

**Tomasz L. STAŃCZYK, Rafał S. JURECKI, Stanisław WALCZAK,  
Wiesław PIENIAŻEK**

## **ANALIZA CZASÓW NARASTANIA SIŁY NA PEDALE HAMULCA ORAZ NARASTANIA OPÓŹNIENIA HAMOWANIA UZYSKIWANYCH PODCZAS BADAŃ SYTUACJI ZAGROŻENIA WYPADKOWEGO, SYMULOWANYCH NA TORZE**

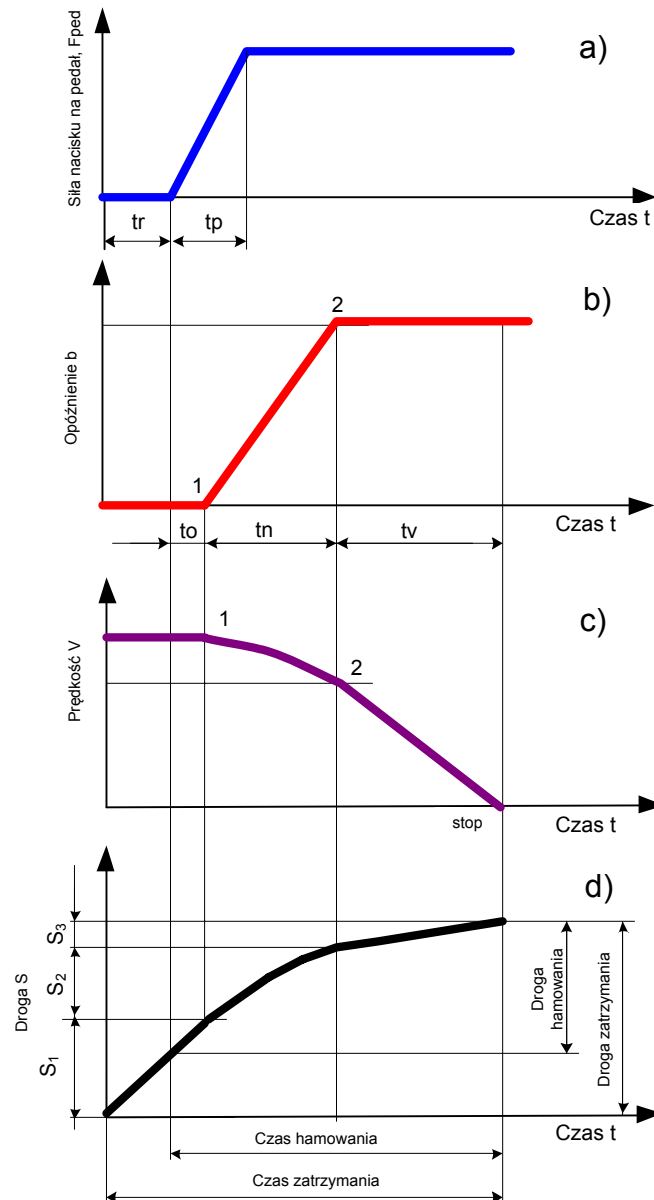
### *Streszczenie*

*Publikacja jest prezentacją wyników pracy badawczej uzyskanych podczas realizacji w latach 2007-2010, na Politechnice Świętokrzyskiej, obszernej pracy badawczej. Badania na torze dotyczyły zarówno czasu reakcji 100 kierowców w symulowanych sytuacjach wypadkowych jak i czasu narastania siły na pedale hamulca oraz opóźnienia. W realizacji badań uczestniczył również zespół z Politechniki Krakowskiej. Na przykładzie wyników 1 scenariusza badań na torze w pracy przedstawiono różne wybrane rodzaje manewrów hamowania podejmowanych przez badanych kierowców. Dla realizowanych na Torze Kielce badań dla 1 scenariusza wyznaczono wartości czasu narastania siły na pedale hamulca oraz czasu narastania opóźnienia. Wartości tych czasów przedstawiono w funkcji czasu ryzyka charakteryzującego poszczególne próby na torze.*

### **WSTĘP**

Czas narastania opóźnienia hamowania samochodu, jest jednym z ważnych czasów wykorzystywanych w rekonstrukcji przebiegu wypadków drogowych. Jest on składnikiem tzw. czasu traconego, określanego jako suma czasów: reakcji kierowcy, zwłoki zadziałania układu hamulcowego oraz połowy czasu narastania opóźnienia hamowania. W uproszczonym modelu procesu hamowania przyjmuje się, że w czasie traconym samochód nie jest hamowany. W wielu podręcznikach podawana jest informacja, że czas narastania opóźnienia hamowania jest równy (lub w przybliżeniu równy) czasowi narastania siły na pedale hamulca, a ponadto podawane jego wartości, nie są uzależniane od rodzaju wypadku i stopnia zagrożenia wypadkowego.

Teoretyczny przebieg procesu hamowania samochodu znany jest z literatury (patrz np. [5], [7]). Zmienny moment hamowania wytwarzany przez układ hamulcowy jest w znacznym stopniu uzależniony od sposobu oddziaływania kierowcy na pedał hamulca. Klasyczny, teoretyczny przebieg siły na pedale hamulca i opóźnienia uzyskanego przez samochód podczas hamowania, a także prędkości i drogi hamowania, jest pokazany na rys. 1 [6].



**Rys. 1.** Teoretyczny przebieg głównych parametrów hamowania:  $t_r$  – czas reakcji psychomotorycznej kierowcy,  $t_p$  – czas narastania siły na pedale hamulca,  $t_o$  – czas zwłoki zadziałania układu,  $t_n$  – czas narastania opóźnienia hamowania,  $t_v$  – czas hamowania z pełną wartością opóźnienia

W pracy zaprezentowano i przeanalizowano przebiegi siły na pedale hamulca i opóźnienia hamowania (rys. 1, a, b), dla symulowanych sytuacji wypadkowych różniących się stopniem zagrożenia wypadkowego.

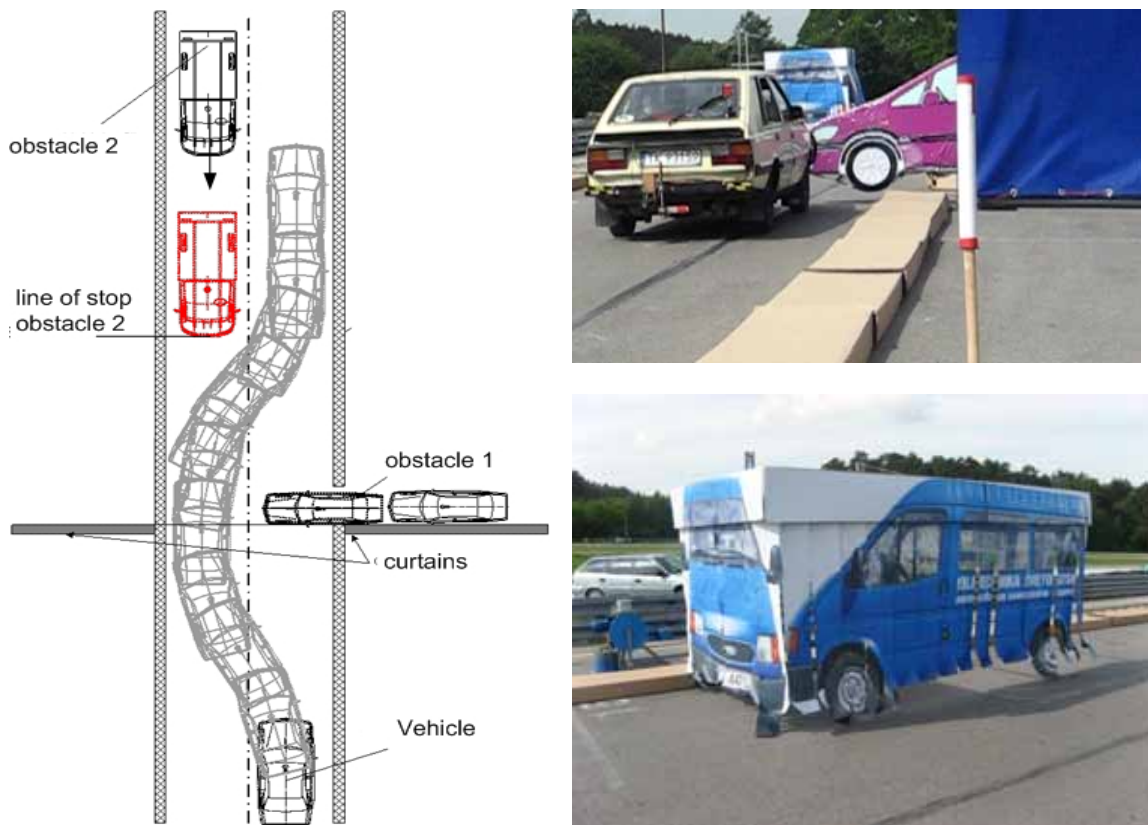
Jako miarę stopnia tego zagrożenia przyjęto czas ryzyka, zdefiniowanych m.in. w pracach [3], [4], [8], jako czas, którym dysponuje kierowca od momentu zauważenia przeszkody do ewentualnego zderzenia z nią i może on być wykorzystany przez kierowcę na realizację działań obronnych. W pracach tych wykazano, że zachowanie i sposób działania kierowców w sytuacji zagrożenia wypadkowego zależą od czasu ryzyka, w niektórych publikacjach zachodnich określanego jako TTC (*Time To Collision*).

Przedstawiono tam wyniki pokazujące, że od czasu ryzyka zależy dokonywany przez kierowcę wybór manewru obronnego oraz czasy reakcji kierowców, zarówno przy hamowaniu, jak i przy skręceniu.

Odpowiednie dane zostały zmierzone i zarejestrowane podczas eksperymentalnych badań na torze, dla trzech scenariuszy symulowanych sytuacji zagrożenia wypadkowego, polegających na nagłym pojawieniu się przeszkody – makiety, odpowiednio: samochodu osobowego, pieszego, czy samochodu ciężarowego „TIR”. Metodyka badań oraz wyposażenie samochodu i gniazda pomiarowego (obszaru zagrożenia) na torze, zostały szczegółowo opisane w pracy [9]. Czasy ryzyka były zadawane przed każdą próbą, losowo, oczywiście bez wiedzy kierowcy. Każdy kierowca wykonywał 19 prób, w tym dwie bez zagrożenia (tzw. puste).

Analizę przebiegów siły na pedale hamulca i opóźnienia hamowania, będącą tematem niniejszej pracy przeprowadzono w oparciu o wyniki badań 1-go scenariusza. W scenariuszu tym, prostopadle, z prawej strony toru pojawiała się nagle (spoza zasłony) makieta samochodu osobowego, a miejsce na pasie do ruchu w przeciwnym kierunku było w znacznym stopniu ograniczone, przez poruszającą się drugą makiety (samochodu dostawczego).

Schemat 1 scenariusza wraz ze zdjęciami makiet przedstawia rys. 2. Samochód badawczy Polonez został odpowiednio opomiarowany w celu rejestracji podczas prób wielkości takich, jak np: przemieszczenie pedałów sterujących, siła i opóźnienie hamowania.



**Rys. 2.** Schemat badań dla 1 scenariusza oraz zdjęcia makiet

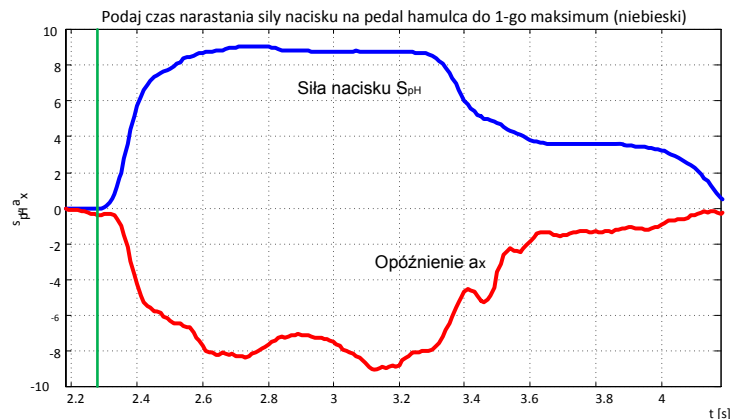
W tabeli 1. zestawiono parametry poszczególnych prób z odpowiadającymi im czasami ryzyka, wynikającym z prędkości jazdy samochodu badawczego i odległości od przeszkody.

**Tab. 1.** Prędkości samochodu badawczego, odległości od przeszkody oraz czasy ryzyka (badania na torze, scenariusz 1)

<i>Próba</i>		
Prędkość km/h	Odległość od przeszkody, m	Czas ryzyka, s
36	20	2,0
	5	0,5
	10	1,0
40	pusty	
	30	2,7
	10	0,9
	20	1,8
45	10	0,8
50	50	3,6
	10	0,72
	30	2,16
	40	2,88
60	pusty	
	40	2,4
	10	0,6
	30	1,8
	50	3,0
	20	1,2

## 1. RZECZYWISTE PRZEBIEGI SIŁY NA PEDALE HAMULCA I OPÓŹNIENIA HAMOWANIA

Na rysunku 3 pokazano przykładowy „ekran”, z użyciem którego podczas obróbki wyników wyznaczano czasy narastania dla wybranych parametrów procesu hamowania.



**Rys. 3.** Przebiegi siły na pedale hamulca  $S_{pH}$  – linia niebieska (liczba 10 oznacza tutaj 100% skoku pedału hamulca), i opóźnienia  $a_x$  – linia czerwona. Zielona linia pionowa oznacza moment początkowy pojawienia się przeszkody, określony na podstawie zarejestrowanego sygnału z bariery świetlnej

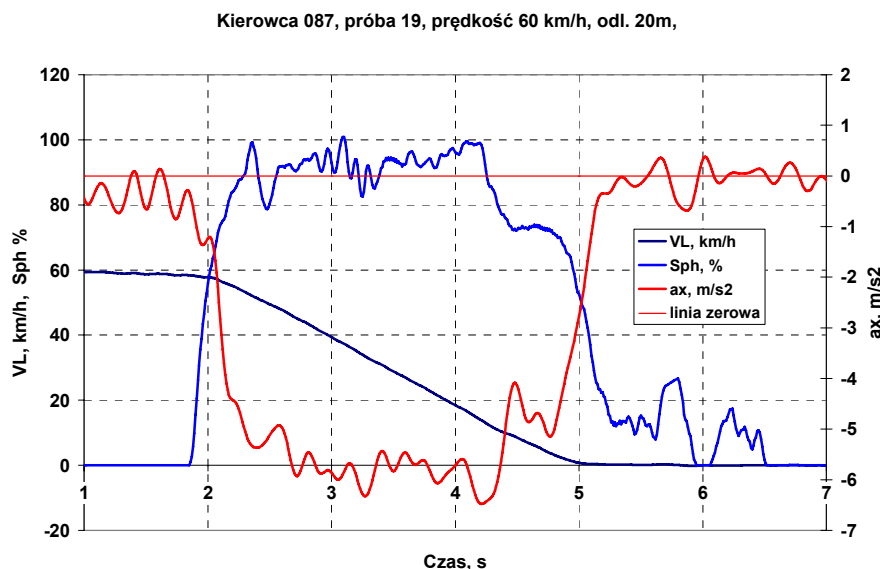
Na kolejnych rysunkach pokazane są, rzeczywiste przebiegi, omawianych w pracy parametrów hamowania, zarejestrowane podczas badań, dla wybranych wartości czasów ryzyka.

Ponieważ, zgodnie z przyjętymi założeniami dotyczącymi sposobu prowadzenia eksperymentu, kierowcom nie narzucano sposobu reagowania, mogli oni sami w zależności od własnej, subiektywnej oceny sytuacji oraz posiadanych umiejętności wybierać rodzaj manewru obronnego. Były zatem przypadki, w których kierowcy wybierali wyłącznie hamowanie, albo wyłącznie próbę ominięcia obu przeszkód. Było też wiele takich przypadków, w których kie-

rowcy jednocześnie zmniejszali prędkość (przyhamowywali) i wykonywali manewr omijania. Szczególnie w przypadku tego trzeciego „manewru łączonego”, hamowanie było wykonywane z różnymi intensywnościami. Efektem tego była duża różnorodność zarejestrowanych przebiegów parametrów procesu hamowania.

Jest to z jednej strony utrudnienie dla prowadzących badania, z drugiej zaś strony daje rzadką okazję możliwości przyjrzenia się, jak różnorodne bywają reakcje i sposoby działania różnych (aż 100) kierowców. Jest to z pewnością świetny materiał szkoleniowy dla rzeczoznawców i biegłych sądowych, którzy proces hamowania znają tylko z uproszczonych wykresów podręcznikowych i do tak uproszczonych schematów próbują w swoich opiniach dopasować znacznie bardziej złożoną rzeczywistość.

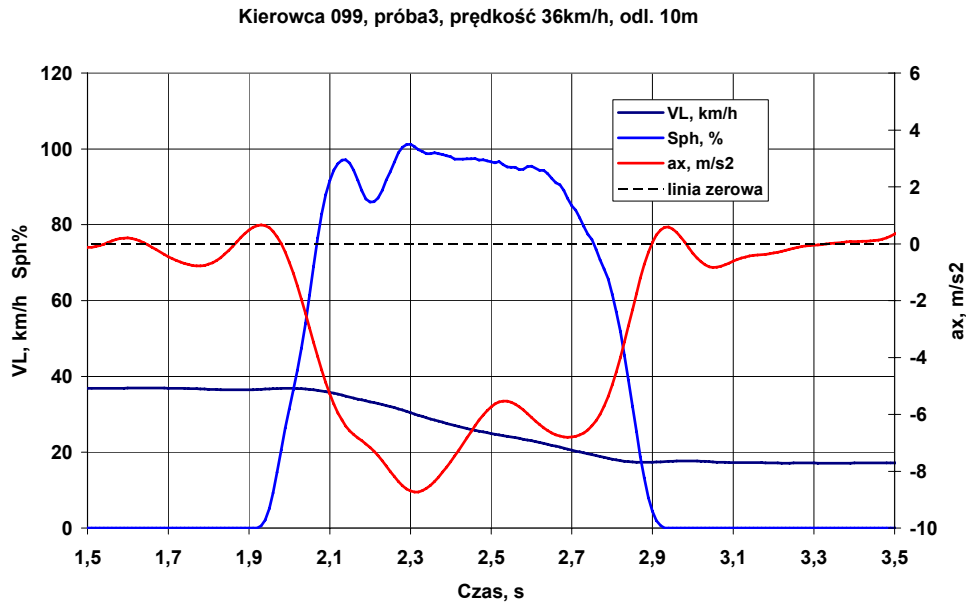
Na rys. 4 pokazano przypadek, w którym, kierowca zdecydował się zatrzymać samochód ze względu na bardzo wysoki poziom zagrożenia (czas ryzyka w tej próbie wynosił 1,2 s). Samochód został zatrzymany (patrz wykres), ale porównanie czasu zmniejszenia prędkości z 60 km/h do zera, wynoszącego blisko 3s., z czasem ryzyka charakteryzującym tę próbę (1,2 s), dowodzi, że zatrzymanie nastąpiło już po zderzeniu z pierwszą przeszkodą. Kierowcy nie udało się, w tym przypadku, uniknąć kolizji.



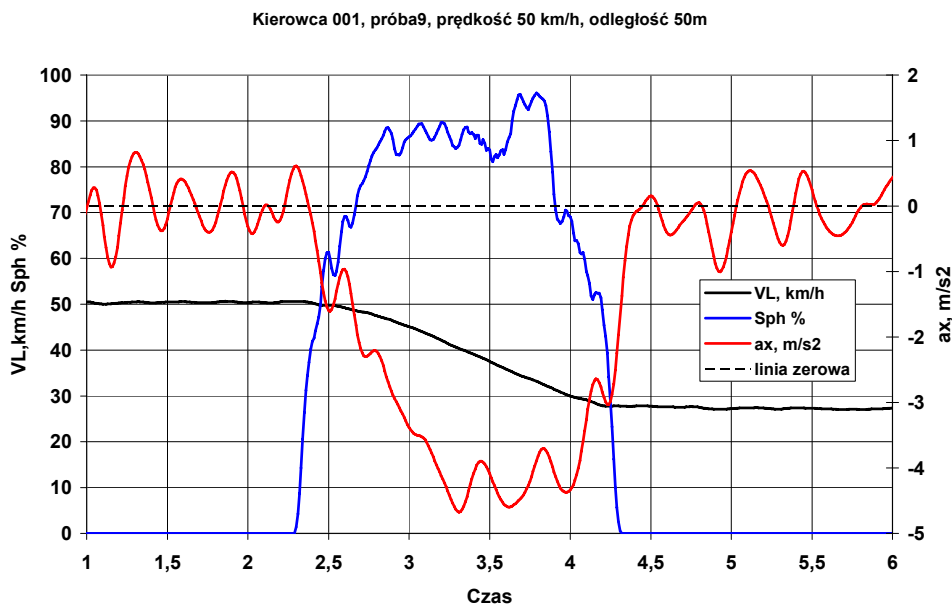
**Rys. 4.** Przebiegi prędkości samochodu  $V_L$ , siły na pedale hamulca  $S_{ph}$  i opóźnienia samochodu podczas hamowania  $a_x$ , zarejestrowane podczas próby. Hamowanie do zatrzymania pojazdu. Czas ryzyka 1,2 s

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono zapisy parametrów dla dwóch przypadków, w których kierowca jedynie zmniejszył prędkość (przyhamował). Na rysunku 5. widoczne jest, że kierowca nacisnął na pedał hamulca bardzo gwałtownie i krótko (czas nieco poniżej 1 sekundy), aby po zmniejszeniu prędkości do dosyć niskiej wartości około 18 km/h, próbować na ostatnich metrach przed przeszkodą wykonać manewr omijania. Była to próba o wysokim poziomie zagrożenia - czas ryzyka w tej próbie wynosił 1,0s.

Na rys. 6 pokazany jest przypadek zmniejszenia prędkość (przyhamowania), ale tym razem, przy umiarkowanym poziomie zagrożenia (czas ryzyka w tej próbie wynosił 3,6s). Kierowca zmniejszył prędkość z ok. 50 do ok. 27 km/h, aby przy tak zmniejszonej prędkości ominąć przeszkody. Na wykresie widać, że zmniejszenie prędkości nie realizowane było zbyt gwałtownie - trwało ok. 2s, czyli w przybliżeniu dwa razy dłużej niż w poprzednim przypadku. Duża wartość czasu ryzyka, powodowała, że kierowca mógł wykonywać manewr zdecydowanie, ale względnie spokojnie.



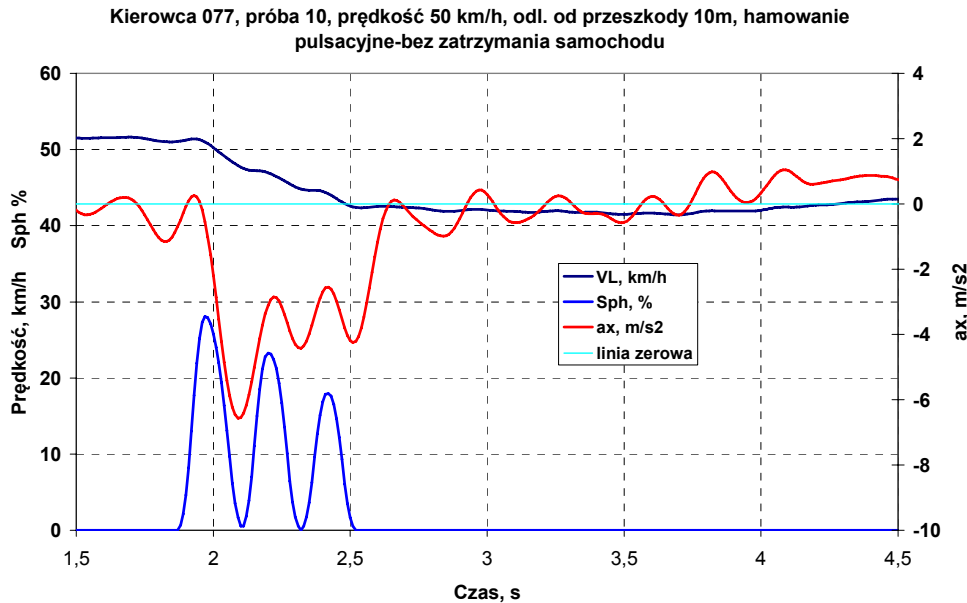
**Rys. 5.** Przebiegi prędkości samochodu  $V_L$ , siły na pedale hamulca  $S_{ph}$  i opóźnienia samochodu podczas hamowania  $a_x$ , zarejestrowane podczas próby. Próba z „przyhamowaniem”. Czas ryzyka 1,0 s



**Rys. 6.** Przebiegi prędkości samochodu  $V_L$ , siły na pedale hamulca  $S_{ph}$  i opóźnienia samochodu podczas hamowania  $a_x$ , zarejestrowane podczas próby. Hamowanie bez zatrzymania pojazdu. Czas ryzyka 3,6 s

Również na rys. 7 pokazany jest przykład przebiegu próby, w której kierowca jedynie zmniejszał prędkość (przyhamował). W tym jednak przypadku kierowca hamował pulsacyjnie. W bardzo krótkim czasie 0,6 s, trzykrotnie, szybko nacisnął na pedał zmniejszając prędkość jazdy samochodu o ok. 10 km/h. Była to próba o jednym z najwyższych poziomów zagrożenia realizowanych w badaniach na torze. Czas ryzyka w tej próbie wynosił 0,72 s.





Rys. 7. Przebiegi prędkości samochodu  $V_L$ , siły na pedale hamulca  $S_{ph}$  i opóźnienia samochodu podczas hamowania  $a_x$ , zarejestrowane podczas próby. Próba z hamowaniem pulsacyjnym. Czas ryzyka 0,72 s

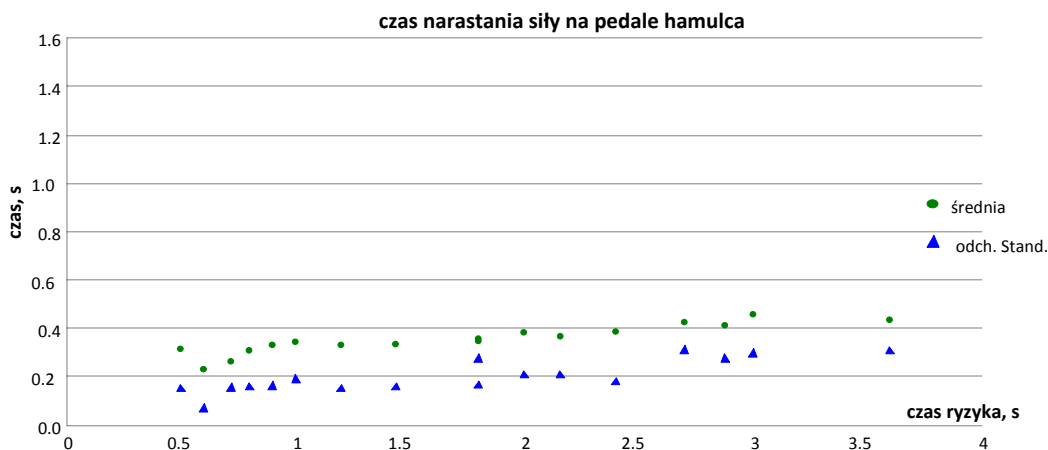
## 2. ZALEŻNOŚĆ CZASÓW NARASTANIA OD CZASÓW RYZYKA

Na podstawie tego typu przebiegów, jak pokazane na rysunkach 4-7, zarejestrowanych dla każdego z badanych 100 kierowców i każdej z siedemnastu pokazanych w tabelicy 1 prób, dokonano odczytu czasów narastania siły na pedale hamulca i czasów narastania opóźnienia hamowania samochodu. Odczytanie tych wartości wymagało analizy 1700 podobnych do wyżej pokazanych wykresów. Dla zbiorów wyników wyznaczonych dla każdej próby, scharakteryzowanej określoną wartością czasu ryzyka policzono wartości średnie i odchylenia standardowe. Wartości tych statystyk przedstawiono na wykresach w funkcji czasu ryzyka.

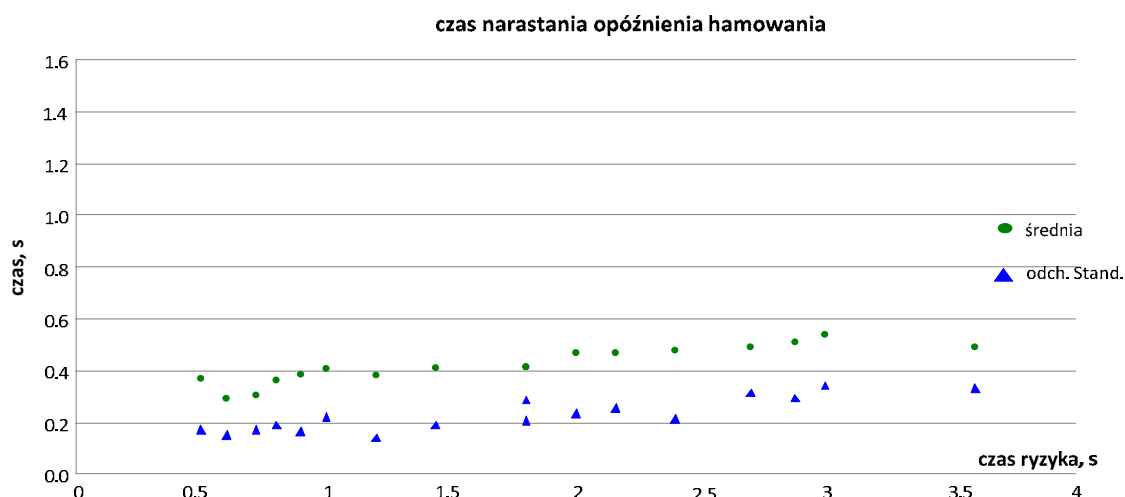
Na rys. 8 przedstawiona jest zależność czasów narastania siły na pedale hamulca od czasu ryzyka. W badanym zakresie czasów ryzyka, średnie wartości czasów narastania siły na pedale hamulca zmieniają się w zakresie od 0,229 do 0,456 s. Stosunkowo duże wartości przyjmują odchylenia standardowe: od 0,071 aż do 0,312 s. Świadczy to o dużym rozproszeniu uzyskiwanych wyników, a więc o silnym zróżnicowaniu działania poszczególnych kierowców.

W pracy [10] przedstawiono analizę czasów reakcji kierowców przy hamowaniu i skręceniu dla tego scenariusza badawczego. Czasy te malały wraz ze zmniejszaniem się czasu ryzyka. Interesującym jest fakt, że również czas narastania siły na pedale hamulca w analogiczny sposób zależy od czasu ryzyka.

Czasy narastania opóźnienia pojazdu podczas hamowania, w funkcji czasów ryzyka, przedstawione są na rys. 9. W badanym zakresie czasów ryzyka, średnie wartości czasów narastania opóźnienia hamowania zmieniają się w zakresie od 0,291 do 0,538s. W tym przypadku również stosunkowo duże wartości przyjmują odchylenia standardowe: od 0,149 aż do 0,344 s. Silne rozproszenie tych czasów jest konsekwencją dużego rozproszenia czasów narastania siły na pedale hamulca. W tym przypadku również obie prezentowane statystyki maleją wraz ze zmniejszaniem się czasu ryzyka.



Rys. 8. Zależność czasów narastania siły na pedale hamulca, w funkcji czasów ryzyka

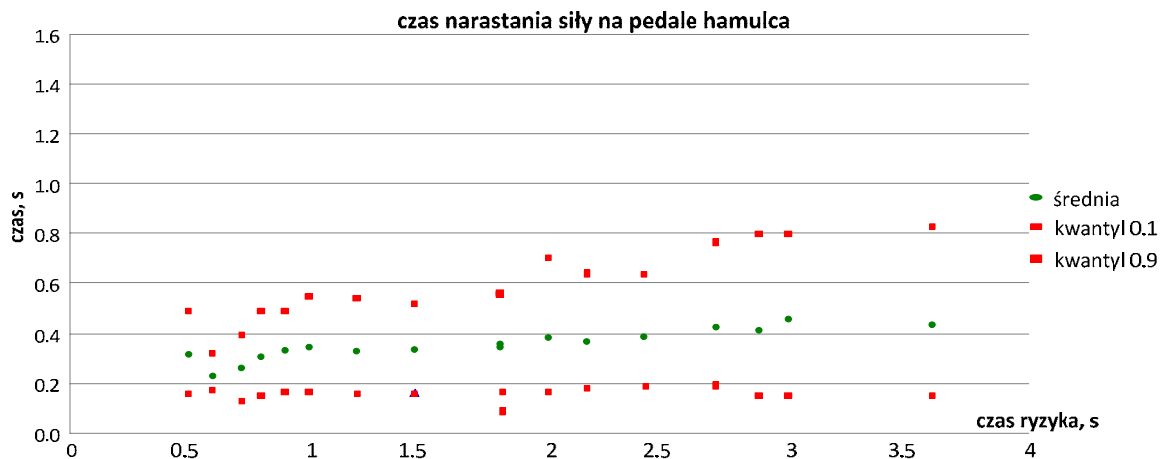


Rys. 9. Zależność czasów narastania opóźnienia hamowania, w funkcji czasów ryzyka

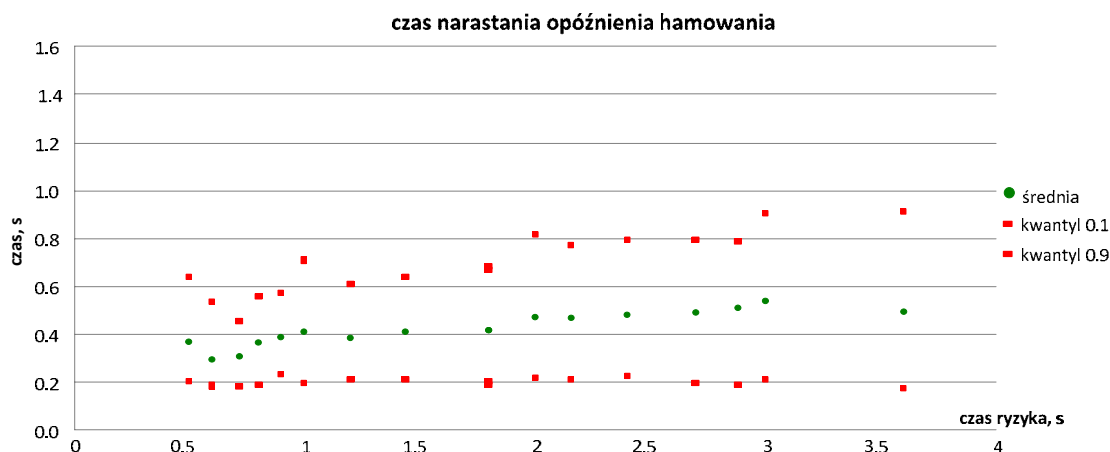
W niektórych publikacjach (np. [5], [7]) przedstawiana jest opinia, że czasy narastania siły na pedale hamulca i narastania opóźnienia hamowania są sobie równe. Przedstawione wyniki pokazują, że średnie czasy narastania opóźnienia hamowania (dla różnych wartości czasów ryzyka) są o ok. 0,1s dłuższe od średnich czasów narastania siły na pedale hamulca.

Swego rodzaju zaskoczeniem są relatywnie duże wartości odchyłeń standardowych przedstawione na rysunkach 8 i 9, świadczące o dużym rozproszeniu uzyskiwanych wyników, a więc o silnym zróżnicowaniu działania poszczególnych kierowców. Są one wyraźnie większe w porównaniu do innych czasów (reakcji przy hamowaniu i przy skręcie) analizowanych w tych badaniach [10]. Aby to jeszcze bardziej wyraźnie pokazać, na rysunkach 10 i 11 pokazano średnie wartości czasów narastania siły na pedale hamulca oraz opóźnienia hamowania, wraz z kwantylami 0,10 i 0,90, które pokazują szerokość przedziałów obejmujących 80% zarejestrowanych w każdej próbie czasów.





Rys. 10. Średnie wartości czasów narastania siły na pedale hamulca oraz kwantyle 0,10 i 0,90, w funkcji czasów ryzyka



Rys. 11. Średnie wartości czasów narastania opóźnienia hamowania oraz kwantyle 0,10 i 0,90, w funkcji czasów ryzyka

Z przedstawionych wykresów można odczytać, że szerokość przedziału między kwantylami 0,10 i 0,90, dla prób charakteryzowanych mniejszymi wartościami ryzyka wynosi około 0,4 s, a dla największych czasów ryzyka przekracza nawet 0,6 s. Jest to bardzo duże zróżnicowanie sposobu działań kierowców.

Drugim ciekawym spostrzeżeniem jest zależność kwantyli od czasów ryzyka. Dla kwantyla 0,90 można sformułować wniosek, że zachowuje się podobnie, jak wartości średnie. Na obu wykresach wartości tego kwantyla rosną wraz ze wzrostem czasu ryzyka charakteryzującego daną próbę, oraz wartości tego kwantyla dla czasów narastania opóźnienia hamowania są o ok. 0,1 s dłuższe od kwantyla czasów narastania siły na pedale hamulca. Całkiem inaczej zachowują się kwantyle 0,10 na obu wykresach. Po pierwsze można uznać, że na obu wykresach przyjmują wartość stałą – niezależną od czasu ryzyka, a po drugie ich wartości są w przybliżeniu sobie równe na obu wykresach i wynoszą ok. 0,2 s.

Porównując otrzymane wartości do wartości podawanych w literaturze, należy stwierdzić, że zarejestrowano większe wartości niż podawane w niektórych publikacjach. Na przykład w pracach [1] i [7] dla czasu narastania opóźnienia podano przedział (dla samochodów osobowych)  $0,2 \div 0,4$  s, zaś w pracy [2] przedział  $0,3 \div 0,6$  s. Widoczny na rys. 11 przedział dla kwantyli 0,10 i 0,90, to ok.  $0,2 \div 0,6$  s, dla sytuacji wypadkowych charakteryzowanych małymi wartościami czasu ryzyka oraz ok.  $0,2 \div 0,8$  s, dla dużych wartości czasu ryzyka.

## PODSUMOWANIE

W dotychczasowych pracach dotyczących analizy procesu hamowania (np. [8], [10]) autorzy niniejszej pracy skupiali się na czasach reakcji kierowców. Wykazano w tych pracach, że czasy te malały wraz ze zmniejszaniem się czasu ryzyka. Przedstawione powyżej wyniki pokazują, że również analizowane tu czasy narastania (zarówno siły na pedale hamulca, jak i opóźnienia hamowania) w analogiczny sposób zależą od czasów ryzyka. Są to zatem kolejne dwa parametry charakteryzujące sposób działania kierowców w sytuacjach zagrożenia wypadkowego, oprócz wymienianych już w pracach [3], [4], [8], zależne od czasu ryzyka.

Należy podkreślić, w porównaniu do innych analizowanych w tych badaniach wielkości charakteryzujących proces hamowania, relatywnie duże wartości odchyień standardowych przedstawione na rysunkach 8 i 9. Dla zobrazowania tej tezy dobrym parametrem jest wskaźnik zmienności zdefiniowany jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej danej zmiennej. Dla przedstawionych w pracy [10] czasów reakcji kierowców uzyskanych w tym samym eksperymencie (1 scenariusz, tor), wskaźnik zmienności wynosi odpowiednio, dla czasów reakcji:

- hamulcem roboczym – ok. 0,20-0,25,
- przy skręcie – ok. 0,20-0,30,
- gazem – ok. 0,30-0,50,
- motorycznej – ok. 0,50.

Dla rozpatrywanych w tej pracy czasów narastania wskaźnik ten wynosi, dla czasów narastania:

- siły na pedale hamulca – ok. 0,40-0,75,
- opóźnienia hamowania – ok. 0,50-0,75.

Są to zatem wielkości, dla których zróżnicowanie sposobu działania kierowców jest największe, co dodatkowo zilustrowano na rysunkach 10 i 11, pokazujących kwantyle 0,10 i 0,90 tych czasów.

## **ANALYSIS OF THE TIME OF INCREASE IN FORCES APPLIED TO A BRAKE PEDAL AND BRAKING DECELERATION DETERMINED DURING EXPERIMENTAL TESTING OF ACCIDENT HAZARD SITUATIONS ON A TESTING TRACK**

### **Abstract**

*The paper presents gathered results of a large scale research project conducted between 2007 and 2010 at Kielce University of Technology. The experimental testing involved also a research team from Cracow University of Technology. Experimental trials were conducted on Kielce Racing Track with a predetermined scenario where a passenger car (a safe mock-up) suddenly entered the road area from a perpendicular road. In this scenario, time values were determined for an increase in forces applied to a brake pedal and braking deceleration. These time parameters were shown as a function of the risk time characterizing specific trials. The paper quotes various types of braking maneuvers carried out by a group of 100 test drivers*

## BIBLIOGRAFIA

1. Burg H., Moser A., (Hrsg). *Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion*. 1 Aufl. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
2. Jakubasch K., *Nachschlagwerk für Sachverständige*. Kippenheim: Verlag Information, 1998.
3. Jurecki R. S., *Modelowanie zachowania kierowcy w sytuacjach przedwypadkowych*. Rozprawa doktorska, Politechniki Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Kielce, 2005.
4. Jurecki R., Stańczyk T. L., *Driver model for the analysis of pre-accident situations*. *Vehicle System Dynamics* 2009, No. 47 (5).
5. Lanzendoerfer J., Szczepaniak C., *Teoria ruchu samochodu*. WKŁ, Warszawa, 1980.
6. Mitschke M., *Dynamika samochodu*, t. 1. *Napęd i hamowanie*. WKŁ, Warszawa, 1987.
7. Prochowski L., *Pojazdy samochodowe. Mechanika ruchu*. WKŁ, Warszawa, 2005.
8. Stańczyk T. L., Jurecki R., *Fahrereaktionszeiten in Unfallrisikosituationen – neue Fahrbahn- und Fahr Simulatorversuche*, *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 2008, No. 07-08.
9. Stańczyk T. L., Lozia Z., Pieniążek W., Jurecki R. S., *Badania reakcji kierowców w symulowanych sytuacjach wypadkowych*, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2010, nr 77.
10. Stańczyk T. L., Jurecki R., Pieniążek W., Jaśkiewicz M., Karendal M.P., Wolak S., *Badania reakcji kierowców na pojazd wyjeżdżający z prawej strony, realizowane na torze samochodowym*. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, 2010, nr 77.

### *Autorzy:*

dr hab. inż. **Tomasz L. Stańczyk**, prof. PŚk – Politechnika Świętokrzyska  
dr inż. **Rafał S. Jurecki** – Politechnika Świętokrzyska  
dr inż. **Stanisław Walczak** – Politechnika Krakowska  
dr inż. **Wiesław Pieniążek** – Politechnika Krakowska