

Zbigniew LOZIA, Piotr WOLIŃSKI

RELACJE WARTOŚCI DŁUGOŚCI DROGI HAMOWANIA I DROGI ZATRZYMANIA DLA RÓŻNYCH WARUNKÓW RUCHU SAMOCHODU

Streszczenie

Praca przedstawia ocenę długości drogi hamowania i drogi zatrzymania samochodu (zwanej także całkowitą długością drogi hamowania) dla przypadku ruchu prostoliniowego. Autorzy analizują różnicę bezwzględną i względną obu ocenianych wartości, dla różnych warunków ruchu, opisanych prędkością początkową i opóźnieniem hamowania. Stosują także funkcje wrażliwości bezwzględnej i względnej, co pozwala im na analizę zmienności obu funkcji oraz na wskazanie wartości największych i najmniejszych funkcji opisujących wpływ parametrów procesu hamowania na różnicę drogi zatrzymania i hamowania samochodu.

WSTĘP

Analizowany jest proces hamowania samochodu w ruchu prostoliniowym. Droga hamowania jest definiowana na dwa sposoby. 13 Regulamin ECE [1] określa ją jako dystans, który przebywa pojazd od rozpoczęcia przez kierowcę nacisku na element sterowania (pedał lub dźwignia hamulca) do zatrzymania. W mediach (prasa, radio, telewizja, Internet) za początek pomiaru drogi hamowania przyjmuje się początek narastania opóźnienia hamowania (początek spadku prędkości). Droga zatrzymania samochodu [2] (zwana także całkowitą długością drogi hamowania) jest definiowana jako droga przebyta przez pojazd od momentu, w którym wystąpiła sytuacja wymagająca użycia hamulca do zatrzymania pojazdu. Autorzy zwracają uwagę na znaczenie różnic wartości wymienionych wielkości. Producenci pojazdów posługują się dwoma definicjami: w celach homologacyjnych używają definicji wymaganej przez ECE, ale już w mediach wykorzystują mniejsze wartości, określone w drugi z wymienionych sposobów. Są one podstawą oceny bezpieczeństwa czynnego pojazdów przez jego potencjalnych nabywców. Wartości te pojawiają się często w mediach, które, jak wiadomo, mają dużą siłę oddziaływania na społeczeństwo. Z tego powodu w tym artykule jako drogę hamowania rozumie się tę prezentowaną w mediach.

W trakcie rekonstrukcji wypadku drogowego rzeczoznawcy, biegli sądowi wykorzystują pojęcie drogi zatrzymania, uwzględniającą czas reakcji kierowcy samochodu. Różni się ona, niekiedy znacznie, od długości drogi hamowania.

Przedmiotem analizy zawartej w tym artykule jest różnica bezwzględna i względną obu ocenianych wartości, dla różnych warunków ruchu, opisanych prędkością początkową i opóźnieniem hamowania.

1. FORMALNE DEFINICJE ANALIZOWANYCH WIELKOŚCI

Droga hamowania S_h rozumie się tu ją jako dystans, który przebywa pojazd od początku narastania opóźnienia hamowania (początku spadku prędkości) do zatrzymania pojazdu. *Droga zatrzymania* S_z (zwana także całkowitą długością drogi hamowania) jest definiowana jako droga przebyta przez samochód od momentu, w którym wystąpiła sytuacja wymagająca użycia hamulca do zatrzymania. Ich różnica jest oznaczana symbolem R . Zakłada się, że pojazd jest w stanie wykorzystać przyczepność kół do nawierzchni drogi w sposób optymalny (co odpowiada działaniu wyidealizowanego układu ABS) lub wszystkie koła zostają zablokowane (pojazd bez ABS, graniczne hamowanie). Oznacza to, że opóźnienie hamowania samochodu a_h jest równe iloczynowi współczynnika przyczepności μ (przyłgowej w pierwszym przypadku, poślizgowej w drugim) i przyspieszenia ziemskiego g .

$$a_h = \mu \cdot g \quad [\text{m/s}^2] \quad (1)$$

$$S_h = V_0 \cdot \frac{t_n}{2} + \frac{V_0^2}{2 \cdot a_h} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

$$S_z = V_0 \cdot (t_r + \frac{t_n}{2}) + \frac{V_0^2}{2 \cdot a_h} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

$$R = S_z - S_h = V_0 \cdot t_r \quad [\text{m}] \quad (4)$$

gdzie:

a_h – opóźnienie hamowania, $[\text{m/s}^2]$;

V_0 – początkowa prędkość pojazdu, $[\text{m/s}]$;

t_r – sumaryczny czas reakcji kierowcy i samochodu, $[\text{s}]$;

t_n – czas narastania opóźnienia, $[\text{s}]$;

μ – współczynnik przyczepności, $[-]$;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – przyspieszenie ziemskie.

W trakcie analizy, obok wielkości bezwzględnej R , uwaga będzie skupiona na wielkości względnej - stosunku R i S_h , co wyraża wielkość K

$$K = \frac{S_z - S_h}{S_h} \cdot 100\% = \frac{V_0 \cdot t_r}{V_0 \cdot \frac{t_n}{2} + \frac{V_0^2}{2a_h}} \cdot 100\% = \frac{t_r}{\frac{t_n}{2} + \frac{V_0}{2a_h}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Postanowiono zastosować także pojęcia funkcji wrażliwości bezwzględnej w_x i względnej $w_x^{\%}$. Odnoszą się one do funkcji $y=f(x_i)$ argumentu x_i . Wrażliwość jest miarą wpływu zakłócenia δx_i na wielkość $y=f(x_i)$. Wielkości w_x i $w_x^{\%}$ wyrażamy wzorami:

$$w_{x_i}(i) = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$w_{x_i}^{\%}(i) = \frac{\partial(\ln y)}{\partial(\ln x_i)} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \quad (7)$$

W analizie wrażliwości badany jest wpływ czasu reakcji t_r , czasu narastania opóźnienia t_n , opóźnienia hamowania a_h (co można wiązać ze współczynnikiem przyczepności μ – zależność (1)) i prędkości początkowej hamowania V_0 (są to wielkości oznaczane jako x_i we wzo-

rach (6) i (7)) na wielkość K (patrz zależność (5); K może tu być utożsamiane z funkcją y we wzorach (6) i (7)).

Przykładowo, w trakcie analizy wpływu prędkości początkowej hamowania V_0 na wielkość K , wykorzystano wzory w następującej postaci szczegółowej

$$w_{V_0}^K = \frac{\partial K}{\partial V_0} = \frac{\partial}{\partial V_0} \left(\frac{t_r}{\frac{t_n}{2} + \frac{V_0}{2a_h}} \right) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{t_r}{\left(\frac{t_n}{2} + \frac{V_0}{2a_h} \right)^2} \cdot a_h \quad \left[\frac{\%}{\frac{m}{s}} \right] \quad (8)$$

$$w_{V_0}^{\%K} = \frac{\partial K}{\partial V_0} \cdot \frac{V_0}{K} \cdot \frac{100\%}{100\%} = \frac{\partial}{\partial V_0} \left(\frac{t_r}{\frac{t_n}{2} + \frac{V_0}{2a_h}} \right) \cdot \frac{V_0}{\frac{t_r}{\frac{t_n}{2} + \frac{V_0}{2a_h}}} \cdot \frac{100\%}{100\%} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{V_0}{\left(\frac{t_n}{2} + \frac{V_0}{2a_h} \right)} \cdot \frac{100\%}{100\%} \left[\frac{\%}{\%} \right] \quad (9)$$

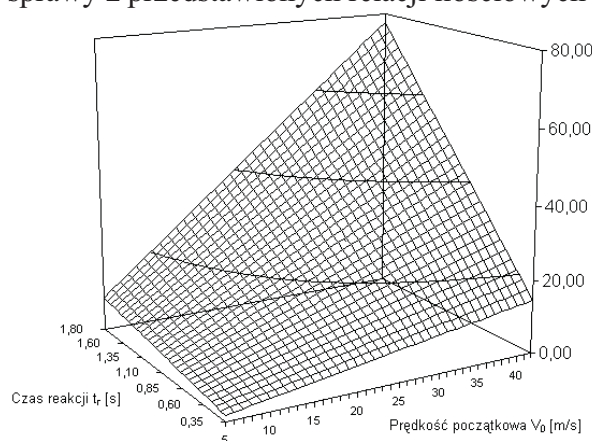
2. ZAKRES ZMIENNOŚCI BADANYCH WIELKOŚCI

Przyjęto następujący zakres zmienności wybranych wielkości determinujących długość drogi hamowania i drogi zatrzymania samochodu w ruchu prostoliniowym:

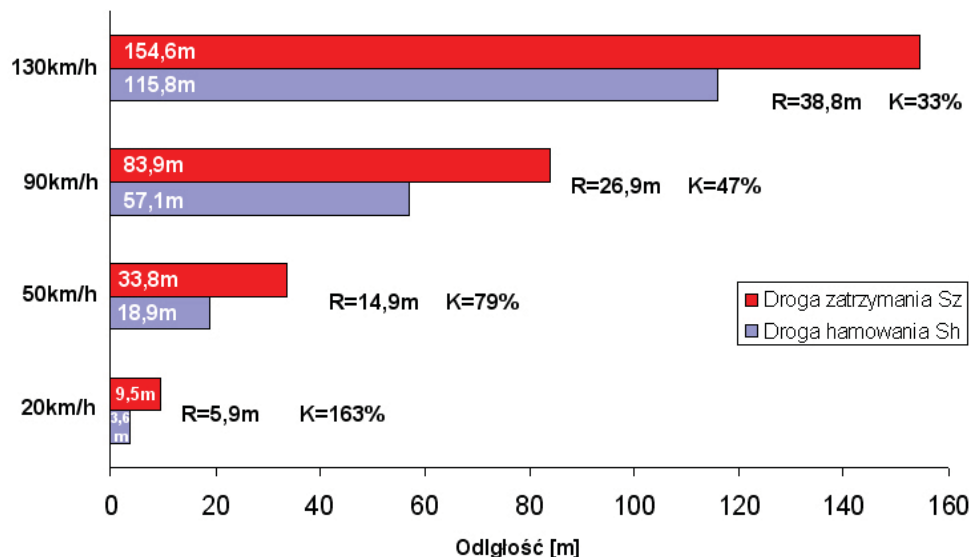
- czas reakcji t_r : 0,35 ÷ 1,8 s,
- czas narastania opóźnienia t_n : 0,2 ÷ 0,6 s,
- opóźnienie hamowania a_h : 1 ÷ 11 m/s²,
- prędkość początkowa V_0 : 5 ÷ 42 m/s (18 ÷ 150 km/h).

3. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ

Na rys. 1 przedstawiono wyniki obliczeń, charakteryzujące wpływ czasu reakcji t_r i prędkości początkowej V_0 na wartość różnicy drogi zatrzymania i hamowania R . Postać wzoru (4) tłumaczy monotoniczność funkcji $R(t_r, V_0)$. Istotne są tu wartości bezwzględne R , sięgające niemal 80 m dla skrajnych wartości t_r i V_0 . Na rys. 2 zestawiono wartości drogi zatrzymania i hamowania dla wartości średnich z przedziału zmienności t_r , t_n , a_h oraz czterech prędkości początkowych V_0 . Tu także widoczna jest duża różnica wartości długości drogi zatrzymania i hamowania (od 5,9 do 38,8 m). Wartości współczynnika K (patrz zależność (5)) wynosi 33÷163%. Kierowcy często nie zdają sobie sprawy z przedstawionych relacji ilościowych S_z i S_h .



Rys. 1. Wpływ czasu reakcji t_r i prędkości początkowej V_0 na wartość różnicy R



Rys. 2. Zestawienie wartości długości drogi zatrzymania i hamowania dla wartości średnich przedziału zmienności t_r, t_n, a_h ($t_r = 1,075$ s, $t_n = 0,4$ s, $a_h = 6$ m/s²) oraz czterech prędkości początkowych V_0 (20, 50, 90 i 120 km/h)

Zdaniem autorów, lepszy ogólny obraz wspomnianych relacji można uzyskać obliczając dla t_r, t_n, a_h, V_0 wartości wielkości w_x i $w_x^{\%}$ w postaci analogicznej do zależności (8) i (9).

Rys. 3 obrazuje wpływ wielkości charakteryzujących proces hamowania samochodu (czasu reakcji t_r , czasu narastania t_n , opóźnienia hamowania a_h i prędkości początkowej hamowania V_0) na wartość funkcji wrażliwości bezwzględnej parametru K względem prędkości początkowej V_0 . Wartości przedstawione na wykresie należy interpretować jako procentową zmianę K (patrz zależność (5)), towarzyszącą jednostkowej zmianie analizowanej wielkości (t_r, t_n, a_h, V_0). Wpływ ten (co do modułu $w_{V_0}^K$) jest największy dla dużych wartości czasu reakcji t_r i opóźnienia hamowania a_h oraz dla niewielkich wartości prędkości początkowej V_0 . Moduł $w_{V_0}^K$ sięga wartości 20÷40 %/(m/s).

Wpływ czasu reakcji t_r i czasu narastania t_n jest znacznie mniejszy – na poziomie 0÷3 %/(m/s).

Cechą charakterystyczną otrzymanych wyników (przedstawionych na rys. 3 oraz pozostałych, nie zamieszczonych w tej publikacji funkcji $w_{t_r}^K, w_{t_n}^K, w_{a_h}^K$) jest brak ekstremów w analizowanym obszarze zmian wielkości t_r, t_n, a_h, V_0 (patrz rozdział 3). Należy, zatem, dokonać przeszukania obszaru zmienności wymienionych wielkości w celu znalezienia wartości największej i najmniejszej.

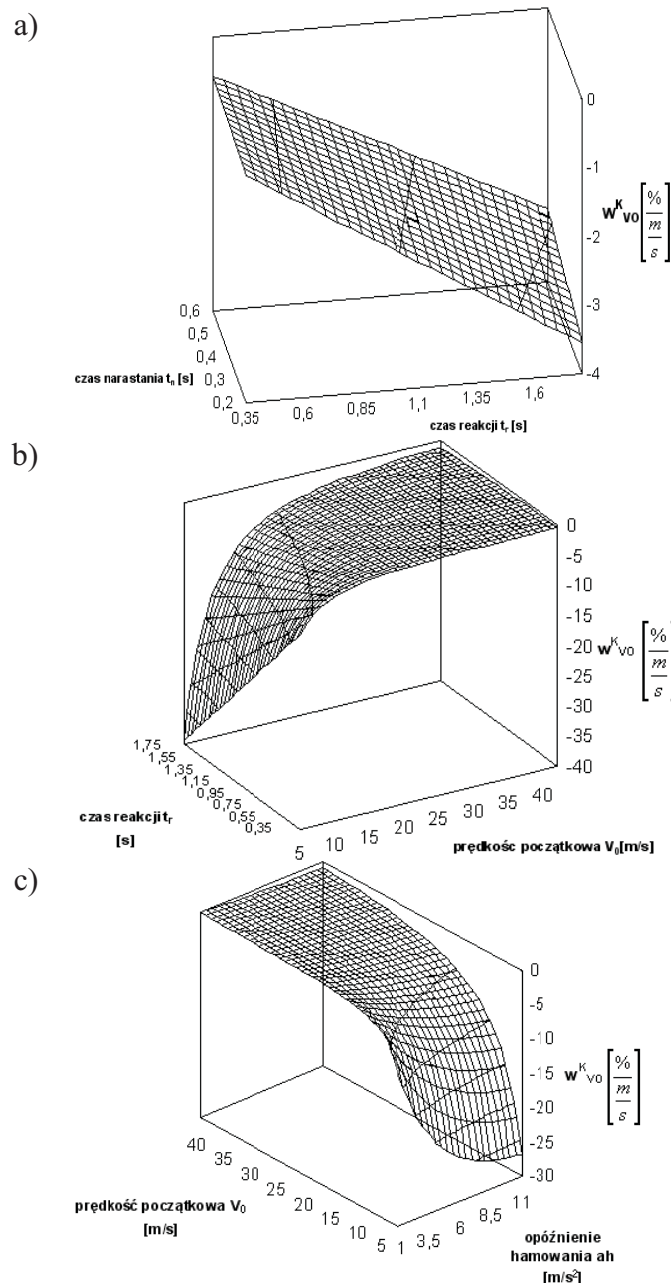
W tabeli 1 zestawiono wyniki systematycznego poszukiwania wartości największych i najmniejszych funkcji wrażliwości bezwzględnej w^K oraz względnej $w^{\%K}$, obliczanych względem poszczególnych wielkości charakteryzujących proces hamowania samochodu w ruchu prostoliniowym (t_r, t_n, a_h, V_0).

Porównanie tych wyników z obszarem zmienności t_r, t_n, a_h, V_0 (patrz rozdział 2) wskazuje, że ekstrema funkcji wrażliwości odpowiadają krańcom przedziałów zmienności t_r, t_n, a_h, V_0 .

Funkcja wrażliwości względnej (patrz zależności (7) i (9) oraz wartości w tabeli 1) pozwalają wskazać najistotniejszą spośród czterech analizowanych wielkości (czas reakcji t_r , czas narastania opóźnienia hamowania t_n , opóźnienie hamowania a_h , prędkość początkowa hamowania V_0).

Na rys. 4 przedstawiono, w postaci graficznej, relacje między wartościami modułów funkcji wrażliwości względnej $W^{\%K}$, obliczanej względem wymienionych wielkości (t_r , t_n , a_h , V_0).

Największy wpływ na różnicę długości drogi zatrzymania i hamowania $R = S_h - S_z$ ma czas reakcji t_r . Funkcja wrażliwości względnej $W^{\%K}_{t_r}$ ma dla tej wielkości stałą wysoką wartość 1%/1%. Istotny jest też wpływ prędkości początkowej hamowania V_0 i opóźnienia hamowania a_h – wartości modułów funkcji wrażliwości względnej w obu przypadkach przyjmują wartości z przedziału 0,43÷0,99 %/‰.



Rys. 3. Wpływ wielkości charakteryzujących proces hamowania samochodu na wartość funkcji wrażliwości bezwzględnej parametru K względem prędkości początkowej V_0

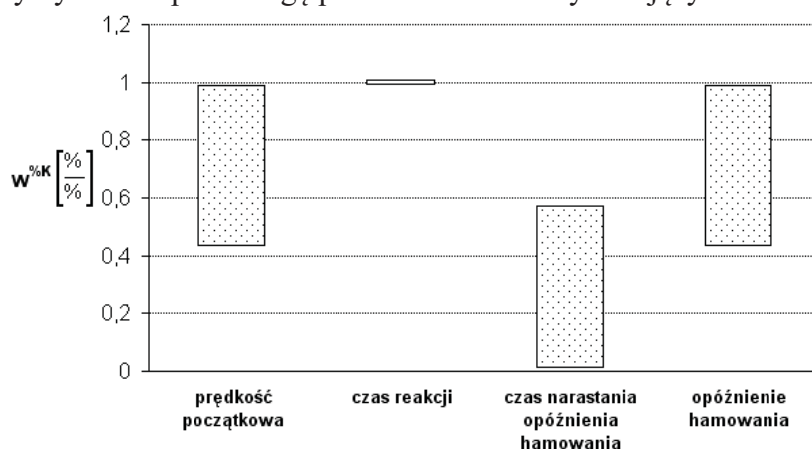
Tabela 1. Wartości największe i najmniejsze funkcji wrażliwości bezwzględnej oraz względnej wielkości K obliczanej względem poszczególnych wielkości charakteryzujących procesu hamowania samochodu w ruchu prostoliniowym (t_r , t_n , a_h , V_0)

	V_0 [m/s]	t_r [s]	t_n [s]	a_h [m/s ²]	Wartość	
$w^{K_{V_0}}$	42	0,35	0,6	1	-0,039	największa
	5	1,8	0,2	11	-76,4	najmniejsza
$w^{K_{t_r}}$	5	-	0,2	11	305,5	największa
	42	-	0,6	1	4,69	najmniejsza
$w^{K_{t_n}}$	42	0,35	0,6	1	-0,039	największa
	5	1,8	0,2	11	-840,3	najmniejsza
$w^{K_{a_h}}$	5	1,8	0,6	1	22,6	największa
	42	0,35	0,2	11	0,0093	najmniejsza
$w^{%K_{V_0}}$	5	-	0,6	11	-0,43	największa
	42	-	0,2	1	-0,99	najmniejsza
$w^{%K_{t_r}}$	-	-	-	-	1	największa
	-	-	-	-	1	najmniejsza
$w^{%K_{t_n}}$	42	-	0,2	1	-0,005	największa
	5	-	0,6	11	-0,569	najmniejsza
$w^{%K_{a_h}}$	42	-	0,2	1	0,99	największa
	5	-	0,6	11	0,43	najmniejsza

ZAKOŃCZENIE

Przedstawiony aparat matematyczny umożliwia analizę zmienności różnicy długości drogi zatrzymania i hamowania samochodu w ruchu prostoliniowym. Możliwe jest wskazanie wartości największych i najmniejszych funkcji opisujących wpływ wielkości charakteryzujących procesu hamowania na tę różnicę.

Jest ona najbardziej wrażliwa na zmianę czasu reakcji. Istotny jest także wpływ prędkości początkowej hamowania i opóźnienia hamowania. W mediach podawane są wartości długości drogi hamowania, znacznie mniejsze od wartości długości drogi zatrzymania. A to właśnie te ostatnie powinny być brane pod uwagę przez kierowców wykonujących manewr hamowania.



Rys. 4. Graficzne przedstawienie relacji między wartościami modułów funkcji wrażliwości względnej $w^{%K}$ obliczanej względem wybranych wielkości charakteryzujących procesu hamowania samochodu w ruchu prostoliniowym

BIBLIOGRAFIA

1. Regulamin 13 ECE. Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów kategorii M, N i O w zakresie hamowania.
2. Arczyński St.: *Mechanika ruchu samochodu*. WNT, Warszawa 1993.

VALUE RELATIONSHIPS OF THE BRAKING DISTANCE AND STOPPING DISTANCE LENGTH FOR CAR MOTION VARIOUS CONDITIONS

Abstract

The paper presents evaluation of the car braking and stopping distance (also called the total braking distance length) for rectilinear motion case. The authors analyse the absolute and relative difference of both assessed values for various motion conditions, described by the initial velocity and braking deceleration. They also apply the absolute and relative sensitivity functions what allows them to analyse the variability of both functions and identify the values of the largest and the smallest functions, describing the influence of the braking process parameters on the difference between the car stopping and braking distance.

Recenzent: dr hab. inż. Tadeusz Cisowski, prof. WSEI

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Zbigniew LOZIA - Politechnika Warszawska

mgr inż. Piotr WOLIŃSKI - Politechnika Warszawska