

Próba oceny dokładności rekonstrukcji parametrów hamowania samochodu na podstawie przeprowadzonych prób drogowych

MAREK GUZEK¹, WIESŁAW PIENIAŻEK²

¹Politechnika Warszawska ²Politechnika Krakowska

W pracy zostały przedstawione wyniki rekonstrukcji prędkości początkowej i drogi hamowania samochodu ciężarowego kategorii N3. Parametry te zostały wyznaczone na podstawie danych zgromadzonych podczas prób drogowych. Porównano je z wynikami uzyskanymi na podstawie symulowanych zapisów „czarnych skrzynek” typu ADR1 i ADR2, różniących się liczbą rejestrowanych parametrów. Porównanie umożliwiło oszacowanie błędu rekonstrukcji w stosunku do danych z rzeczywistych prób drogowych. Błąd rekonstrukcji, przeprowadzonej wg przedstawionej procedury, jest niewielki i wynosi kilka procent, przy czym dla bardziej zaawansowanego urządzenia ADR1 jest znacznie mniejszy.

1. Wstęp

W procedurze prokuratorskiej i sądowej, dotyczącej ustalenia i orzekania winy w wypadkach drogowych, ważnym elementem są opinie rekonstrukcyjne wykonywane przez biegłych lub instytuty naukowe.

W celu ułatwienia tego procesu od wielu lat są proponowane samochodowe „czarne skrzynki”, znane pod nazwą UDS lub ADR, które powinny być wprowadzone prawnie, w pierwszej kolejności, do pojazdów komunikacji zbiorowej. Urządzenia te rejestrują wybrane parametry kinematyczne ruchu samochodu (przyspieszenia, kąty położenia nadwozia lub odpowiadające im prędkości kątowe), a także aktywność kierowcy (np. używanie oświetlenia zewnętrznego) oraz stan otoczenia (np. temperaturę, wilgotność). Zapisy te umożliwiają i znacznie ułatwiają rekonstrukcję zaistniałego wypadku drogowego. Zakres działania tych urządzeń (liczba i rodzaj rejestrowanych wielkości, czas, sposób i częstotliwość rejestracji) są różne (por. np. [1]). Prostsze rejestrują dwa przyspieszenia liniowe (wzdłużne i poprzeczne) oraz kąt odchylenia (ten typ w dalszej części nazwano ADR2). Bardziej zaawansowane, rejestrują dodatkowo przyspieszenie „pionowe” oraz dwa kąty przechyłów: poprzeczny i podłużny (ten typ w dalszej części został nazwany ADR1).

Dotychczas opublikowano kilka prac na temat dokładności rekonstrukcji ruchu samochodu, wykonane na podstawie zapisów realizowanych w tego rodzaju

urządzeniach (np. [2, 3]). Ich autorzy opierali się głównie na obliczeniach symulacyjnych.

Obecnie zostaną przedstawione wyniki obliczeń wykonanych na podstawie danych zgromadzonych podczas badań drogowych, w których wykorzystano zaawansowaną „czarną skrzynkę” w postaci zintegrowanego urządzenia Crossbow (rys. 1.), umożliwiającego ciągłą rejestrację ośmiu parametrów, w tym wszystkie wymienione wyżej, z dokładnością znacznie przewyższającą standardowe urządzenia tego typu.

W pracy zostaną pokazane wyniki badań hamowania prostoliniowego, jako najbardziej istotnego z punktu widzenia potrzeb sądów. Zilustrują one, z jakimi błędami można się liczyć przy rekonstrukcji ruchu pojazdu: jego prędkości i drogi hamowania na podstawie wielkości rejestrowanych przez urządzenia typu ADR1 i ADR2.

2. Przebieg badań

Obiektem badań był samochód ciężarowy kategorii N3, o długości 11 m i rozstawie osi 3,9 m. Masa badawcza, wynikająca z masy własnej oraz obciążenia dwiema osobami i aparaturą, wynosiła 5330 kg, z rozkładem na oś przednią / tylną wynoszącym 2278 / 3052 kg. Samochód był wyposażony w ogumienie o rozmiarach 285/70 R 22,5, z ciśnieniem wewnętrznym w kołach przednich i tylnych 5,0 barów.

W ramach programu badań, oprócz prostoliniowego hamowania przeprowadzono także szereg innych prób (ustaloną jazdę po okręgu, badanie reakcji na wymuszenie skokowe obrotem kierownicy, pojedynczą i podwójną zmianę pasa ruchu oraz wejście w zakręt o promieniu 35m), pozwalających na ocenę stateczności i kierowności badanego pojazdu.

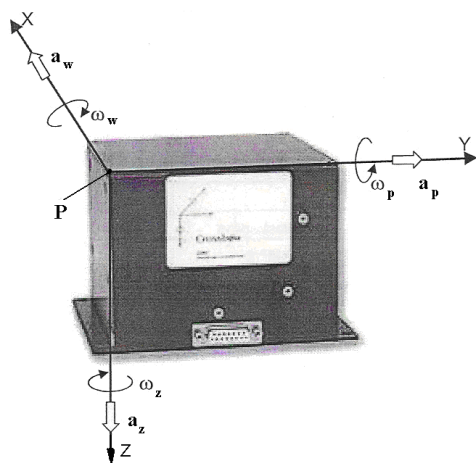
Samochód był wyposażony w odpowiednią aparaturę i urządzenia. Oprócz wspomnianego już urządzenia Crossbow zastosowano dwuparametrową głowicę systemu Correvit S-CE, do bezstykowego pomiaru składowych wektora prędkości wybranego punktu ramy pojazdu, trzy głowice systemu Correvit H, do bezstykowego pomiaru odległości od jezdni trzech wybranych punktów ramy i inne. Zmierzone odległości od jezdni umożliwiały później wyznaczenie kątów przechyłu samochodu (metodą wykorzystującą własności ogólnego równania płaszczyzny, przechodzącej przez trzy punkty[5]).

W sumie mierzono i rejestrowano kilkanaście wielkości, w tym trzy składowe wektora przyspieszenia i trzy prędkości kątowe wymienione w poprzednim rozdziale przy opisie urządzenia ADR1.

Wykorzystywane urządzenie Crossbow jest analogią „czarnych skrzynek” typu ADR1. Różnica polega na dokładności mierzonych parametrów. Jeśli w standardowych „czarnych skrzynekach” podawany błąd pomiaru przyspieszeń i kątów (prędkości kątowych) jest mniejszy od 5%, to w zastosowanym urządzeniu Crossbow błąd pomiaru wszystkich wielkości jest mniejszy od 1%.

Badania hamowania prostoliniowego przeprowadzono na jezdni suchej z nawierzchnią asfaltową o współczynniku przyczepności większym od 0,7. Samochód hamował na odpowiednio wyznaczonym odcinku. Początek tego odcinka był ozna-

czony umieszczoną poprzecznie do toru beleczką o przekroju poprzecznym $50 \times 50 \text{ mm}$ i długości odpowiednio mniejszej niż prześwit pomiędzy wewnętrznymi powierzchniami opon kół. O taką „przeszkodę” zaczepiał wysięgnik przetwornika dającego sygnał w postaci „piku” napięcia. Droga hamowania była mierzona od tej przeszkody do środka śladu styku koła przedniego z jezdnią, za pomocą wózka pomiarowego z dokładnością do $0,05 \text{ m}$ (rys. 2).



Rys. 1. Zintegrowane urządzenie Crossbow z przetwornikami przyspieszeń liniowych i giroskopami laserowymi.

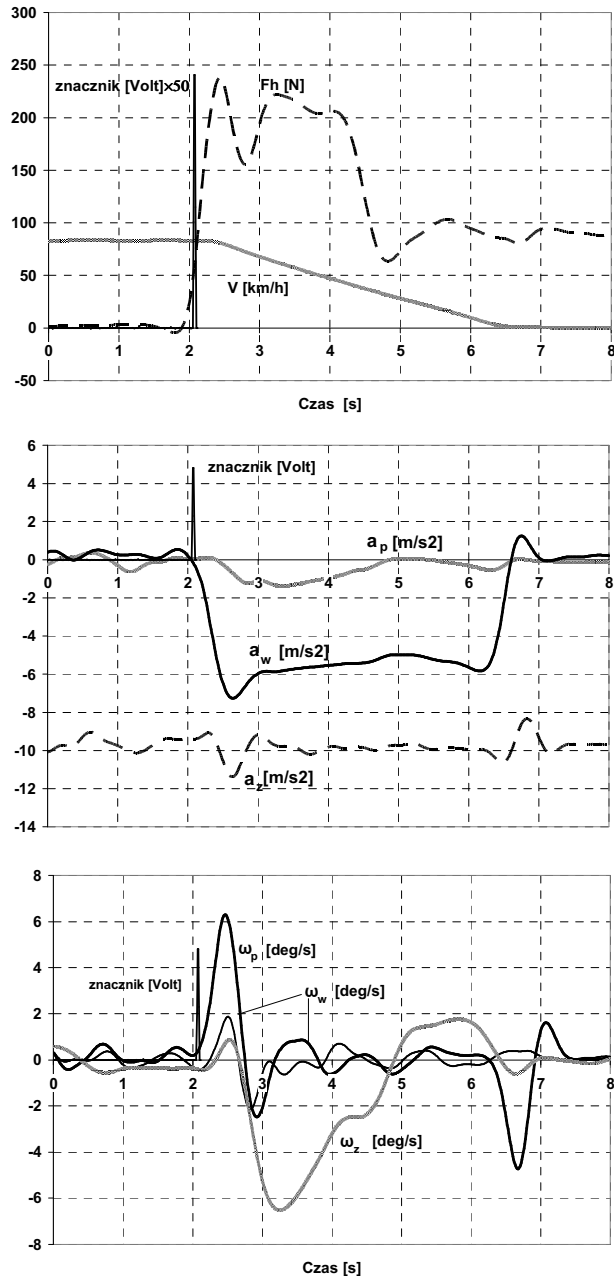
Fig. 1. Crossbow apparatus with linear accelerations transducers and laser gyroscopes.



Rys. 2. Pomiar długości śladu hamowania samochodu ciężarowego za pomocą wózka pomiarowego.

Fig. 2. The measurement of truck braking distance with help of measuring trolley.

Przykładowe zapisy sygnałów uzyskanych podczas badań są pokazane na rysunku 3.



Rys. 3. Przykład zarejestrowanych sygnałów (Fh – siła nacisku na pedał hamulca, V – prędkość pojazdu, a_w , a_p , a_z , ω_w , ω_p , ω_z – mierzone przez urządzenie Crossbow przyspieszenia i prędkości kątowe względem osi urządzenia).

Fig. 3. Exemplary runs of recorded signals (Fh – brake pedal force, V – vehicle velocity, a_w , a_p , a_z , longitudinal, lateral and vertical components of acceleration, ω_w , ω_p , ω_z – pitch, lateral and yaw angular velocities, “czas” – time, “znacznik” – marker of test start registration).

3. Rekonstrukcja parametrów hamowania

Rekonstrukcję przeprowadzono metodą podobną do metody symulacyjnej przedstawionej szczegółowo w literaturze [2]. Wykorzystując odpowiednie algorytmy (model MPD - rys. 4) dane z „czarnej skrzynki”, przetwarzano je tak, aby uzyskać zrekonstruowane parametry ruchu samochodu, tzn. przebiegi czasowe przemieszczeń i prędkości pojazdu (wybranego punktu nadwozia pojazdu).

W przypadku prezentowanych dalej wyników przyjęto, że ADR rejestruje przyspieszenia liniowe i kąty orientacji nadwozia:

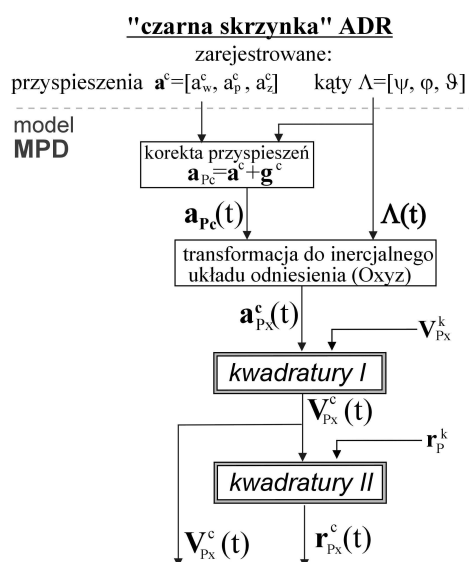
▪ $a_w^c, a_p^c, a_z^c, \psi, \varphi, \vartheta$ - w przypadku urządzenia ADR1,

▪ a_w^c, a_p^c, ψ - w przypadku urządzenia ADR2,

gdzie: a_w^c, a_p^c, a_z^c - przyspieszenia wzdłużne, poprzeczne i pionowe zarejestrowane przez urządzenie Crossbow,

ψ - kąt odchylenia określony jako całka prędkości odchylenia ω_z zarejestrowanej przez urządzenie Crossbow,

φ, ϑ - kąty przechyłu wzdłużnego i boczno określone na podstawie pomiarów odległości wybranych punktów od jezdni głowicami Correvit H.



Rys. 4. Schemat blokowy przetwarzania danych: $\mathbf{a}_x, \mathbf{V}_x, \mathbf{r}_x$ - wektory przyspieszenia, prędkości, położenia w związanym z drogą inercyjnym układzie odniesienia Oxyz; $\mathbf{V}^k, \mathbf{r}^k$ - prędkość i położenie końcowe; indeks P - oznacza wartości dla punktu P mocowania czujników ADR.

Fig. 4. Block diagram of data elaboration. $\mathbf{a}_x, \mathbf{V}_x, \mathbf{r}_x$ - vectors of acceleration, velocity and position in the earth-fixed co-ordinate system Oxyz; $\mathbf{V}^k, \mathbf{r}^k$ - final value of velocity and position.; index P - denotes the value for point P in which ADR is fixed.

Porównanie przebiegów czasowych wybranej wielkości, zarejestrowanej w czasie pomiarów i obliczonej na podstawie opisanej wyżej symulacji zapisów ADR, pozwoliło na ocenę dokładności rekonstrukcji ruchu badanego samochodu.

Wskaźnikiem oceny był błąd (bezwzględny oraz względny) obliczony w stosunku do wyników uzyskanych w badaniach drogowych. Błąd bezwzględny danego parametru zdefiniowano jako różnicę między wartością określoną za pomocą ADR (w badaniach było to urządzenie Crossbow) a określoną w badaniach drogowych.

Przetwarzanie danych, według modelu MPD [2, 3], odbywało się według analogicznej procedury jak w obliczeniach symulacyjnych (rys. 4).

W pierwszym etapie dokonywano korekty przyspieszenia. Wynikało to z faktu, że czujniki poza rzeczywistą wartością przyspieszenia, „wychwytywały” również składowe przyspieszenia ziemskiego przypadające na oś czujnika.

Wektory \mathbf{a}_c , \mathbf{a}_{pc} , \mathbf{g}_c są zdefiniowane w układzie związanym z urządzeniem Crossbow i oznaczają:

$\mathbf{a}^c = [a_w^c, a_p^c, a_z^c]$ - wektor zarejestrowanych przyspieszeń punktu P (wskazania czujników),

$\mathbf{a}_{pc} = [a_w, a_p, a_z]$ - wektor przyspieszeń punktu P (wartość „rzeczywista”)

$\mathbf{g}_c = [g_w, g_p, g_z]$ - wektor przyspieszenia ziemskiego,

$$\mathbf{g}_c = [g \cdot \sin\varphi, -g \cdot \sin\varphi \cdot \cos\vartheta, -g \cdot \cos\varphi \cdot \sin\vartheta]^T, \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

Warto przypomnieć w tym miejscu, że w przypadku urządzenia typu ADR2 nie są znane kąty przechyłów bryły nadwozia. Zatem wartość korekty jest równa zero (patrz opis \mathbf{g}_c), a przyjmowane do dalszych obliczeń wartości przyspieszeń punktu P (mocowania „czarnej skrzynki”) są równe wartościom zarejestrowanym ($\mathbf{a}_{pc} = \mathbf{a}^c$).

Sama rekonstrukcja ruchu polegała, przede wszystkim, na całkowaniu przyspieszeń. Sposób przetwarzania zarejestrowanych danych zależy od rodzaju ADR. W przypadku znajomości wszystkich kątów opisujących położenie bryły nadwozia, do zrekonstruowania ruchu pojazdu niezbędne są dwa „poziomy” kwadratury. Pierwszy, umożliwia uzyskanie prędkości z przyspieszeń, zaś drugi – przemieszczenia z prędkości. Całkowanie wykonywano wykorzystując kwadratury Newtona-Cotesa. Podlegały im przebiegi zorientowane względem inercjalnego układu odniesienia – związanego z drogą; Oxyz. Pełny opis matematyczny elementów zastosowanej procedury obliczeń znajduje się np. w pozycjach [2, 3]. W pozycji [4] umieszczony jest uproszczony opis, przydatny dla analizy w przypadku ruchu prostoliniowego pojazdu.

4. Prezentacja i analiza wyników

Dla uproszczenia, w pracy został przeanalizowany ruch punktu nadwozia odpowiadający usytuowaniu urządzenia Crossbow. Nie było zatem potrzeby zastosowania pełnej procedury, między innymi transformacji (redukcji) wartości parametrów do innych punktów nadwozia.

Analizę przeprowadzano dla „odcinka pomiarowego”: między chwilą początkową - określoną „pikiem” napięcia w urządzeniu rejestrującym, pochodzącym od znacznika (określony punkt nadwozia znajdował się wówczas nad przeszkodą – belką na drodze), a chwilą końcową, w której pojazd zatrzymał się. W wyniku analizy wyznaczono

no prędkość pojazdu w chwili początkowej (nazywanej w dalszej części prędkością początkową V_0) oraz drogę przebytą w czasie określonym wyżej, którą umownie nazwano drogą hamowania S_h . Wyniki otrzymane na podstawie zapisów urządzeń ADR były następnie porównywane ze zmierzonymi w czasie badań.

Z doświadczeń zdobytych przy podobnej analizie przeprowadzonej dla samochodu osobowego [4] wynikało, że przed przystąpieniem do procedur obliczeniowych opisanych w poprzednim rozdziale, należało dokonać dodatkowej korekty przyspieszeń. Brak takiej korekty (w [4]) powodował, że wyniki (zrekonstruowane prędkość początkowa i droga hamowania) były zawyżone nawet o kilkanaście procent. Przyczyny zlokalizowano w „nieidealnym” usytuowaniu osi czujników „czarnej skrzynki”. Objawiało się to tym, że w ostatniej fazie rejestracji, tzn. dla okresu, gdy pojazd był już zatrzymany ($V=0$), mierzone wartości przyspieszenia wzdłużnego różniły się, nieco, od zera.

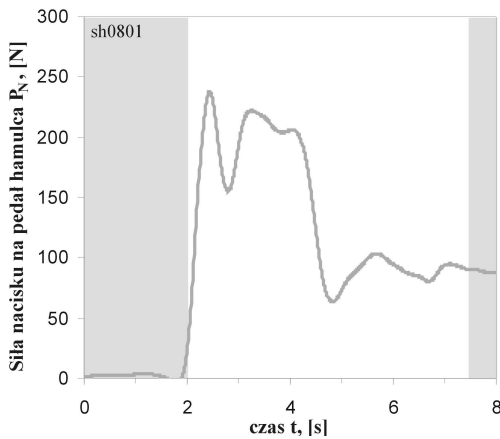
Przeanalizowano przyczyny takiej niedokładności. Można przyjąć, że jest to spowodowane niezerową wartością przechyłu podłużnego nadwozia w tym okresie, wskutek czego przetwornik przyspieszenia mierzył dodatkowo składową przyspieszenia ziemskiego „g” (ale ten element jest uwzględniany w procedurze obliczeniowej (rys. 4). Stwierdzony błąd może być także wynikiem poziomowania przetworników przyspieszenia przy innym ustawieniu kątowym bryły nadwozia względem jezdni. Pewną rolę odgrywać może też tarcie w zawieszeniu (szczególnie dla samochodu z zawieszeniem na standardowych resorach piórowych), stan obciążenia i inne. Wymienione przyczyny błędu można zatem wiązać z orientacją osi przetworników względem pojazdu oraz drogi. Inne przyczyny (np. błędy aparatury rejestrującej) wydają się mało prawdopodobne i nie były brane pod uwagę. Opisany wcześniej błąd potraktowano dalej jako stały. Jego wartość można oszacować poprzez porównanie wartości wskazań czujnika przyspieszenia z wartością składowej przyspieszenia ziemskiego przypadającej na oś czujnika (szczegółowy opis sposobu oszacowania błędu można znaleźć w [4]).

Po uwzględnieniu tego stałego błędu dokonano obliczeń według opisanej wcześniej procedury dla kilku prób hamowania, różniących się prędkością początkową oraz intensywnością hamowania.

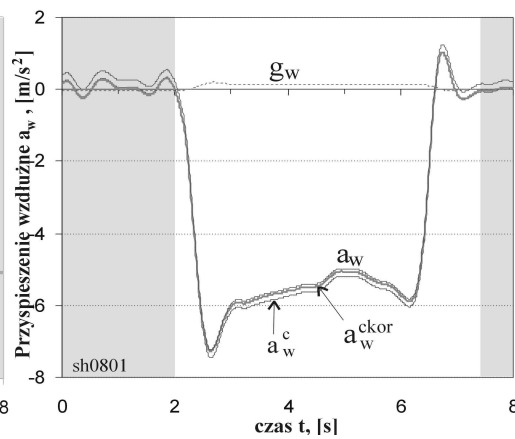
Na rysunkach 5÷8 przedstawiono czasowe przebiegi ilustrujące jedną z tych prób (wybrane wielkości zarejestrowane dla tej próby zostały pokazane na rys. 3). Jasnym tłem wyróżniono okres odpowiadający odcinkowi pomiarowemu. Rysunek 5 ilustruje przebieg siły nacisku na pedał hamulca. Na rysunku 6 znajdują się przebiegi przyspieszenia wzdłużnego: rejestrowanego w urządzeniu Crossbow a_w^c , skorygowanego o błąd stały a_w^{ckor} i określonego na podstawie a_w^{ckor} przyspieszenia punktu P mocowania urządzenia Crossbow a_w (uwzględniono tutaj korektę uwzględniającą składową przyspieszenia ziemskiego przypadającą na oś czujnika; przebieg tej składowej – g_w , jest również pokazany na rysunku). Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono rekonstrukcję prędkości punktu P pojazdu i jego położenia na drodze (wykonaną od chwili końcowej). Widoczne różnice w chwili początkowej prędkości (względem wartości zmierzonej V_L) oraz położenia na drodze (początkowe położenie to $x=0$) ilustrują błędy

rekonstrukcji dla obu typów urządzeń. Z przeprowadzonego porównania wynika, że przy zastosowaniu urządzenia ADR2, wartości wyznaczonego błędu względnego prędkości początkowej i drogi hamowania są niewielkie. W przedstawionych próbach wynosiły one maksymalnie: odpowiednio 6,7% oraz 4%. Dla urządzenia ADR1 błąd jest znacznie mniejszy. Wynosił on maksymalnie (co do modułu) 4,1% w przypadku prędkości początkowej oraz -1,4%, w przypadku drogi hamowania.

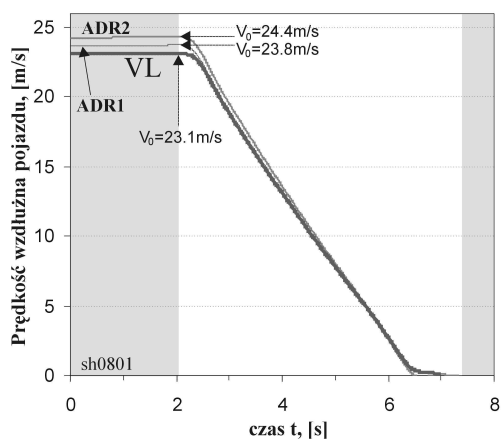
W tabeli 1 zestawiono wyniki analogicznych obliczeń także dla innych prób wykonanych dla samochodu częściowo obciążonego. Dla przejrzystości porównania, błędy względne prędkości początkowej i drogi hamowania (kolumny 8 i 11 tab. 1) pokazano na wykresie słupkowym na rysunku 9.



Rys. 5. Przebieg siły nacisku na pedał hamulca.
Fig. 5. Run of the brake pedal force.

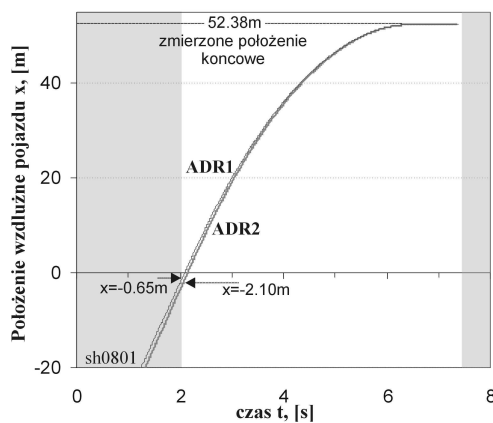


Rys. 6. Przebiegi przyspieszenia wzdłużnego przed i po korekcie.
Fig. 6. Runs of longitudinal component of acceleration before and after correction.



Rys. 7. Efekty rekonstrukcji początkowej prędkości hamowania.

Fig. 7. Reconstruction results for initial velocity of braking.



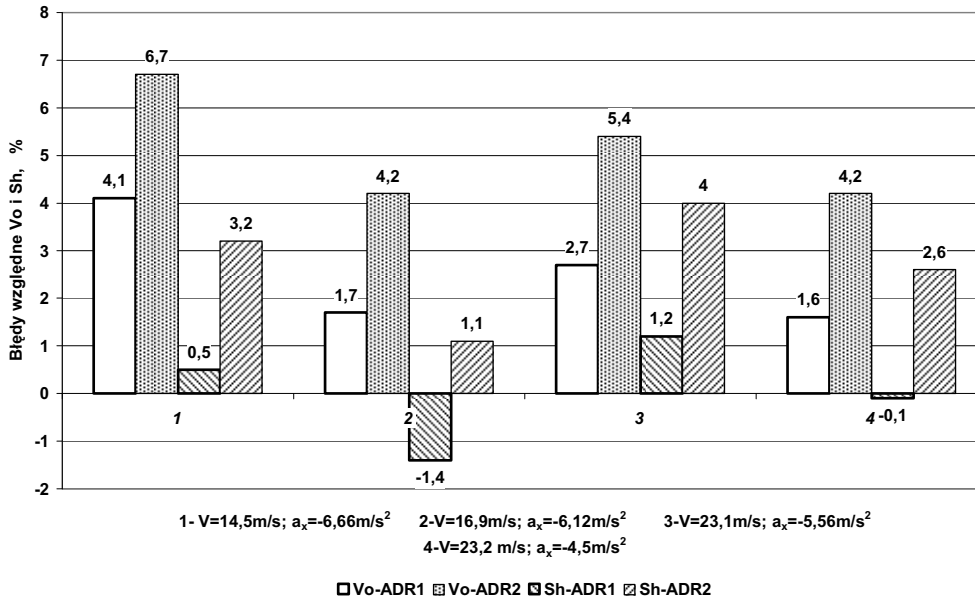
Rys. 8. Droga hamowania dla obu typów ADR.

Fig. 8. Braking distance for both type of ADR.

Tabela 1. Wyniki rekonstrukcji dla samochodu obciążonego masą własną, 2 osobami i aparaturą.

Table 2. Reconstruction results for vehicle loaded with 2 person and measuring equipment.

		Pomiar		Rekonstrukcja						
Próba/wielkość		VL	S	Typ ADR	Prędkości początkowej			Drogi hamowania		
ozn.	Opis	V_0 m/s	S_h m		V_0 m/s	ΔV_0 m/s	$\Delta V_0 / V_0$ %	S_h m	ΔS_h m	$\Delta S_h / S_h$ %
sh0503	V=50km/h, 2oap, $a_w \approx -6,66m/s^2$	14,48	20,98	ADR1	15,07	0,59	4,1	21,08	0,10	0,5
				ADR2	15,45	0,98	6,7	21,65	0,67	3,2
sh0602	V=60km/h, 2oap, $a_w \approx -6,12m/s^2$	16,85	25,79	ADR1	17,13	0,28	1,7	25,43	-0,36	-1,4
				ADR2	17,55	0,70	4,2	26,09	0,30	1,1
sh0801	V=80km/h, 2oap, $a_w \approx -5,56m/s^2$	23,13	52,38	ADR1	23,76	0,63	2,7	53,03	0,65	1,2
				ADR2	24,38	1,25	5,4	54,48	2,10	4,0
sh0802	V=80m/h, 2oap, $a_w \approx -4,50m/s^2$	23,24	56,98	ADR1	23,62	0,38	1,6	56,95	-0,03	-0,1
				ADR2	24,23	0,98	4,2	58,48	1,50	2,6



Rys. 9. Porównanie błędów względnych rekonstruowanej prędkości początkowej hamowania dla prób z różnymi prędkościami początkowymi $V=VL$, zmierzonymi przyrządem Correvit S-CE.

Fig. 9. The comparison of reconstruction relative error for initial braking velocity of tests with various velocities $V=VL$ which were measured by Correvit S-CE sensor.

5. Podsumowanie i wnioski

Jak to wynika z przedstawionych danych liczbowych oraz z przeprowadzonej analizy, przy zastosowaniu mniej zaawansowanego urządzenia ADR2 wartości wyznaczonego błędu względnego prędkości początkowej i drogi hamowania są niewielkie. Wydaje się, że uzyskany poziom błędów powinien być zadawalający z punktu widzenia potrzeb procedury sądowej. Wymaga on jednak weryfikacji dla innych stanów eksploatacyjnych pojazdu. Chodzi tu głównie o obciążenie pojazdu, które może wpływać na inne ustawienie osi czujników względem drogi.

Urządzenie typu ADR1, umożliwiające pomiar i rejestrację 6 wielkości kinematycznych pojazdu, pozwala na uzyskanie znacznie mniejszego błędu rekonstrukcji. Byłoby korzystne zainteresowanie wynikami producentów „czarnych skrzynek”, co mogłoby ich skłonić do podjęcia odpowiednich kroków w kierunku istotnym dla obniżenia ceny urządzenia, a to z kolei umożliwiłoby upowszechnienie, a może nawet zamianę „czarnych skrzynek” typu ADR2 na ADR1.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003÷2006 jako projekt badawczy Nr 5T12C01124.

Literatura

- [1] MENIG P., COVERDILL C.: *Transportation Recorders on Commercial Vehicles*. Proceedings of the NTSB International Symposium on Transportation Recorders. May 3÷5, 1999.
- [2] GUZEK M.: *Metody wyznaczania błędów obliczeń w analizie wybranych sytuacji przedwy-padkowych w ruchu drogowym*. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Wydział Transportu. Warszawa 2002.
- [3] GUZEK M., LOZIA Z.: *Rekonstrukcja trajektorii ruchu pojazdu na podstawie zapisów „czarnych skrzynek” - badania symulacyjne*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Wydział SiMR, Politechnika Warszawska, Zeszyt nr 2 (57)/2005.
- [4] GUZEK M., MANIOWSKI. M, PIENIAŻEK: W, *Rekonstrukcja parametrów ruchu samochodu w trakcie prostoliniowego hamowania z wykorzystaniem wyników badań eksperymental-nych*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Wydział SiMR, Politechnika Warszawska, Zeszyt nr 2 (57)/2005.
- [5] PIENIAŻEK W.: *Metoda wyznaczania kątów przechyłu samochodu przy pomocy głowic "H", urządzenia Correvit"*, (współautorzy J. Stawicki, P. Tajchman), Materiały Sympo-zjum NOT FSO, Mrągowo 1990.

An attempt to evaluation of reconstruction accuracy of car braking parameters on the basis of experimental tests

S u m m a r y

In this paper there have been compared the 'reconstruction' calculation of initial velocity and braking distance carried out on the basis of data from experimental tests of N3 class truck with results which can be obtained from two kinds of 'black boxes': ADR1 - measuring six kinematic parameters and ADR2 measuring only three kinematic parameters. The errors of such a reconstruction have been estimated. It follows from calculation that error is small. It is significantly smaller for ADR1 which is more advanced device.