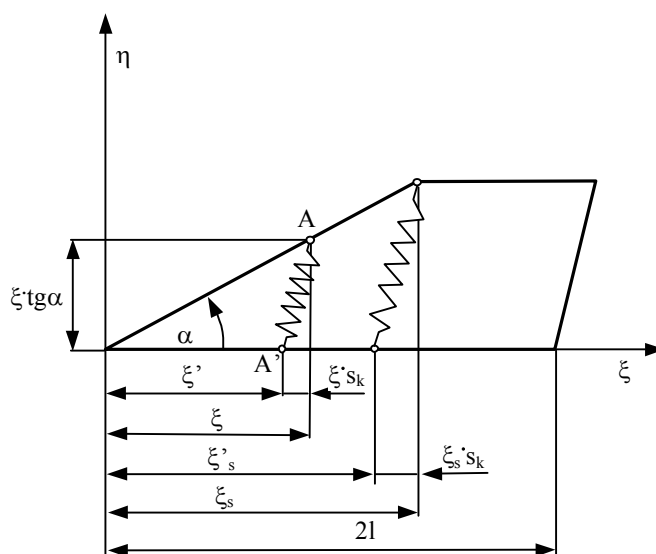
automatycznej zmiany przełożenia, przekładnię główną, oraz mechanizm różnicowy. Napęd może być przekazywany na dowolnie wybrane osie pojazdu.



Rys. 3. Model samochodu zastosowany w programie V-Sim

4.2. Model koła ogumionego wg Dugoffa [2], [11]

Jednym z powszechnie stosowanych modeli koła ogumionego jest model Dugoffa, Fenchera, Segela [2], zmodyfikowany następnie przez Uffelmanna [11]. Dla wyznaczenia sił koła ogumionego przyjęto model odkształceń bieżnika pokazany na rys. 4. Przyjęto ponadto, że rozkład nacisków pionowych w śladzie współpracy jest równomierny.



Rys. 4. Model odkształceń bieżnika opony przyjęty do wyznaczania sił

Ogólnie można określić wartości sił i momentów powstających w styku koła ogumionego z drogą jako funkcje następujących wielkości:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_s \end{bmatrix} = f(L_\alpha, L_s, \alpha_k, s_k, \mu, v_{xk}, v_{yk}, F_z) \quad (20)$$

gdzie: L_α - kinematyczny współczynnik sztywności poprzecznej,
 L_s - kinematyczny współczynnik sztywności wzdłużnej,
 α_k - kąt znoszenia koła,
 s_k - poślizg obwodowy koła,
 μ - współczynnik przyczepności,
 v_{xk} - składowa prędkości punktu styku koła z jezdnią w kierunku wzdłużnym,
 v_{yk} - składowa prędkości punktu styku koła z jezdnią w kierunku poprzecznym,
 F_z - nacisk normalny,
Poślizg obwodowy koła hamowanego wyznacza się z zależności:

$$s_k = 1 - \frac{r_d \cdot \dot{\phi}_k}{v_{xk}} \quad (21)$$

Współczynnik pomocniczy s_R określany jest następująco:

$$s_R = \frac{\sqrt{(L_s \cdot s_k)^2 + (L_\alpha \cdot \text{tg } \alpha_k)^2}}{\mu \cdot (1 - s_k)} \quad (22)$$

gdzie:

$$\alpha_k = -\text{arc } \text{tg} \frac{v_{yk}}{v_{xk}} \quad (23)$$

$$L_\alpha = L_{\alpha 1} + L_{\alpha 2} \cdot \frac{F_z}{F_{z \text{ stat}}} \quad (24)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \begin{cases} 1 - k_R \cdot v_g & v_g \leq v_{g0} \\ 1 - k_R \cdot \tanh(0.12 \cdot v_g)^2 & v_g > v_{g0} \end{cases} \quad (25)$$

$$v_g = v_{xk} \cdot \sqrt{s_k^2 + \text{tg}^2 \alpha_k} \quad (26)$$

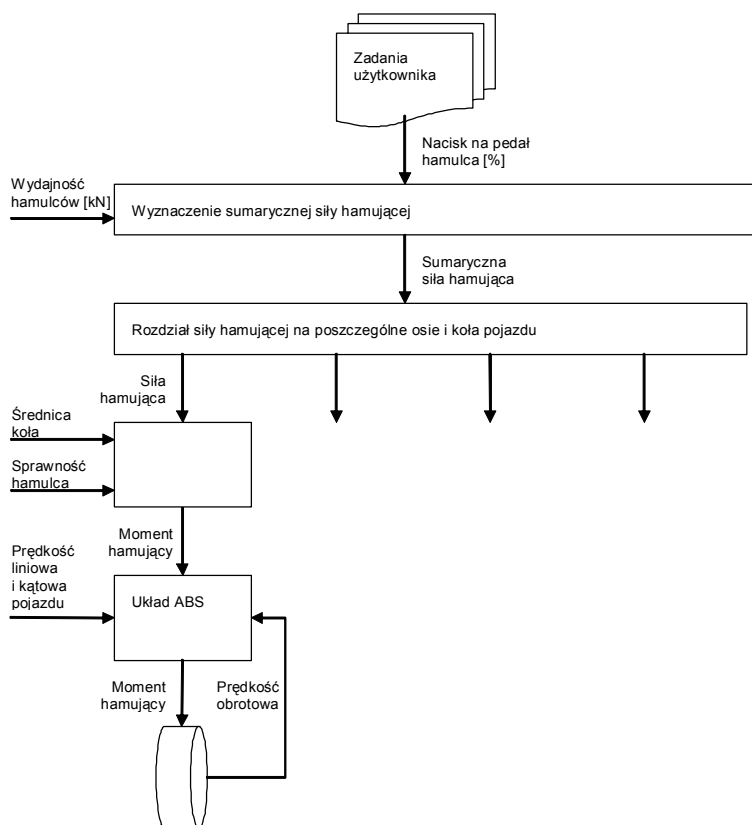
μ_0 - współczynnik przyczepności dla zerowej prędkości poślizgu,
 $L_{\alpha 1}, L_{\alpha 2}$ - parametry opony opisujące siłę boczną.

Siłę wzdłużną powstającą w styku koła z jezdnią można wyznaczyć z zależności:

$$\begin{cases} F_x = L_s \cdot F_z \cdot \frac{s_k}{1 - s_k}, & \text{dla } s_R \leq 0.5 \\ F_x = L_s \cdot F_z \cdot \frac{s_k \cdot (s_R - 0.25)}{(1 - s_k) s_R^2} & \text{dla } s_R > 0.5 \end{cases} \quad (27)$$

4.3. Model układu hamulcowego

Program V-SIM ma możliwość opcjonalnego uwzględnienia w modelu układu hamulcowego działania układu ABS. Układ ABS zrealizowany jest w programie jako regulator proporcjonalny, modulujący moment hamujący każdego z kół niezależnie na podstawie aktualnego współczynnika poślizgu. Układ ABS stara się utrzymać współczynnik poślizgu na poziomie 20%. Układ wyłącza się przy prędkości liniowej pojazdu poniżej 5 km/h.



Rys. 5. Algorytm działania układu hamulcowego

4.4. Inne czynniki odpowiedzialne za przyspieszenia wzdłużne działające na pojazd

Oprócz układu hamulcowego wiele innych czynników, które uwzględnia program V-SIM, wpływa na wynikowe przyspieszenia wzdłużne, którym podlega pojazd. Ich zaniedbanie prowadzi często do uzyskania zupełnie innego przebiegu ruchu pojazdu niż zamierzony przez użytkownika. Do czynników tych należą:

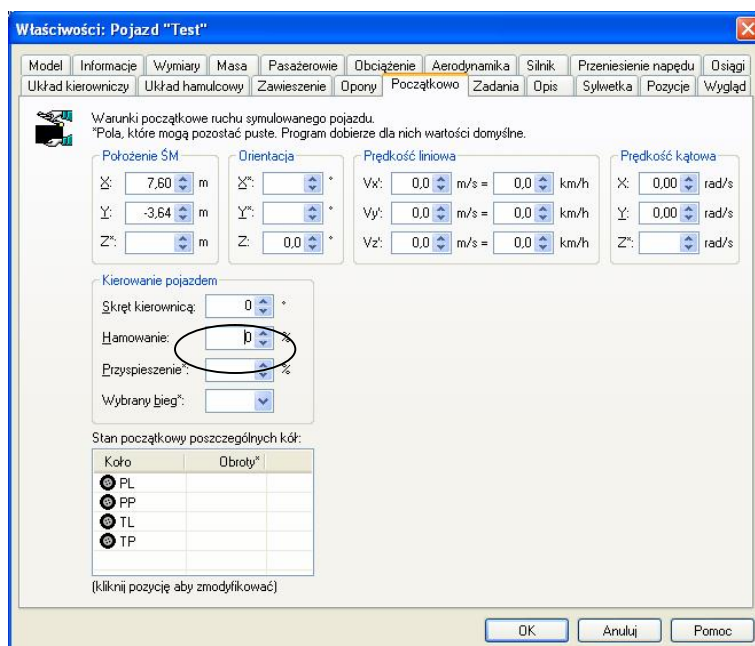
- **Hamowanie silnikiem.** Jeżeli użytkownik nie wprowadzi, poprzez zadanie biegu neutralnego (N), rozsprzęglenia pomiędzy silnikiem a kołami napędzanymi to przy braku nacisku na pedał przyspieszenia program uwzględni działanie hamujące silnika. Brak nacisku na pedał przyspieszenia wprowadzany jest przez program automatycznie np. w momencie rozpoczęcia zadania Hamowanie. Wielkość momentu hamowania silnika wyznaczana jest przez program na podstawie aktualnej prędkości obrotowej, pojemności silnika i rodzaju jego konstrukcji. Na wynikowy moment hamujący występujący na kołach

napędowych ma także wpływ położenie aktualnie wybranego biegu oraz położenie przekładni głównej.

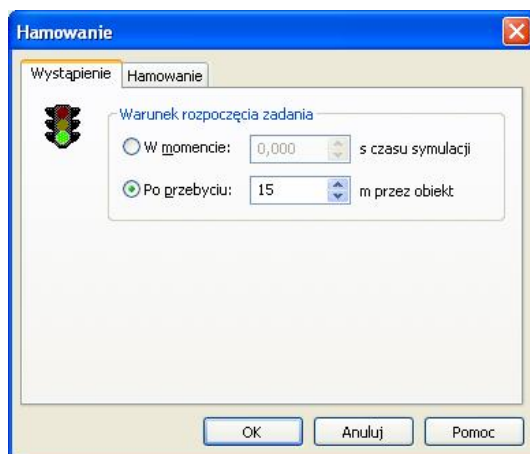
- **Opór wzniesienia.** W przypadku ruchu pojazdu na pochylonej nawierzchni program automatycznie przelicza wartości składowych siły grawitacji wynikające z pochylenia (równoległe do kierunku ruchu) bądź przechylenia (prostopadłe do kierunku ruchu) terenu uwzględniając je w równaniach ruchu.
- **Opór aerodynamiczny nadwozia.** Przy większych prędkościach istotnym czynnikiem jest czołowy opór aerodynamiczny nadwozia pojazdu. Program wylicza wielkość wynikającej z niego siły na podstawie aktualnej prędkości, współczynnika czołowego oporu aerodynamicznego pojazdu C_x oraz jego powierzchni czołowej.
- **Opory toczenia.** Na pewnych rodzajach nawierzchni, w szczególności sypkich, istotnym czynnikiem hamującym może być opór toczny kół pojazdu. Program posiada skatalogowane średnie wartości współczynnika oporu toczenia dla różnych rodzajów nawierzchni. Wartość tego współczynnika może być także bezpośrednio modyfikowana przez użytkownika.
- **Opory ruchu obrotowego kół.** W pewnych, szczególnych warunkach ruchu, np. w ruchu pozderzeniowym, istotnym czynnikiem hamującym może być opór ruchu obrotowego kół pojazdu. Użytkownik ma możliwość zadania początkowego oporu ruchu obrotowego każdego z kół będącego skutkiem trwałej niesprawności pojazdu oraz wprowadzenia zadania polegającego na zmianie oporu ruchu obrotowego występującej w pewnym momencie przebiegu symulacji, a będącej skutkiem np. zakleszczenia koła w wyniku kolizji.

4.5. Zadanie procesu hamowania

Jak wspomniano wcześniej, w programie V-SIM zadziałanie układu hamulcowego może być spowodowane jedynie poprzez zadanie odpowiedniego nacisku na pedał hamulca. Użytkownik ma dwie, niezależne możliwości zadania tego nacisku w zależności od założonego momentu jego wystąpienia.



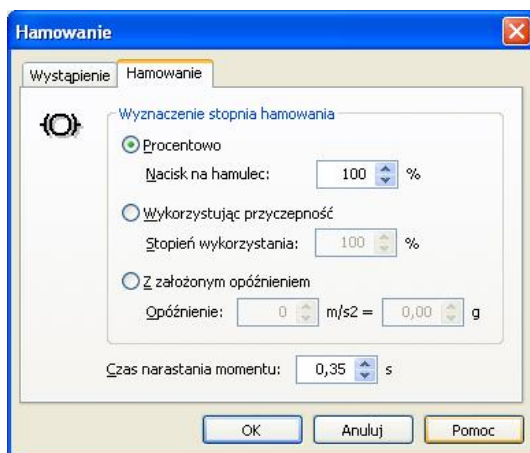
Rys. 6. Okno dialogowe parametrów początkowych



Rys. 7. Okno dialogowe zadania **Hamowanie** – zakładka **Wystąpienie**

Po pierwsze hamowanie możemy zadać jako jeden z parametrów stanu początkowego pojazdu. W tym przypadku zadajemy bezpośrednio wielkość: procentowego nacisku na pedał hamulca w stosunku do nacisku nominalnego. Akceptowalny zakres wartości wynosi w tym przypadku 0÷300%. Dopuszczalna wartość przekracza 100% gdyż badania wykazują, iż w warunkach stresu kierujący jest w stanie zadać na pedał hamulca dużo większą siłę niż producent zakłada jako nacisk nominalny.

Drugim sposobem rozpoczęcia procesu hamowania jest wprowadzenie zadania **Hamownie**. Zadań takich, realizowanych w toku postępu symulacji, możemy wprowadzić dowolną ilość. Dla każdego zadania mamy możliwość ustalenia kryterium wywołania danego zdarzenia. Kryterium takim może być pokonanie przez pojazd zadanego odcinka drogi lub upływ zadanego czasu symulacji. Zadany przez użytkownika moment wystąpienia zdarzenia musi uwzględniać założony czas reakcji kierującego oraz ewentualnie opóźnienie wprowadzane przez układ hamulcowy, gdyż moment ten oznacza moment rozpoczęcia zmiany momentu hamującego działającego na koła pojazdu.



Rys. 8. Okno dialogowe zadania **Hamowanie** – zakładka **Hamowanie**

Zadanie hamowania może być zrealizowane na trzy sposoby:

- **Procentowo.** W tym przypadku podajemy bezpośrednio procent nacisku na pedał hamulca w stosunku do nacisku nominalnego. Wariant ten jest szczególnie przydatny, gdy chcemy wprowadzić paniczną reakcję kierowcy, z wielkością

hamowania nie adekwatną do aktualnych warunków nawierzchni. Akceptowalny zakres wartości wynosi w tym przypadku 0÷300%.

- **Wykorzystując przyczepność.** Wariant ten jest przydatny, gdy chcemy wprowadzić manewr kierowcy polegający na świadomym wykorzystaniu, w mniejszym lub większym stopniu, współczynnika przyczepności nawierzchni, po której porusza się pojazd. W tym przypadku podajemy zadany procent wykorzystania współczynnika przyczepności. Akceptowalny zakres wartości wynosi 0÷200%. W momencie rozpoczęcia zadania program sprawdza współczynnik przyczepności nawierzchni w miejscu znajdującym się pod środkiem masy pojazdu i przyjmuje taki stopień nacisku na pedał hamulca, aby opóźnienie osiągnięte za pomocą układu hamulcowego wynosiło:

$$a_h = \mu \cdot g \cdot w_p \quad (28)$$

gdzie:

- a_h - opóźnienie hamowania;
- μ - współczynnik przyczepności przyłgowej;
- g - przyspieszenie ziemskie;
- w_p - współczynnik wykorzystania przyczepności w %.

Pomijając, opisany później, początkowy okres narastania momentu hamującego, stopień nacisku na pedał, a co za tym idzie moment hamujący jest stały i nie zależy już od aktualnego współczynnika przyczepności nawierzchni, po której porusza się pojazd.

- **Z założonym opóźnieniem.** Ten wariant zadania jest przydatny, gdy z innych przesłanek spodziewamy się określonej wartości średniego opóźnienia na drodze hamowania pojazdu. W tym przypadku podajemy wartość opóźnienia w $[m/s^2]$ lub w krotności wartości przyspieszenia ziemskiego g . Akceptowalny zakres wartości wynosi 0÷30 m/s^2 . Program przyjmie taki stopień nacisku na pedał hamulca aby opóźnienie nadawane przez (sprawny) układ hamulcowy uzyskała zadana wartość przy założeniu idealnie przyczepnej nawierzchni.

Należy mieć na uwadze, szczególnie w drugim i trzecim sposobie zadawania stopnia hamowania, że na wynikowe opóźnienie pojazdu wpływają także inne, wymienione wcześniej, czynniki oprócz samego układu hamulcowego.

Niezależnie od sposobu ustalenia stopnia hamowania użytkownik ma możliwość zadania czasu, w którym następuje zmiana momentu hamującego od wartości zastanej w momencie rozpoczęcia zadania do wartości docelowej. W czasie tym program zmienia moment hamujący w sposób liniowy. Czas ten ma odzwierciedlać czas zmiany siły nacisku przez kierującego na pedał hamulca oraz propagację tego sygnału przez układ hamulcowy pojazdu.

Po ustaleniu wartości docelowej stopień nacisku na pedał hamulca pozostaje stały aż do momentu wystąpienia innego zadania, które zmienia stopień hamowania (por. rys3). Zadaniem takim może być kolejne zadanie hamowania lub zadanie przyspieszenia.

Uwaga!

Standardowo program przyjmuje czas narastania wynoszący $t_n = 0,35$ s. Trzeba przy tym pamiętać, że w przypadku zastosowania pierwszego z wymienionych sposobów (**Procentowo**) sterowania układem hamulcowym, wartość 100% nacisku na pedał hamulca odpowiada uzyskaniu przez pojazd opóźnienia wynoszącego 1,2 g . Jeżeli ze względu na przyczepność pojazd uzyskuje mniejsze opóźnienie od założonego teoretycznie 1,2 g wówczas czas narastania opóźnienia od zera do wartości maksymalnej ze względu na przyczepność wyniesie w przybliżeniu:

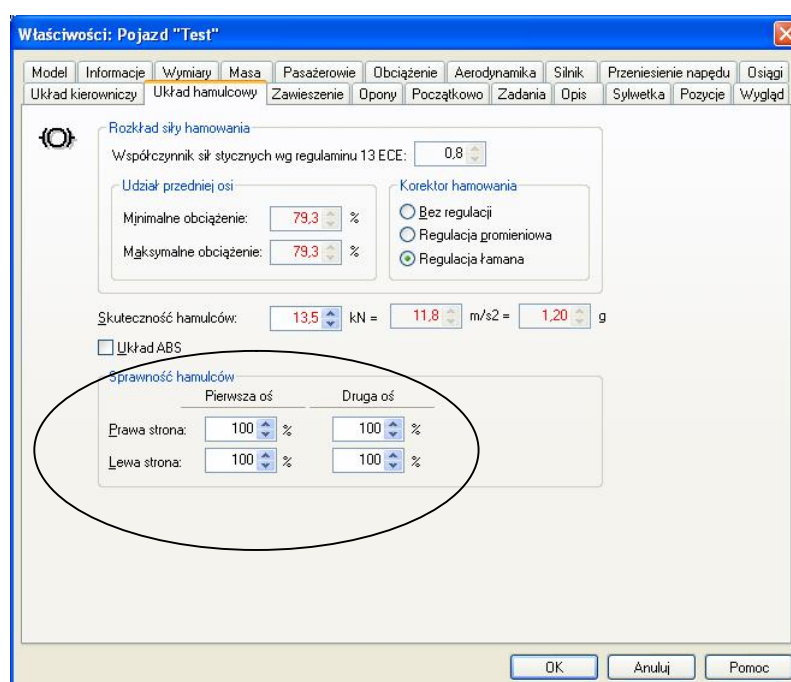
$$t_{np} = \frac{a_h}{a_{ht}} \cdot \frac{W_{np}}{100} \cdot t_n \quad (29)$$

gdzie:

- t_{np} - czas narastania opóźnienia do wartości ograniczonej przyczepnością;
- a_h - opóźnienie hamowania uzyskiwane ze względu na przyczepność;
- a_{ht} - teoretyczna wartość opóźnienia przy nacisku na pedał hamulca 100%;
- t_n - czas narastania założony przez użytkownika (standardowo 0,35s),
- W_{np} - Współczynnik nacisku na pedał hamulca w %.

4.6. Niesprawności układu hamulcowego

Program V-SIM ma możliwość zasymulowania niesprawności układu hamulcowego pojazdu. Użytkownik ma możliwość wprowadzenia niezależnie dla każdego z kół pojazdu współczynnika sprawności hamulca działającego na tym kole. Akceptowalny zakres sprawności to 0÷200%. Można zatem wprowadzić całkowitą dysfunkcję hamulca, częściowe pogorszenie sprawności a także zwiększone działanie w stosunku do założeń producenta.



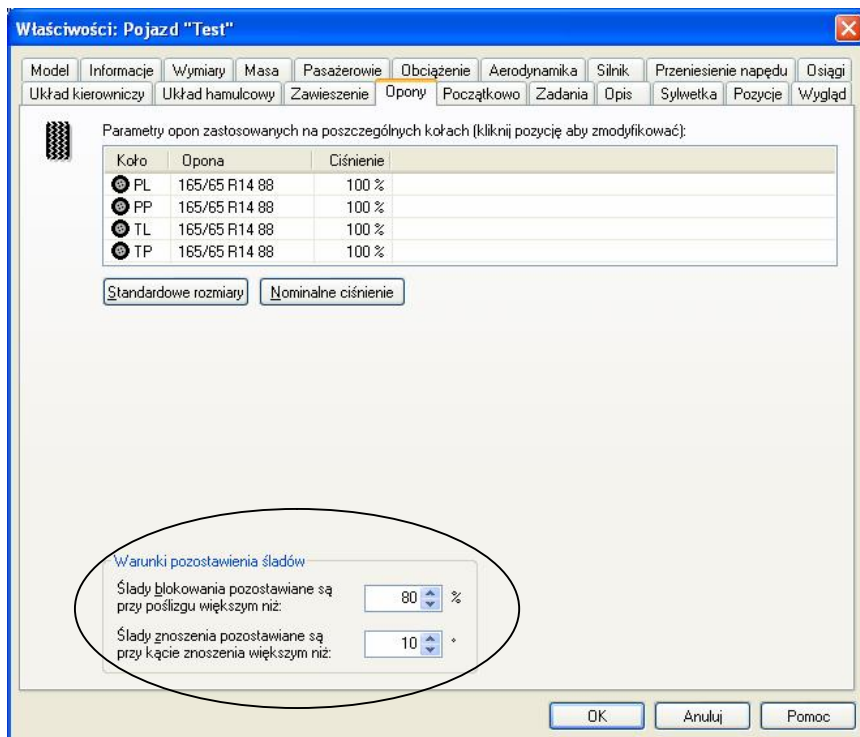
Rys. 9. Okno dialogowe umożliwiające wprowadzenie zmian w skuteczności hamowania (sprawności) każdego z kół

4.7. Znaczenie śladów zablokowania kół

Program V-SIM umożliwia kreślenie śladów zablokowania poszczególnych kół pojazdu w określonych warunkach ruchu. Jako kryterium znaczenia śladu program domyślnie przyjmuje przekroczenie 80% poślizgu koła. Wartość ta może być modyfikowana przez użytkownika.

W rzeczywistych warunkach moment rozpoczęcia znaczenia śladów hamowania zależy od wielu czynników, w tym, m. in. od: składu mieszanki gumy, z której wykonana

jest opona, rodzaju i stanu nawierzchni drogi, temperatury otoczenia. Według przeprowadzonych obserwacji rozpoczęcie znaczenia śladów może występować w zakresie 70÷100% poślizgu. Jest więc bardzo różne. Na szczęście, w typowych sytuacjach panicznego hamowania, gdy bardzo szybko dochodzi do zablokowania kół, różnice pomiędzy długością śladu wyznaczoną przez program na podstawie opisanego wcześniej, obligatoryjnego warunku, a śladami występującymi w rzeczywistej sytuacji są bardzo niewielkie. Różnice te mogą przyjąć znaczne wartości w sytuacji dłuższego utrzymywania obrotów koła na granicy zablokowania.



Rys. 10. Okno dialogowe umożliwiające wprowadzenie granicznych wartości poślizgu i kąta znoszenia, od których rozpoczyna się graficzne znaczenie śladów

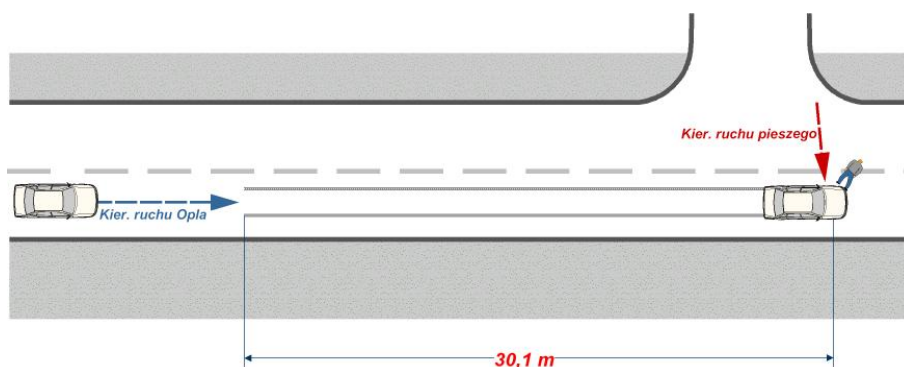
5. Porównanie wyników obliczeń analitycznych i symulacji

Do analizy porównawczej wybrano zdarzenie drogowe, w którym doszło do potrącenia pieszego. Potrącenie nastąpiło w końcowej fazie manewru hamowania przy bardzo małej prędkości (stosunkowo niewielkie obrażenia, brak widocznych uszkodzeń pojazdu). Stąd w dalszej analizie pominięto wpływ zderzenia z pieszym, ograniczając się do wyznaczenia początkowych parametrów ruchu pojazdu na podstawie utrwalonych na miejscu zdarzenia śladów hamowania.

Do wypadku doszło na suchym równym i poziomym odcinku jezdni o nawierzchni asfaltowej. Na szkicu wykonanym na miejscu zdarzenia zaznaczono ślady blokowania kół pojazdu od długości 30,1 m (rys. 12).

Z protokołu oględzin miejsca zdarzenia wynikało, iż w zdarzeniu uczestniczył samochód osobowy Opel Astra obciążony tylko osobą kierowcy. Wykonane przez biegłego na miejscu zdarzenia pomiary średniego pełnego opóźnienia pozwoliły na

ustalenie wartości średniej na poziomie $7,5 \text{ m/s}^2$. Badania wykonano pojazdem tego samego typu w zbliżonych warunkach drogowych i atmosferycznych.



Rys. 11. Szkic sytuacyjny miejsca zdarzenia

5.1. Model analityczny

W zakresie dotyczącym obliczeń analitycznych wykorzystano model znany z podstaw teorii ruchu pojazdu [7], [8], [9]. Samochód zamodelowany jest jako bryła sztywna o jednym stopniu swobody (przemieszczenie wzdłużne). Założenia upraszczające oraz wzory opisujące wspomniany model przedstawiono w rozdziale 3. Obliczenia przeprowadzono dla jednego zbioru wartości wejściowych oszacowanego na podstawie informacji o miejscu i przebiegu zdarzenia. Istotny problem dotyczący błędów szacowania wartości wejściowych oraz błędów wynikających ze struktury samego modelu pominięto. Obszerne informacje dotyczące tego zagadnienia wraz ze wskazówkami dotyczącymi sposobu postępowania przy analizie błędów znajdzie czytelnik m.in. w [3], [4], [5], [6].

W obliczeniach wykorzystano wzory (14, 19) zamieszczone w rozdziale 3. W wyniku obliczeń analitycznych uzyskano:

Dla modelu z liniowym narastaniem opóźnienia (por. rys. 1) prędkość początkowa wynosi:

$$v_0 = \frac{1}{2} t_n \cdot a_h + \sqrt{v_k^2 + 2 \cdot s_{slad} \cdot a_h} = \frac{1}{2} 0,35 \cdot 7,5 + \sqrt{0^2 + 2 \cdot 30,1 \cdot 7,5} = 22,6 \frac{m}{s} \left(81,2 \frac{km}{h} \right)$$

gdzie:

$t_n = 0,35 \text{ s}$ – czas narastania opóźnienia,

$a_h = 7,5 \frac{m}{s^2}$ – średnie pełne opóźnienie hamowania,

$s_{slad} = 30,1 \text{ m}$ – długość śladów hamowania.

Jeżeli przyjmiemy skokowy narost opóźnienia (por. rys. 3) prędkość początkową można wyznaczyć z zależności:

$$v_0 = \sqrt{v_k^2 + 2 \cdot s_{slad} \cdot a_h} = \sqrt{0^2 + 2 \cdot 30,1 \cdot 7,5} = 21,2 \frac{m}{s} \left(76,5 \frac{km}{h} \right)$$

Otrzymane wyniki obliczeń porównano z wynikami badań eksperymentalnych prowadzonych przez Instytut Ekspertyz Sądowych w Krakowie. Wśród badanych pojazdów, był również pojazd tego samego typu, co uczestniczący w zdarzeniu [10].

Wyniki otrzymane dla modelu z liniowym narastaniem opóźnienia są zbieżne z wartościami uzyskanymi w eksperymencie. Jak wykazano w publikacji [10] stosowanie modelu ze skokowym narastaniem opóźnienia, w każdym z badanych przypadków prowadziło do zniżenia prędkości początkowej, z której nastąpiło hamowanie. W analizowanym zdarzeniu drogowym również taka zależność występuje.

Warto w tym miejscu podkreślić, że uzyskana w badaniach eksperymentalnych średnia wartość czasu narastania opóźnienia, dla tego typu pojazdu, była mniejsza (0,15 s) od założonej w obliczeniach.

Konkludując – na podstawie przedstawionego pokrótce porównania można sformułować dwie wskazówki o charakterze ogólnym:

- W obliczeniach analitycznych należy stosować model z liniowym narastaniem opóźnienia. Stosowanie modelu ze skokowym narastaniem opóźnienia prowadzi do zniżenia wartości prędkości początkowej;
- Przyjmując czasy narastania opóźnienia na podstawie wyników badań eksperymentalnych przedstawionych w pracy [10] należy pamiętać, że podane tam wartości były uzyskane w specyficznych warunkach badań, wykonywanych przez kierowców badawczych, którzy wykonując kilkadziesiąt prób w czasie badań nabierali wprawy wykonując próby odruchowo, uzyskiwali bardzo dużą powtarzalność wyników. Czas narastania opóźnienia zależy głównie od szybkości narostu momentu hamującego (momentu tarcia w hamulcach). W przypadku hydraulicznych układów hamulcowych moment hamujący zależy bezpośrednio od wartości siły nacisku na pedał hamulca. W układach pneumatycznych i hydropneumatycznych decydujące jest przemieszczenie (wielkość otwarcia zaworu hamulcowego), a przekroczenie wartości siły odpowiadającej pełnemu otwarciu zaworu nie powoduje zwiększenia ciśnienia w układzie roboczym. Szybkość narostu siły nacisku na pedał hamulca zależy głównie od cech psychomotorycznych kierowcy, jego wieku, płci itp. Należy jednak pamiętać, że czas narostu opóźnienia zależy od każdego z elementów systemu człowiek-pojazd-otoczenie, stąd bezkrytyczne przenoszenie przez opiniujących uzyskanych wyników na całość populacji kierowców wydaje się być zbyt daleko idące.

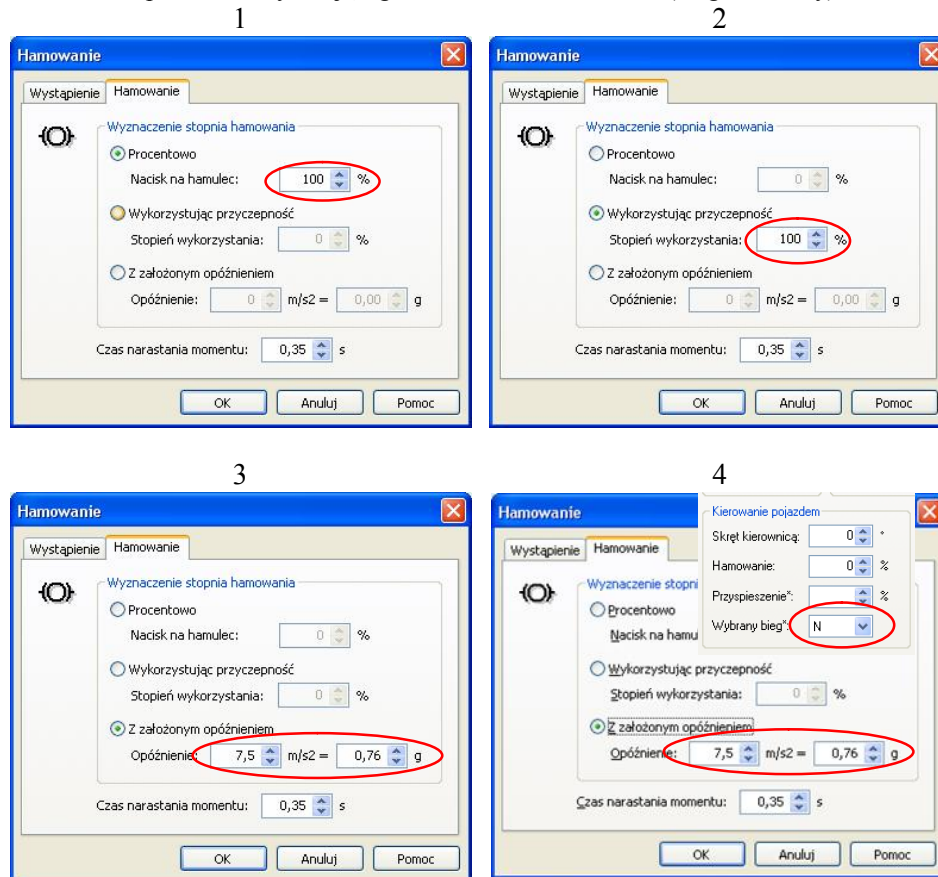
5.2. Model symulacyjny - program V-Sim

Symulację manewru hamowania przeprowadzono dla każdego z wymienionych w punkcie 4.5 sposobów realizacji tego zadania. Dla opcji hamowanie **Z założonym opóźnieniem** wykonano dwa warianty symulacji: z i bez udziału momentu hamującego silnika w procesie hamowania (w wariantcie drugim w zakładce początkowo wybrano bieg neutralny).

Metodyka postępowania w trakcie symulacji przedmiotowego zdarzenia drogowego była następująca:

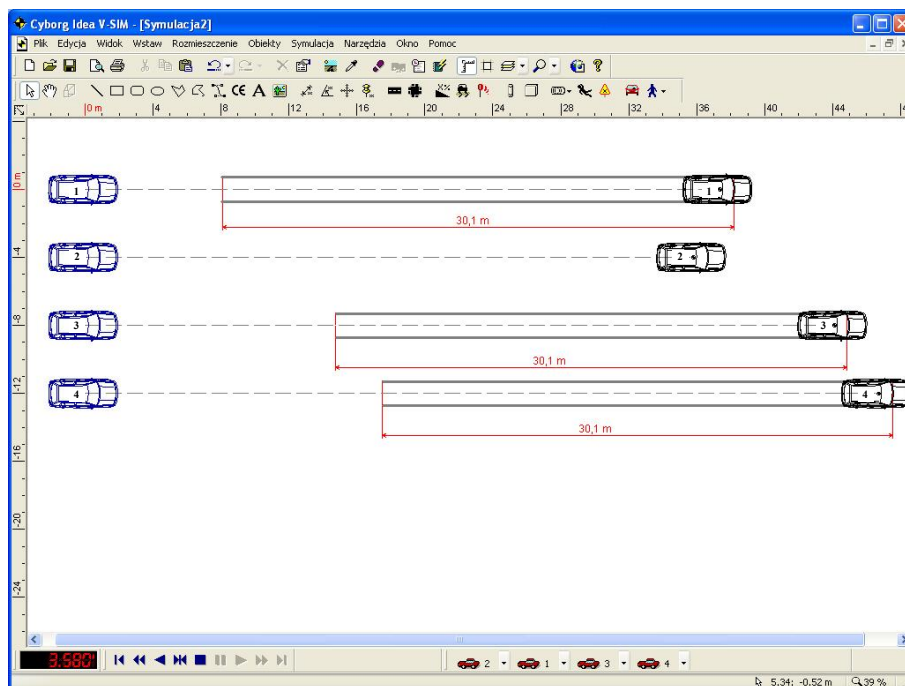
- Zdefiniowanie parametrów środowiska ruchu – w globalnych parametrach środowiska ruchu wybrano rodzaj nawierzchni „suchy asfalt” o współczynniku przyczepności przylgowej 0,8 oraz ślizgowej 0,75;
- Z bazy danych programu wybrano samochód Opel Astra 1.4i. Wybrany pojazd obciążono osobą kierowcy o masie 75 kg. Operację powtórzono trzykrotnie uzyskując cztery obiekty o tych samych parametrach technicznych (cztery samochody Opel Astra 1.4i). Usytuowanie pojazdów w chwili początkowej wyróżniono na rysunku 14 kolorem niebieskim;

- Dla każdego z pojazdów wprowadzono zdanie hamowania, w kolejności licząc do góry (por. rys. 13):
 - 1) nacisk na pedał hamulca 100%, **czas narastania momentu hamującego 0,35s**;
 - 2) hamowanie z wykorzystaniem przyczepności 100%, czas narastania 0,35s;
 - 3) zadane opóźnienie hamowania $7,5 \text{ m/s}^2$, czas narastania 0,35s, hamowanie silnikiem (przełożenie wybrane automatycznie przez program – IV bieg);
 - 4) zdane opóźnienie hamowania $7,5 \text{ m/s}^2$, czas narastania 0,35 s, bez udziału opóźnienia wynikającego z hamowania silnikiem (bieg neutralny);



Rys. 12. Okna dialogowe zadania „Hamowanie”. Na oknie nr 4 dodatkowo umieszczono fragment okna dialogowego „Początkowo” z zaznaczonym przełożeniem

- Dla każdego z wymienionych przypadków przeprowadzono wielokrotną symulację zmieniając prędkość początkową tak, aby uzyskać długość śladów hamowania zmierzoną na miejscu zdarzenia (30,1 m). Wyniki uzyskanych symulacji przedstawiono poniżej w formie graficznej (rys. 14) i tabelarycznej (tab. 6.). Tabelę uzupełniono o wyniki obliczeń analitycznych, oraz wyniki badań eksperymentalnych (wartości średnie) przedstawionych w pracy [10].



Rys. 13. Wyniki symulacji w postaci graficznej (od góry nr 1, 2, 3, 4)

Tabela 6. Zestawienie wyników: symulacji, obliczeń analitycznych i eksperymentu

Metoda		t_n	v_0 [km/h]	S_h [m]	S_s [m]
Symulacyjna	1	$\approx 0,24^*)$	79,9	37,33	30,1
	2	0,35	79,9	34,00	brak śladów
	3	0,35	86,8	43,73	30,1
	4	0,35	88,9	46,31	
Analityczna	1	0,35	81,2	37,84	30,1
	2	0,35	76,5	33,82	
Eksperyment	[10]	\bar{t}_n 0,15	81 ± 1	\bar{S}_h 34,2	\bar{S}_s 30,1

*) czas narastania opóźnienia wynoszący ok. 0,24 uzyskano dla czasu narastania momentu hamującego 0,35s

Ogólne wytyczne dotyczące wyboru sposobu realizacji manewru hamowania w programie V-Sim:

- proces hamowania sterowany wartością siły nacisku na pedał hamulca należy stosować do wyznaczenia prędkości początkowej na podstawie znanej długości śladów hamowania. Wynika to z faktu, że w przypadku awaryjnego hamowania kierowca naciska na pedał hamulca ze znacznie większą siłą niż w przypadku hamowania na granicy blokowania kół. W programie V-Sim przyjęto, że wartość momentu hamującego, jaką przeciętny kierowca, w sytuacji awaryjnej, powinien

uzyskać odpowiada opóźnieniu 1,2g (co dopowiada 100% wartości nacisku na pedał hamulca wprowadzonej w zadaniu **Hamowanie**). Przy takim założeniu stosunek długości śladów blokowania do długości drogi hamowania osiąga wartość zbliżoną do maksymalnej i zawiera się w granicach 0,75÷0,9. Warto podkreślić, że w przeciwieństwie do obliczeń analitycznych czas narastania opóźnienia będzie tutaj zależny od czasu narastania momentu hamującego do wartości momentu wynikającej z przyczepności koła do jezdni.

- proces hamowania sterowany wykorzystaniem przyczepności powinien być stosowany w przypadku konieczności wyznaczenia minimalnej, możliwej do uzyskania w danych warunkach, drogi hamowania. **Nie należy stosować tej metody w sytuacji, gdy następuje zmiana współczynnika przyczepności na długości drogi hamowania.** Wynika to z założenia, że wartość momentu hamującego wyznaczana jest na podstawie współczynnika przyczepności występującego na początku drogi hamowania i nie zmienia się w procesie hamowania.
- proces hamowania sterowany wartością opóźnienia hamowania powinien być stosowany w przypadku konieczności wyznaczenia drogi hamowania dla zadanej, zmierzonej na miejscu zdarzenia, wartości opóźnienia. Należy pamiętać, że zadana wartość opóźnienia hamowania może się zwiększyć o wartość opóźnienia wynikającą z hamowania silnikiem, jeżeli nie zadamy biegu neutralnego. Nie należy tej metody stosować, w przypadku konieczności wyznaczenia prędkości początkowej na podstawie długości śladów hamowania.

6. Zakończenie i interpretacja wyników

Wyznaczając prędkość początkową na podstawie długości śladów hamowania, za pomocą metody analitycznej należy stosować model z liniowym narostem opóźnienia, gdyż daje on wyniki zbliżone do eksperymentalnych.

Zadając czas narastania opóźnienia należy pamiętać, że zależy on nie tylko od czasu narastania momentu hamującego ale również od wartości współczynnika przyczepności opony do nawierzchni na której odbywa się hamowanie. Na nawierzchni o małym współczynniku przyczepności czas narastania opóźnienia jest znacznie krótszy niż na nawierzchni o dużym współczynniku przyczepności.

W metodzie symulacyjnej, przy wykorzystaniu programu V-Sim, wielkością wejściową jest czas narastania momentu hamującego do wartości zadanej. Czas narostu opóźnienia jest tutaj wielkością wynikową, zależną zarówno od czasu narostu momentu hamującego do wartości maksymalnej jak również od parametrów konstrukcyjnych układu hamulcowego, samochodu i rodzaju nawierzchni.

Wyznaczając prędkość początkową metodą symulacyjną należy bezwzględnie stosować model procesu hamowania sterowany 100% wartością siły nacisku na pedał hamulca. Zastosowanie pozostałych metod sterowania procesem hamowania do tego przypadku może skutkować znacznymi błędami zarówno co do wartości wyznaczonej prędkości początkowej jak i długości drogi hamowania.

Uzyskane, zarówno metodą symulacyjną jak i analityczną, długości drogi hamowania są dłuższe niż długość drogi hamowania zarejestrowana w eksperymencie [10]. W przypadku metody analitycznej wynika to z różnicy w czasie narastania opóźnienia (0,35 s – dla metody analitycznej i 0,15 w eksperymencie). W przypadku modelu symulacyjnego długość drogi hamowania zależy, w istotny sposób, od modelu opony zastosowanego do generowania sił stycznych.

LITERATURA

- [1] Bułka D., Świder P., Model pojazdu zastosowany w programie V-Sim do symulacji ruchu i zderzeń pojazdów samochodowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 79, Kielce 2004, s. 149-156.
- [2] Dugoff H., Fancher P.S., Segel L., An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamics Performance. SAE Technical Paper 700377.
- [3] Guzek M., Metody wyznaczania błędów obliczeń w analizie wybranych sytuacji przedwypadkowych w ruchu drogowym. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Warszawa 2002r.
- [4] Guzek M., Lozia Z., Błędy oceny parametrów prostoliniowego hamowania samochodu. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Mechanika 64, część 2, Kielce 1998.
- [5] Guzek M., Lozia Z., Obszary wiarygodności obliczeń związanych z analizą typowych sytuacji przedwypadkowych w ruchu drogowym. VII Konferencja „Problemy rekonstrukcji wypadków drogowych” organizowana przez IES w Krakowie, Kraków 2000, Zbiór referatów s. 99-109.
- [6] Guzek M., Lozia Z., Metody oceny dokładności obliczeń wykonywanych w trakcie rekonstrukcji wypadków w ruchu drogowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Mechanika 79, Kielce 2004, s. 43-71.
- [7] Mitschke M., Dynamika samochodu. WKŁ Warszawa 1977.
- [8] Praca zbiorowa, Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego. IES Kraków 2002.
- [9] Prochowski L., Mechanika ruchu. Pojazdy samochodowe. WKŁ Warszawa 2005.
- [10] Reza A., Zębała J., Badanie porównawcze dróg hamowania, śladów hamowania i osiągniętych opóźnień samochodów osobowych – część II. VII Konferencja „Problemy rekonstrukcji wypadków drogowych” organizowana przez IES w Krakowie, Kraków 2000, Zbiór referatów s. 207-218.
- [11] Uffelmann F., Rechenmodell eines Reifens für Seiten und Umfangskraftübertragung. Institut für Fahrzeugtechnik Braunschweig 1978.

Vehicle braking – legal and technical aspects

Summary

Braking of a vehicle is one of the most frequent manoeuvre performed in road traffic. In expert practice very often it is necessary to analyse vehicle braking process on the basis of skid mark visible on the roadway. Analytical models and complex computer models are used for analysing vehicle braking. The paper presents legal and technical aspects of vehicle braking process, the legal regulations concerning vehicle brake systems are presented. Physical model of vehicle braking are shown. The particular attention was give to proper interpretation the result of calculations.