

## SIMULATION OF NON-STEADY-STATE CURVILINEAR VEHICLE MOTION

Hubert Sar, Andrzej Reński

Warsaw University of Technology. Institute of Vehicles  
Narbutta Str. 84, 02-524 Warsaw  
tel.: +48 22 2348545, fax: +48 22 8490303  
e-mail: hubsar@wp.pl

### Abstract

The application of computer simulation in vehicle research is relatively cheap and rapid method of investigation of dynamic phenomena occurring in vehicle motion. The important problem in using this method is identification of vehicle model parameters.

The paper presents the results of road tests and computer simulations of selected maneuvers performed by vehicle. On the basis of road tests the side slip characteristics of front and rear axle of the vehicle were determined, both for steady-state and non-steady-state motion conditions.

The obtained slip characteristics were used in computer simulation of selected maneuvers especially maneuvers of high dynamics. The results of calculation and road tests are presented as a form of plots of vehicle yaw velocity and side slip angles of front and rear axle. The results of simulation using steady-state and non-steady-state slip characteristics were compared with the results of road tests. Significant differences between calculations obtained for steady-state and non-steady-state characteristics were noticed. On the basis of comparison of simulation results and road measurements it can be stated that the application of side slip characteristics determined in non-steady-state conditions instead of static characteristics, brings the results of simulation closer to the results of measurements. Furthermore, it can be stated that the application of side slip characteristics obtained in the steady-state conditions applied in simulation of non-steady-state maneuvers may lead to considerable differences between the results of measurements and simulation.

**Keywords:** vehicle dynamics, side slip, non-steady-state motion

## SYMULACJA NIEUSTALONEGO KRZYWOLINIOWEGO RUCHU SAMOCHODU

### Streszczenie

Zastosowanie symulacji komputerowej w badaniach pojazdów jest coraz bardziej rozpowszechnione jako względnie tanie i szybkie źródło wiedzy o zjawiskach dynamicznych występujących w ruchu samochodu. Istotnym ograniczeniem stosowania tej metody jest możliwość pozyskiwania danych do modelu obliczeniowego pojazdu.

W pracy przedstawione są wyniki badań drogowych oraz rezultaty symulacji komputerowej wybranych manewrów wykonywanych przez samochód. Na podstawie badań drogowych wyznaczono charakterystyki znoszenia kół przedniej i tylnej osi, przy czym charakterystyki wyznaczano zarówno dla ustalonych jak i nieustalonych stanów ruchu.

Otrzymane charakterystyki znoszenia wykorzystano następnie w obliczeniach symulacyjnych wybranych manewrów, szczególnie manewrów o dużej dynamice. Jako wyniki symulacji przedstawiono przebiegi prędkości kątowej samochodu względem jego osi pionowej oraz kątów znoszenia kół przedniej i tylnej osi. Wyniki symulacji uzyskane dla różnego rodzaju charakterystyk znoszenia porównano z wynikami uzyskanymi z rzeczywistych realizacji tych samych manewrów. Stwierdzono znaczne różnice pomiędzy wynikami obliczeń otrzymanymi dla charakterystyk ustalonego i nieustalonego znoszenia. Z porównania wyników symulacji z wynikami badań drogowych wynika, że zastosowanie charakterystyk znoszenia wyznaczonych w warunkach nieustalonych daje wyniki bliższe wynikom pomiarów niż w przypadku zastosowania charakterystyk statycznych. Wykazano, że stosowanie w obliczeniach symulacyjnych nieustalonych stanów ruchu charakterystyk opon otrzymanych w warunkach ustalonych może prowadzić do znacznych rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów a wynikami symulacji komputerowej.

**Słowa kluczowe:** dynamika ruchu samochodu, boczne znoszenie, nieustalony stan ruchu

## 1. Wstęp

Szczególnym problemem w przypadku bezpieczeństwa czynnego jest zachowanie się samochodu w warunkach niustalonego ruchu krzywoliniowego. Podczas wykonywania manewrów o znacznej dynamice mamy do czynienia z wieloma zjawiskami trudnymi do opisu ze względu na ich zmienność. Są to m.in. przechyły poprzeczne, zmienne kąty pochylenia kół, zmienne obciążenia normalne kół. Szczególnie istotnym w symulacji ruchu samochodu jest odpowiedni opis zjawiska bocznego znoszenia opon. Dokładny opis tego zjawiska dla danego samochodu wymaga dostępu do odpowiedniego stanowiska pomiarowego lub wykonania odpowiednich pomiarów drogowych samochodem wyposażonym w specjalne czujniki potrzebne do właściwego opisu bocznego znoszenia. Jednym z częściej stosowanych narzędzi matematycznych do opisu opon jest równanie *Magic Formula* Pacejki [5]. Przykładem badań stanowiskowych opon w stanie niustalonym mogą być wyniki zaprezentowane w pracy [2]. Badania stanowiskowe znoszenia niustalonego dają możliwość badania zjawiska tzw. nabiegania opon i związanej z tym zjawiskiem drogi nabiegania (z ang. *relaxation length*) [3, 4].

W publikacjach można spotkać się z różnymi opisami ruchu pojazdu. Zależy to od rodzaju badanego problemu i koniecznej do spełnienia dokładności analizy. Opracowanie jest wynikiem kontynuacji badań dotyczących opisu ruchu krzywoliniowego, przedstawionych w [8, 9]. Podobnie jak w poprzednich, również w tej pracy zastosowano płaski jednośladowy model pojazdu o dwóch stopniach swobody (tzw. „*bicycle model*”), dokładniej opisany w [7]. Jednym z najtrudniejszych problemów związanych z symulacją komputerową jest identyfikacja niektórych parametrów samochodu, jak np. charakterystyk opon, czy masowych momentów bezwładności.

W artykule pokazano wpływ różnych charakterystyk bocznego znoszenia na wyniki symulacji komputerowej ruchu samochodu. Charakterystyki te mogą być otrzymane jako wynik badania ruchu pojazdu w warunkach ustalonego lub niustalonego stanu ruchu. W niniejszym opracowaniu pokazano zarówno charakterystyki otrzymane w wyniku badania w stanie ustalonym, jak i niustalonym. W trakcie badań drogowych, podczas których pojazd wykonywał manewry o zróżnicowanej dynamice, mierzono i rejestrowano przyspieszenie poprzeczne, prędkość kątową względem pionowej osi pojazdu, kąty znoszenia osi oraz kąt obrotu kierownicy.

Ustalony stan ruchu realizowano poprzez jazdę po okręgu o promieniu około 20 metrów ze stałą dla danej próby prędkością podłużną, zgodnie z [10]. Takie manewry jak podwójna zmiana pasa ruchu (zgodnie z [11]), jazda slalomem reprezentowały z kolei niustalony stan ruchu samochodu. W wyniku pomiarów uzyskano zarówno dla ustalonego jak i niustalonego stanu ruchu charakterystyki znoszenia przedniej i tylnej osi w postaci zależności siły bocznej obciążającej daną oś od jej kąta znoszenia. Otrzymane w ten sposób charakterystyki ustalonego oraz niustalonego znoszenia, zostały następnie wykorzystane do symulacji komputerowej niustalonego ruchu krzywoliniowego.

## 2. Model pojazdu

Do matematycznego opisu ruchu krzywoliniowego pojazdu wybrano jednośladowy płaski model pojazdu (tzw. *bicycle model*), przedstawiony w [7]. Ruch samochodu jest tu opisany przez dwie współrzędne: przemieszczenie w kierunku osi  $y$  (w ruchomym układzie współrzędnych związanym z pojazdem) i kąt obrotu pojazdu  $\psi$  lub przez ich pochodne – prędkość poprzeczną  $\dot{y}$  i kątową  $\dot{\psi}$ .

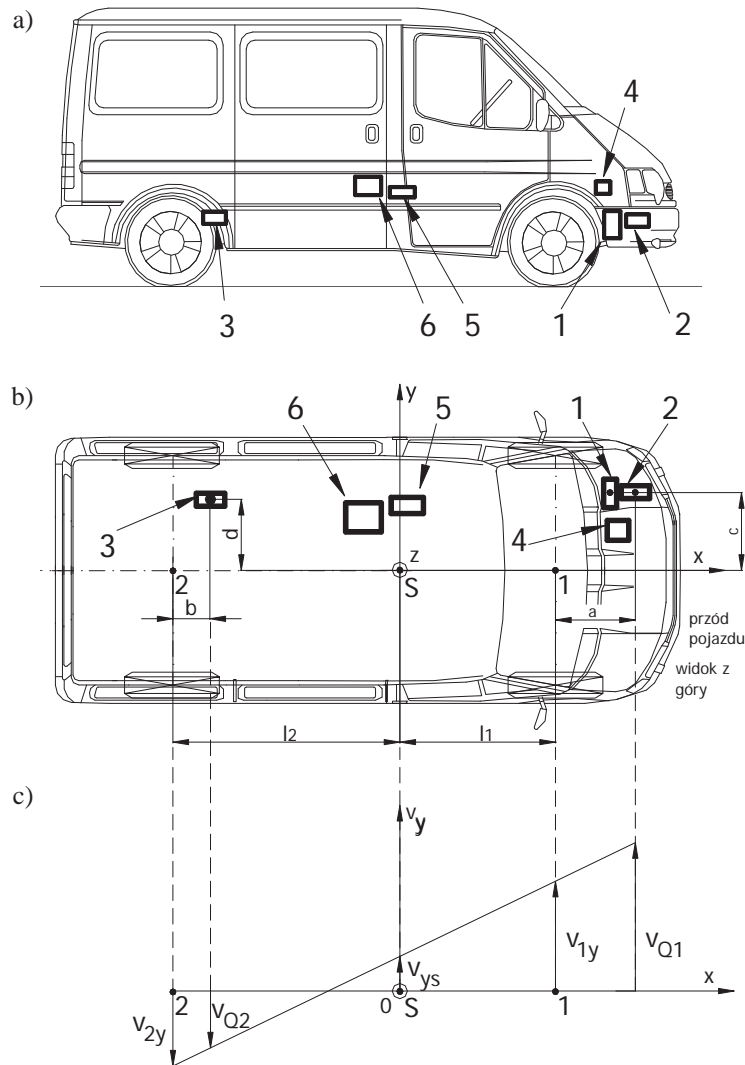
## 3. Aparatura pomiarowa

Obiektem badań był samochód Ford Transit. Pojazd ten został wyposażony w system pomiarowy opisany w [6], umożliwiający rejestrację sygnałów charakteryzujących ruch samochodu. Na Rys. 1 pokazano położenie czujników pomiarowych. W przedniej części nadwozia umieszczono czujniki

korelacyjno-optyczne Correvit-L do pomiaru prędkości wzdłużnej pojazdu (1) i Correvit-Q do pomiaru prędkości poprzecznej (2). Na wałku wejściowym przekładni kierowniczej zamontowano nadajnik kąta obrotu kierownicy (4). W tylnej części nadwozia umieszczono drugą głowicę Correvit-Q do pomiarów prędkości poprzecznej (3). We wnętrzu pojazdu zamontowano bezwładnościowy czujnik przyspieszeń poprzecznych (5) oraz 2 piezoelektryczne czujniki prędkości kątowej względem pionowej i podłużnej osi pojazdu (6).

Czujniki Correvit Q zamontowane w okolicach osi przedniej oraz tylnej dają możliwość pomiaru kątów znoszenia bocznego opon oraz prędkości kątowej:

$$\dot{\psi} = \frac{v_{1y} - v_{2y}}{l_1 + l_2} \quad (1)$$



Rys. 1. Rozmieszczenie elementów układu pomiarowego w samochodzie Ford Transit: a – widok z boku: głowica Correvit-L (1), głowica Correvit-Q przednia (2), głowica Correvit-Q tylna (3), nadajnik impulsowy kąta obrotu kierownicy (4), czujnik przyspieszeń poprzecznych (5), czujniki prędkości kątowej (6); b – widok z góry; c – rozkład prędkości poprzecznych:  $v_{Q1}$  – prędkość poprzeczna zmierzona czujnikiem Correvit Q1,  $v_{Q2}$  – prędkość poprzeczna zmierzona czujnikiem Correvit Q2,  $v_{1y}$  – prędkość poprzeczna osi przedniej,  $v_{2y}$  – prędkość poprzeczna osi tylnej,  $v_{ys}$  – prędkość poprzeczna środka masy samochodu

Fig. 1. Location of measurement system in Ford Transit: a – side view: Correvit-L sensor (1), Correvit-Q sensor – front (2), Correvit-Q sensor – rear (3), impulse transducer of steering wheel angle (4), lateral accelerations sensor (5), angular velocity sensors (6); b – upper view; c – the change of lateral velocities along the vehicle:  $v_{Q1}$  – lateral velocity measured by Correvit Q1,  $v_{Q2}$  – lateral velocity measured by Correvit Q2,  $v_{1y}$  – lateral velocity of front axle,  $v_{2y}$  – lateral velocity of rear axle,  $v_{ys}$  – lateral velocity of vehicle center of gravity

#### 4. Opis znoszenia bocznego opon

Do symulacji komputerowej ruchu samochodu wykorzystano różne charakterystyki znoszenia opon, reprezentujące zarówno ustalony oraz nieustalony stan ruchu krzywoliniowego. Charakterystyki reprezentują tu znoszenie pary opon danej osi.

Charakterystyki ustalonego znoszenia powstały poprzez analizę wyników pomiarów zarejestrowanych podczas ruchu samochodu po okręgu o stałym promieniu ( $R = 20$  m), z różnymi stałymi dla danej próby prędkościami, zgodnie z [10].

Charakterystyki nieustalonego znoszenia zostały wyznaczone na podstawie wyników pomiarów uzyskanych podczas jazdy slalomem lub podczas jazdy z szybkimi przypadkowymi zmianami kąta skrętu kół. W czasie tych manewrów starano się uzyskać możliwie duże wartości przyspieszenia poprzecznego. Również w tym przypadku dla każdej z tych prób utrzymywano stałą prędkość samochodu.

Zarówno dla ustalonego jak i nieustalonego stanu ruchu kąty znoszenia kół osi przedniej i tylnej zostały oszacowane na podstawie znajomości prędkości poprzecznych  $v_{1y}$  i  $v_{2y}$ , prędkości podłużnej  $v_x$  oraz kąta skrętu kół przednich  $\delta_1$ .

Mając oszacowaną na podstawie zmierzonego przyspieszenia poprzecznego siłę poprzeczną  $F_0$  działającą w środku masy samochodu oraz zakładając statyczny rozkład siły poprzecznej pomiędzy osie i jednocześnie uwzględniając wpływ zmian prędkości kątowej, można obliczyć siły poprzeczne obciążające przednią i tylną oś w następujący sposób:

$$Y_1 = \frac{F_0 l_2}{l_1 + l_2} + \frac{I_z \ddot{\psi}}{l_1 + l_2}, \quad (2)$$

$$Y_2 = \frac{F_0 l_1}{l_1 + l_2} - \frac{I_z \ddot{\psi}}{l_1 + l_2}, \quad (3)$$

gdzie:

$l_1, l_2$  - odległości środka masy odpowiednio od osi przedniej, tylnej,

$I_z$  - masowy moment bezwładności samochodu względem pionowej osi z,

$\ddot{\psi}$  - przyspieszenie kątowe samochodu względem osi pionowej z.

Kąty znoszenia osi przedniej oraz tylnej wyznaczono według poniższych zależności:

$$\alpha_1 = \delta_1 - \arctg \frac{v_{1y}}{v_x}, \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \delta_2 + \arctg \frac{v_{2y}}{v_x}. \quad (5)$$

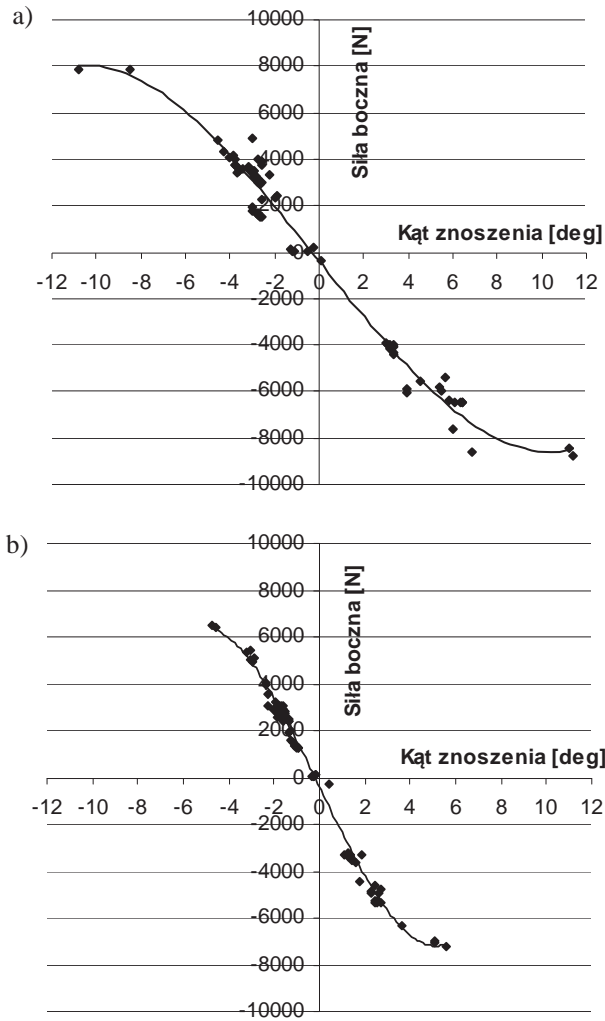
#### 5. Charakterystyki znoszenia w ustalonym stanie ruchu

Na Rys. 2 pokazano charakterystyki znoszenia w ustalonym stanie ruchu dla osi przedniej oraz tylnej. Wyraźnie widać na nich nasycenie siły poprzecznej związane z poślizgiem poprzecznym danej osi.

#### 6. Charakterystyki znoszenia w nieustalonym stanie ruchu

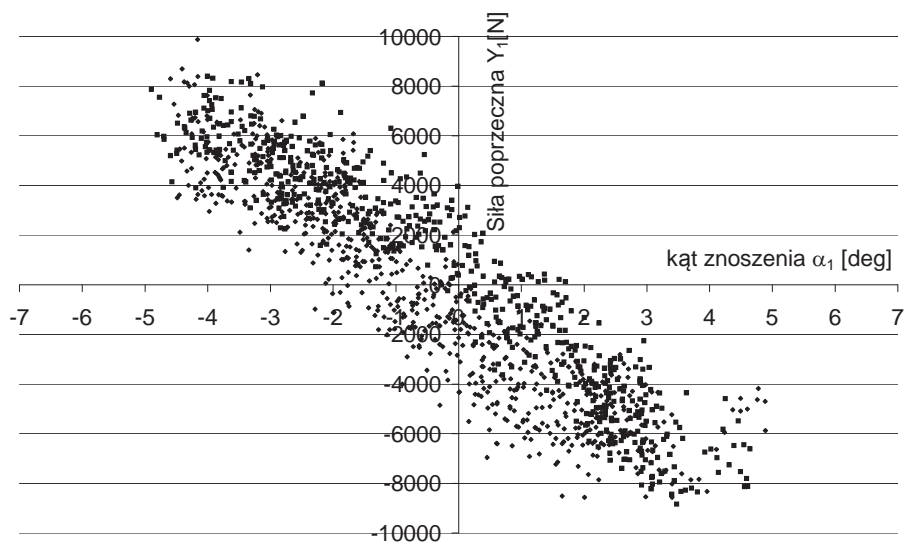
Nieustalony stan ruchu krzywoliniowego samochodu może wymagać bardziej skomplikowanych charakterystyk znoszenia.

Wyniki badań drogowych w stanie nieustalonym jako zależność siły poprzecznej od kąta znoszenia charakteryzowały się znacznym rozrzutem punktów pomiarowych, co pokazano na przykładzie osi przedniej na Rys. 3.



Rys. 2. Przebieg siły poprzecznej oddziałującej na oś samochodu ford transit w funkcji kąta bocznego znoszenia danej osi w stanach ustalonych – (opony 185R14C): a) oś przednia, b) oś tylna

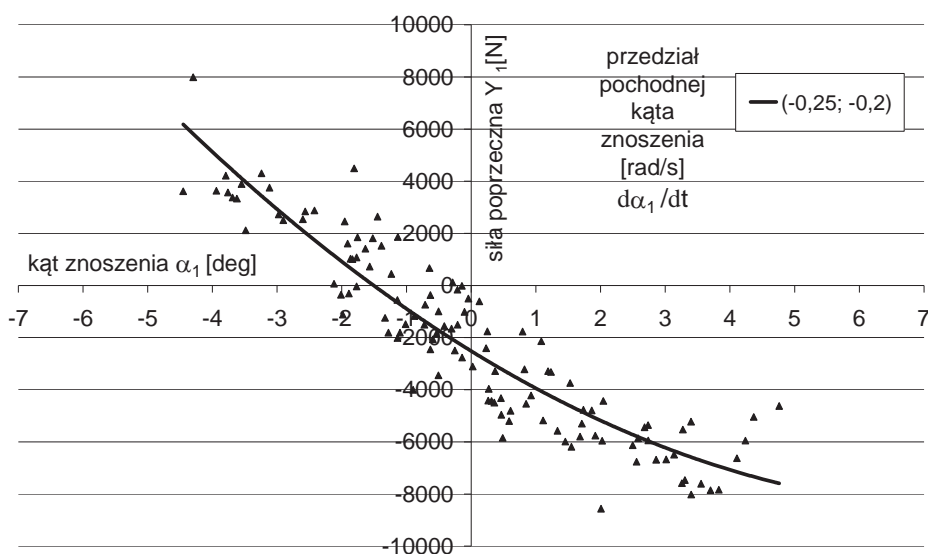
Fig. 2. Tyres characteristics of axle – ford transit in steady-state conditions (tyres 185R14C): a) front axle, b) rear axle



Rys. 3. Wyniki pomiarów siły poprzecznej w funkcji kąta znoszenia dla osi przedniej (ford transit, opony 185R14C, statyczne pionowe obciążenie osi przedniej 10,2 kN)

Fig. 3. Results of measurement of lateral force as a function of side slip for front axle (ford transit, tyres 185R14C, static vertical axle load 10.2 kN)

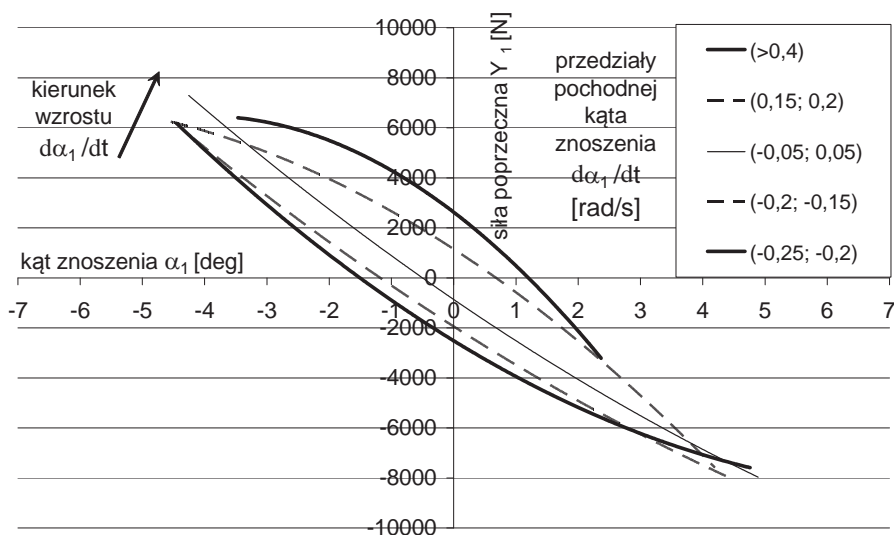
W celu wykorzystania tych wyników badań do symulacji komputerowej, dokonano segregacji tych wyników względem prędkości kąta znoszenia. Dla każdego z przyjętych przedziałów  $d\alpha_1/dt$  dokonano aproksymacji wielomianem. Przykład takiej aproksymacji pokazano na Rys. 4.



Rys. 4. Przykład wyznaczania charakterystyki niestabilnego znoszenia bocznego dla wybranego przedziału pochodnej kąta znoszenia opon osi przedniej samochodu:  $-0,25 \text{ [rad/s]} < d\alpha_1/dt < -0,20 \text{ [rad/s]}$  (ford transit, opony 185R14C, statyczne pionowe obciążenie osi przedniej 10,2 kN)

Fig. 4. Example of non-steady-state front axle tyres slip characteristic determining for selected range of slip angle derivative:  $-0.25 \text{ [rad/s]} < d\alpha_1/dt < -0.20 \text{ [rad/s]}$  (ford transit, tyres 185R14C, static vertical axle load 10.2 kN)

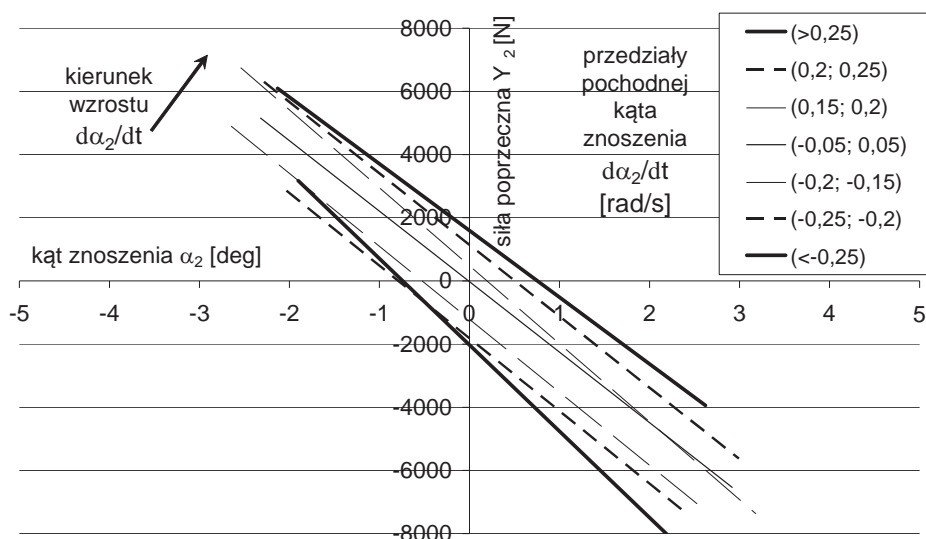
Na Rys. 5 pokazano otrzymane w ten sposób charakterystyki znoszenia w niestabilnym stanie ruchu, a na Rys. 6 podobne charakterystyki dla osi tylnej.



Rys. 5. Charakterystyki niestabilnego znoszenia bocznego opony osi przedniej – aproksymacja wielomianami 2. stopnia – (ford transit, opony 185R14C, statyczne pionowe obciążenie osi przedniej 10,2 kN)

Fig. 5. Non-steady-state front axle tyres slip characteristics – approximation by second degree polynomials – (ford transit, tyres 185R14C, static vertical axle load 10.2 kN)

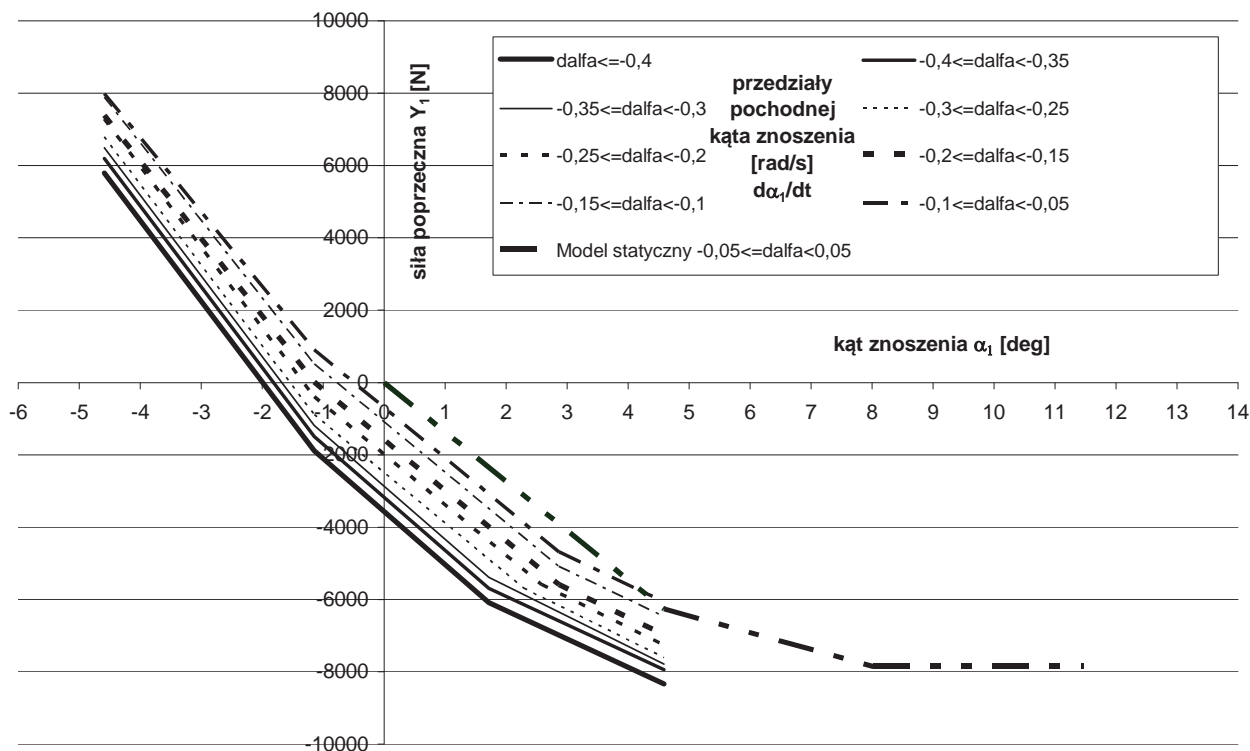
Dodatkowo w artykule pokazano pewne wyidealizowane charakterystyki znoszenia bocznego, w postaci wielu różnych funkcji łamanych (oś przednia) oraz liniowych (oś tylna). Powstały one poprzez pewną analogię do charakterystyk z Rys. 5 oraz 6, wynikających bezpośrednio z aproksymacji wyników badań.



Rys. 6. Charakterystyki nieustalonego znoszenia boczno opony osi tylnej – aproksymacja funkcjami liniowymi – (ford transit, opony 185R14C, statyczne pionowe obciążenie osi przedniej 10,2 kN)

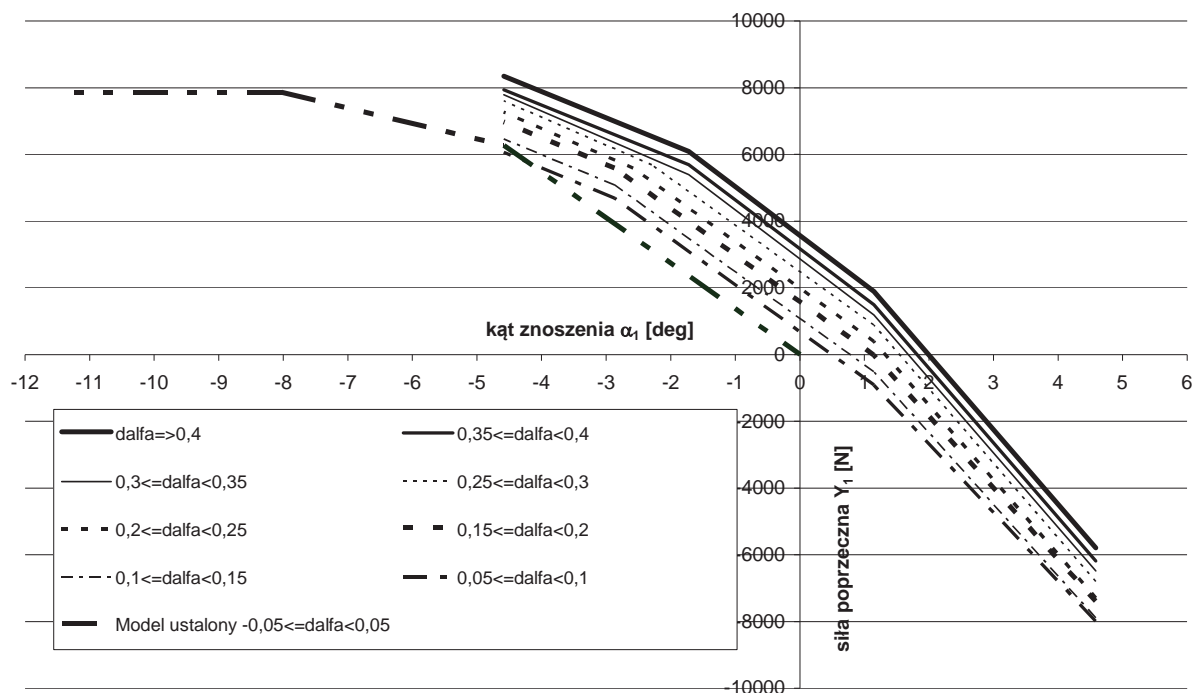
Fig. 6. Non-steady-state rear axle tyres slip characteristics – approximation by linear functions – (ford transit, tyres 185R14C, static vertical axle load 10.2 kN)

W odróżnieniu od rodziny charakterystyk pokazanych na Rys. 5 oraz 6, występuje symetria między charakterystykami dla rosnącego i malejącego kąta znoszenia. Charakterystyki nie przecinają się, co jest znacznym uproszczeniem w porównaniu do charakterystyk pokazanych powyżej. Na Rys. 7 oraz 8 pokazano tego rodzaju charakterystyki dla opony osi przedniej. Ze względu na czytelność wykresów, przedstawiono tutaj rodziny charakterystyk dla rosnącego i malejącego kąta znoszenia.



Rys. 7. Charakterystyki nieustalonego znoszenia boczno opony osi przedniej przedstawione za pomocą wielu funkcji łamanych – przypadek malejącego kąta znoszenia – (ford transit, opony 185R14C, statyczne pionowe obciążenie osi przedniej 10,2 kN)

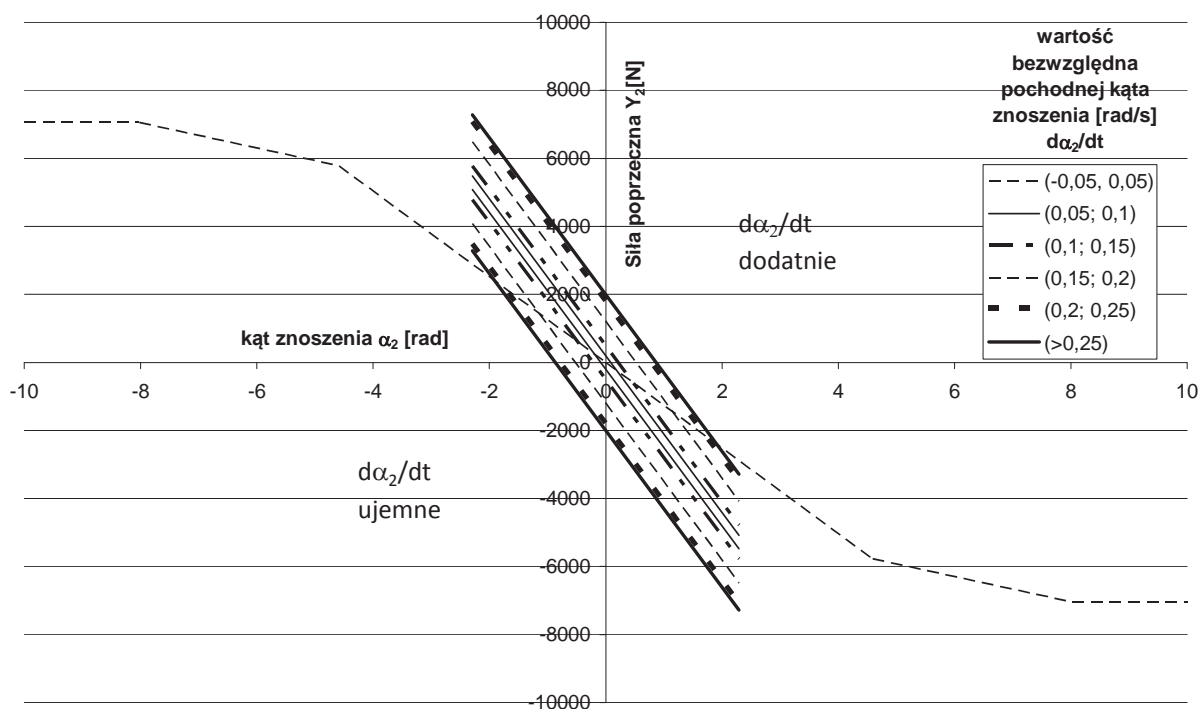
Fig. 7. Non-steady-state front axle tyres slip characteristics presented by many linear functions – case of decreasing side slip angle – (ford transit, tyres 185R14C, static vertical axle load 10.2 kN)



Rys. 8. Charakterystyki niestabilnego znoszenia bocznego opon osi przedniej przedstawione za pomocą wielu funkcji łamanych – przypadek rosnącego kąta znoszenia – (ford transit, opony 185R14C, statyczne pionowe obciążenie osi przedniej 10,2 kN)

Fig. 8. Non-steady-state front axle tyres slip characteristics presented by many linear functions – case of increasing side slip angle – (ford transit, tyres 185R14C, static vertical axle load 10.2 kN)

W odróżnieniu od osi przedniej, dla osi tylnej w miejsce funkcji łamanych, do opisu niestabilnego znoszenia zastosowano pojedyncze funkcje liniowe. Przedstawiono to na Rys. 9.



Rys. 9. Charakterystyki niestabilnego znoszenia bocznego opon osi tylnej przedstawione za pomocą wielu funkcji liniowych (ford transit, opony 185R14C, statyczne pionowe obciążenie osi przedniej 10,2 kN)

Fig. 9. Non-steady-state rear axle tyres slip characteristics presented by many linear functions – (ford transit, tyres 185R14C, static vertical axle load 10.2 kN)



## 7. Symulacja krzywoliniowego ruchu samochodu

Obliczenia symulacyjne krzywoliniowego ruchu samochodu zostały przeprowadzone m.in. dla manewru podwójnej zmiany pasa ruchu, charakteryzującego się znacznymi wartościami przyspieszenia poprzecznego. Rezultaty obliczeń komputerowych zestawiono i porównano z wynikami pomiarów odpowiednich wielkości, np. prędkości kątowej samochodu względem osi pionowej z. Była ona zmierzona dwoma sposobami: czujnikiem oraz na podstawie pomiarów prędkości poprzecznych czujnikami Correvit Q1 i Q2, dając porównywalne wyniki. Do dalszej analizy wybrano wyniki pomiarów czujnikiem prędkości kątowej.

Wyniki symulacji komputerowej przeprowadzono dla różnych charakterystyk bocznego znoszenia opon. Uwzględniały one zarówno ustalony oraz nieustalony stan bocznego znoszenia opon. Aby możliwe było porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów, w obliczeniach symulacyjnych sygnałami wejściowymi były zmierzone przebiegi czasowe kąta skrętu kołem kierownicy oraz prędkości podłużnej samochodu.

Do przeprowadzenia obliczeń konieczna była znajomość podstawowych parametrów samochodu.

Tab. 1. Dane samochodu ford transit wykorzystane w obliczeniach symulacyjnych

Tab. 1. Ford Transit properties used in simulation

Masa samochodu	m [kg]	1950
Masowy moment bezwładności samochodu względem osi pionowej z	$I_z$ [kgm <sup>2</sup> ]	6500
Rozstaw osi	$l_{12}$ [m]	2,835
Odległość środka masy samochodu od osi przedniej	$l_1$ [m]	1,317
Współczynnik odporności opon osi przedniej na boczne znoszenie	$K_1$ [N/rad]	64000
Współczynnik odporności opon osi tylnej na boczne znoszenie	$K_2$ [N/rad]	125000
Średnie przełożenie układu kierowniczego	$i_k$ [-]	26,2

Aby dokonać weryfikacji przydatności charakterystyk nieustalonego znoszenia bocznego do symulacji komputerowej manewru podwójnej zmiany pasa ruchu wykonanego zgodnie z [11], należało jej rezultaty porównać z wynikami pomiarów. Przykładowe wyniki próby drogowej i odpowiednich obliczeń komputerowych przedstawiono na Rys. 10-12 jako przebiegi czasowe prędkości kątowej samochodu oraz kątów znoszenia bocznego opon dla manewru podwójnej zmiany pasa ruchu.

Dla zwiększenia czytelności przebiegów rezultaty symulacji dla różnych charakterystyk znoszenia pokazano na dwóch rysunkach, za każdym razem odnosząc się do wyników pomiarów.

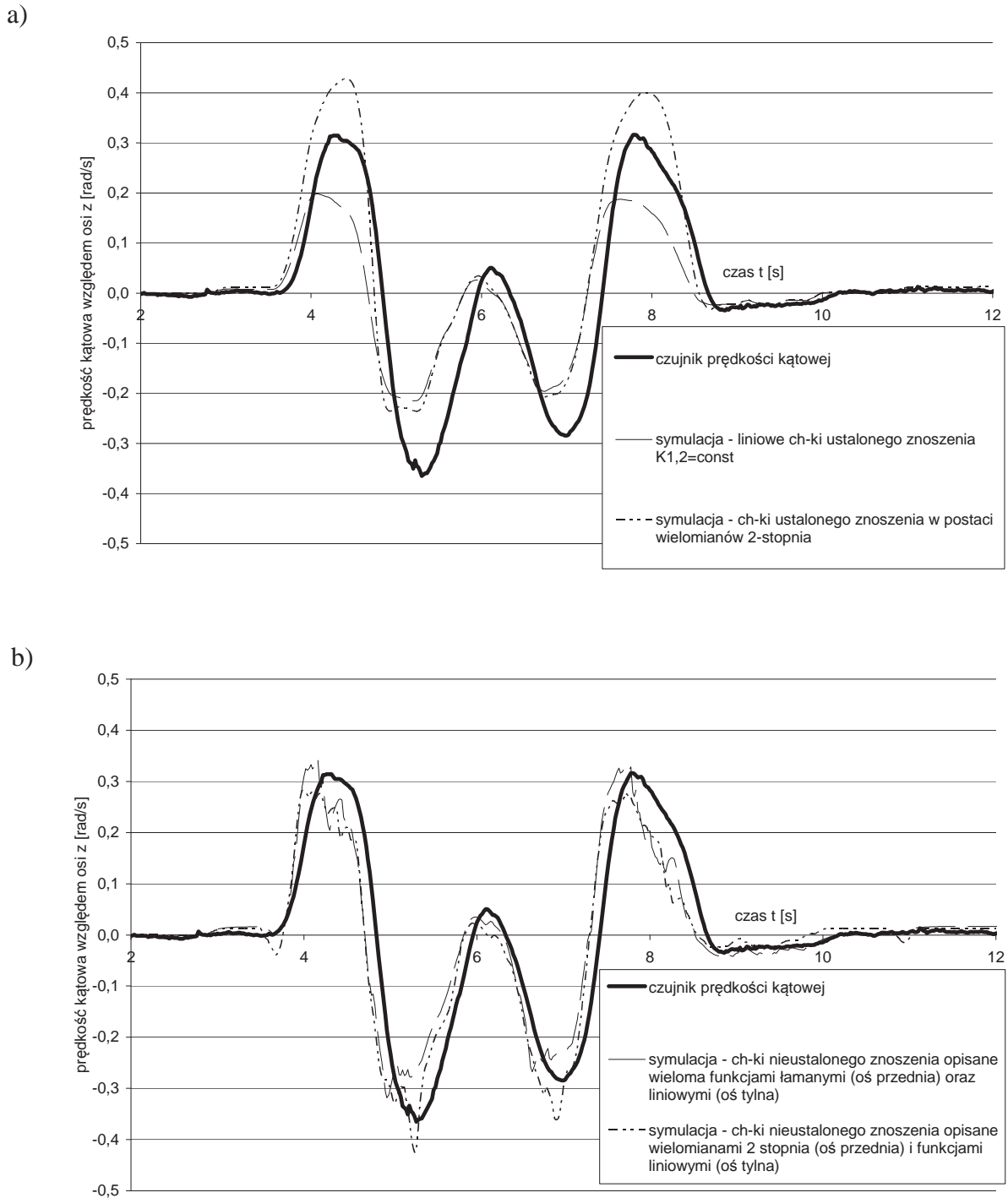
Na Rys. 11 pokazano przebiegi kątów bocznego znoszenia opon osi przedniej oraz tylnej.

W przypadku kąta znoszenia opon osi przedniej można zauważyć, że wynik symulacji przy najprostszym przypadku interpretacji bocznego znoszenia za pomocą stałych współczynników ustalonego stanu bocznego znoszenia znacznie odbiega od rezultatów pomiarów czujnikiem Correvit-Q1. Dużo korzystniej wyglądają wyniki symulacji przy wykorzystaniu charakterystyk znoszenia nieustalonego.

Podobnie, patrząc na przebiegi kąta znoszenia bocznego opon osi tylnej, widać, że wynik symulacji z zastosowaniem najprostszej charakterystyki liniowej ustalonego znoszenia (Rys. 12 a) najbardziej odbiega od wyników pomiarów czujnikiem Correvit-Q2. Znacznie bardziej rozbudowane charakterystyki nieustalonego znoszenia dają znacznie lepszy wynik symulacji kąta znoszenia.

Z przedstawionych powyżej rysunków można zauważyć, że na wyniki badań symulacyjnych szczególnie wpływ ma rodzaj zastosowanej charakterystyki bocznego znoszenia.

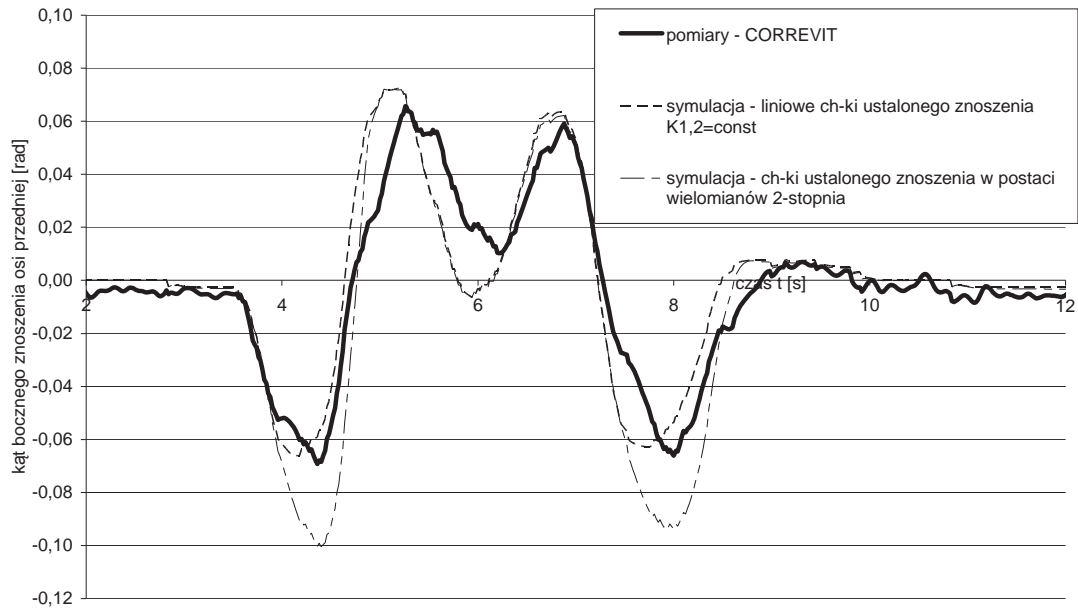
W Tab. 2 przedstawiono dla porównania wartości odchylenia standardowego różnicy symulacyjnej oraz zmierzonej wartości prędkości kątowej oraz kątów znoszenia dla różnych charakterystyk znoszenia.



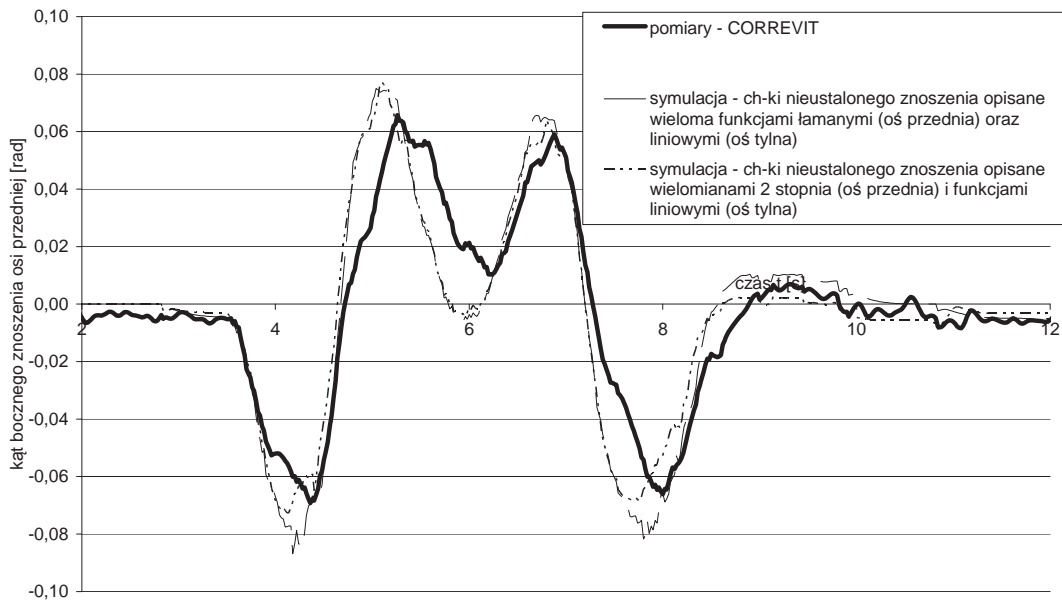
Rys. 10. Zmierzona w badaniach drogowych i symulacyjna prędkość kątowna samochodu względem pionowej osi z dla różnych charakterystyk znoszenia – manewr podwójnej zmiany pasa ruchu przy około 70 km/h  
 Fig. 10. Yaw velocity obtained from road tests and from simulations for different side slip characteristics – double lane change maneuver approx. 70 km/h

W przypadku symulacyjnej prędkości kątowej samochodu widać jednoznacznie, że zastosowanie najprostszej charakterystyki znoszenia ustalonego w postaci funkcji liniowej skutkuje największym odchyleniem standardowym obliczeń prędkości kątowej względem pomiarów. Dla symulacji kątów znoszenia nie jest to tak wyraźne, choć daje się zauważyć pozytywny wpływ zastosowania charakterystyk znoszenia nieustalonego.

a)



b)



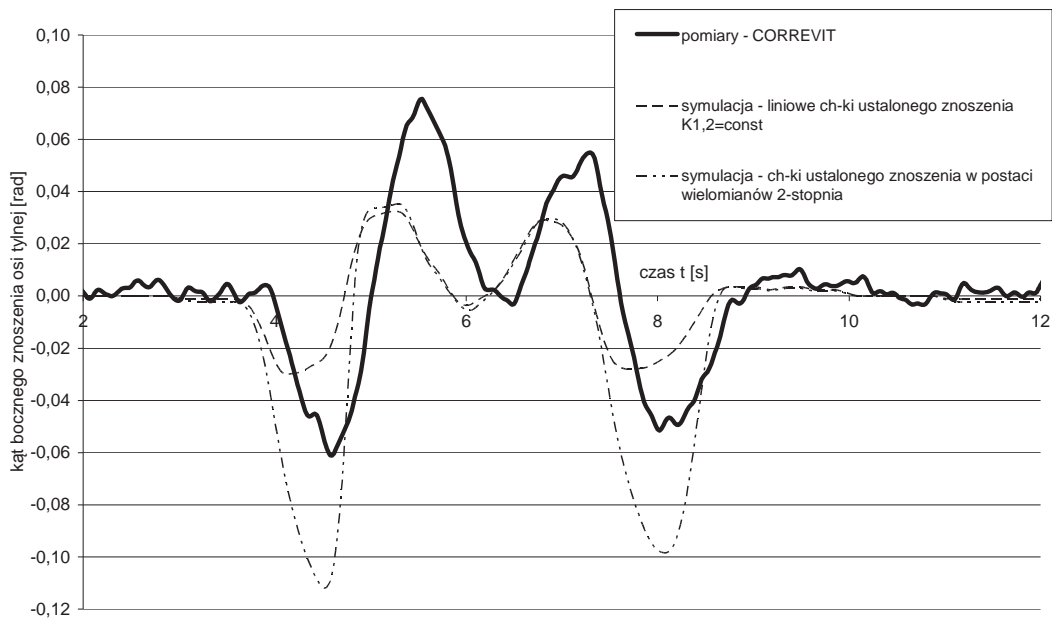
Rys. 11. Zmierzony w badaniach drogowych i symulacyjny kąt znoszenia opon osi przedniej dla różnych charakterystyk znoszenia – manewr podwójnej zmiany pasa ruchu przy około 70 km/h

Fig. 11. Front axle tyres side slip angle obtained from road tests and from simulations for different side slip characteristics – double lane change maneuver approx. 70 km/h

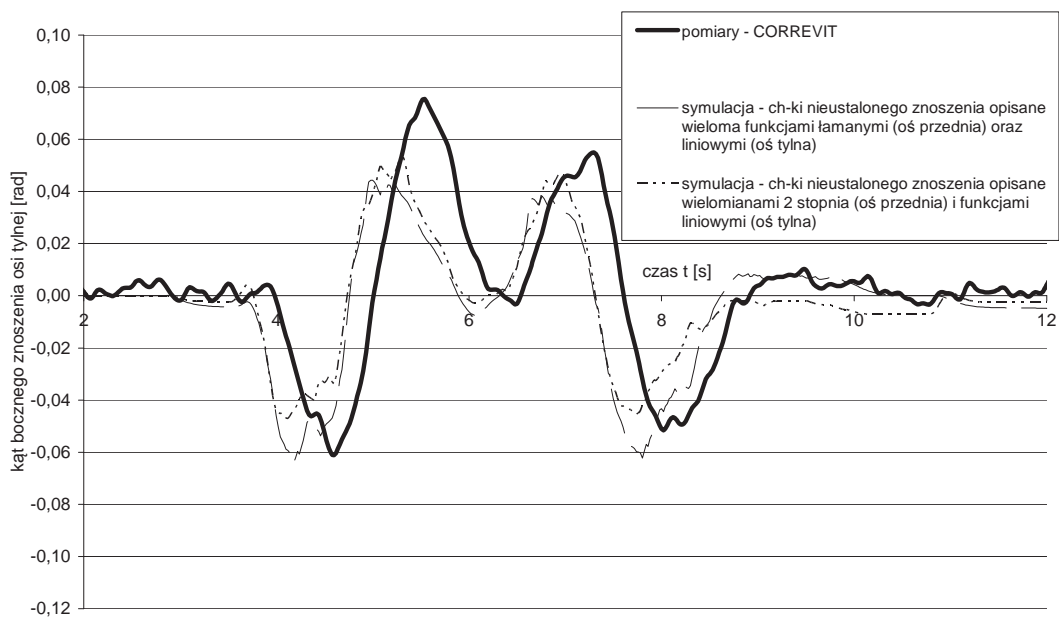
## 8. Podsumowanie

Badania drogowe pozwalają na określenie właściwości dotyczących bocznego znoszenia opon samochodu. Dotyczy to zarówno stanów ustalonych oraz znacznie trudniejszych w opisie stanów nieustalonego znoszenia bocznego.

a)



b)



Rys. 12. Zmierzony w badaniach drogowych i symulacyjny kąt znoszenia opon osi tylnej dla różnych charakterystyk znoszenia – manewr podwójnej zmiany pasa ruchu przy około 70 km/h

Fig. 12. Rear axle tyres side slip angle obtained from road tests and from simulations for different side slip characteristics – double lane change maneuver approx. 70 km/h

Stwierdzono znaczne różnice pomiędzy wynikami obliczeń otrzymanymi dla charakterystyk ustalonego i nieustalonego znoszenia. Z porównania wyników symulacji z wynikami badań drogowych wynika, że zastosowanie charakterystyk znoszenia wyznaczonych w warunkach nieustalonych daje wyniki bliższe wynikom pomiarów niż w przypadku zastosowania charakterystyk dla ustalonego stanu ruchu. Wykazano, że stosowanie w obliczeniach symulacyjnych nieustalonych stanów ruchu charakterystyk opon otrzymanych w warunkach ustalonych może prowadzić do znacznych rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów a wynikami symulacji komputerowej.

Tab. 2. Zestawienie odchylenia standardowego różnicy między wartością symulacyjną a zmierzoną odpowiednio prędkości kątowej, kątów bocznego znoszenia dla różnych charakterystyk znoszenia dla manewru podwójnej zmiany pasa ruchu przy prędkości około 70 km/h

Tab. 2. Standard deviation of difference between simulated and measured vehicle yaw velocity, side slip angles for different side slip characteristics for double lane change maneuver, approx. 70 km/h

	Linioowa charakterystyka znoszenia ustalonego $K_{1,2}=\text{const.}$ (wartości w Tab. 1)	Charakterystyki znoszenia ustalonego w postaci wielomianu 2-stopnia	Charakterystyki znoszenia nieustalonego opisane wieloma funkcjami łamanymi (oś przednia) oraz liniowymi (oś tylna)	Charakterystyki znoszenia nieustalonego opisane wielomianami 2-stopnia (oś przednia) oraz funkcjami liniowymi (oś tylna)
Odchylenie standardowe różnicy prędkości kątowej symulacyjnej oraz zmierzonej [rad/s]	0,0607	0,0529	0,0469	0,0454
Odchylenie standardowe różnicy kąta znoszenia opon osi przedniej symulacyjnego oraz zmierzonego [rad]	0,0094	0,0121	0,0104	0,0099
Odchylenie standardowe różnicy kąta znoszenia opon osi tylnej symulacyjnego oraz zmierzonego [rad]	0,0156	0,0182	0,0160	0,0155

Zastosowany model samochodu nie uwzględnia:

- zmiennego obciążenia normalnego opon,
- przechyłów poprzecznych samochodu,
- zmian kątów pochylenia kół.

Pomimo tych ograniczeń przedstawione wyniki symulacji dają rezultaty porównywalne z wynikami eksperymentu drogowego.

Lepsze rezultaty symulacji byłyby możliwe do uzyskania po wprowadzeniu do modelu przechyłów poprzecznych oraz opisu znoszenia bocznego oddzielnie dla każdego z kół. Tego typu udaną próbę opisu ruchu samochodu można znaleźć m.in. w [1].

## Literatura

- [1] Ali, M., Sjöberg, J., *Impact of different vehicle models on threat assessment in critical curve situations*, 21st International Conference on Enhanced Safety of Vehicles, Paper Number 09-0076-O, Stuttgart 2009.
- [2] Arosio, D., *New validated tire model for ABS and VDC simulations*, materiały konferencyjne VERTEC 3<sup>rd</sup> International Colloquium on Vehicle-Tyre-Road Interaction, Tyre Technology EXPO 2006, Stuttgart, [www.vertec.hut.fi/P08\\_Tyre\\_model.pdf](http://www.vertec.hut.fi/P08_Tyre_model.pdf), 2006
- [3] Luty, W., *Analiza właściwości ogumienia samochodu ciężarowego w nieustalonym stanie znoszenia bocznego*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2(38), Warszawa 2000.
- [4] Maurice, J. P., Pacejka, H. B., *Relaxation Length Behaviour of Tyres*, Vehicle System Dynamics Supplement, Swets & Zeitlinger, 27, pp. 339-342, 1997.
- [5] Pacejka, H. B., *Spin: camber and turning*, Vehicle System Dynamics, Supplement, Vol. 43, s. 3-17, 2005.
- [6] Pokorski, J., Bieliński, M., *System pomiarowy do badania stateczności pojazdu*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 4(51), Warszawa 2003.

- [7] Reński, A., *Modelowanie działania kierowcy w układzie kierowca-pojazd-otoczenie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [8] Reński, A., Sar, H., *Application of dynamic slip characteristics in simulation of vehicle motion*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 5(72), Warszawa 2008.
- [9] Sar, H., *Wyznaczanie charakterystyk opon i masowego momentu bezwładności samochodu na podstawie badań trakcyjnych*, Archiwum Motoryzacji, Wydawnictwo Naukowe Polskiego Towarzystwa Motoryzacji, 2, Radom 2006.
- [10] ISO 4138 *Road Vehicles – Steady State Circular Test Procedure*, 1982.
- [11] ISO TR 3888 *Road Vehicles – Test Procedure for a Severe Lane – Change Manoeuvre*, 1975.