

Krzysztof PARCZEWSKI, Henryk WNEK
 AKADEMIA TECHNICZNO – HUMANISTYCZNA BIELSKO – BIAŁA

Pomiar sztywności kątowej zawieszenia samochodu

Dr inż. Krzysztof PARCZEWSKI

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Politechniki Szczecińskiej, dyplom w zakresie techniki i eksploatacji pojazdów samochodowych. Stopień doktora uzyskał w 2002 r. w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Jest adiunktem na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno- Humanistycznej w Bielsku-Białej w Zakładzie Pojazdów Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów. Zajmuje się zagadnieniami badań pojazdów zwłaszcza w zakresie kierowności i stateczności pojazdów oraz wpływu niesprawności na nie.

e-mail: kparczewski@ath.bielsko.pl



Dr inż. Henryk WNEK

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej, dyplom w zakresie budowy samochodów i ciągników. Stopień doktora uzyskał w 2005 r. w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Jest adiunktem na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno- Humanistycznej w Bielsku-Białej, w Zakładzie Pojazdów Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów. Zajmuje się zagadnieniami badań pojazdów, zwłaszcza w zakresie stateczności i kierowności.

e-mail: hwnek@ath.bielsko.pl



Streszczenie

Pojazdy z wysoko położonym środkiem masy mają tendencję do wywracania się, szczególnie podczas wykonywania gwałtownych manewrów skrętu. Na parametry określające stateczność boczną pojazdu ma wpływ wiele czynników między innymi: położenie środka masy, sztywność zawieszenia, moment bezwładności oraz parametry ruchu pojazdu. Prowadzone w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów badania pozwalają na określenie wpływu czynników konstrukcyjnych na stateczność samochodów ciężarowych. Podobne zagadnienia dotyczą samochodów osobowych, z tą różnicą, że tu niebezpieczeństwo przewrócenia pojazdu jest mniejsze. Przedstawiona praca stanowi opis przeprowadzonych badań pojazdu oraz sposobu wyznaczania sztywności kątowej zawiesz. Sztywność ta pozwala na określenie granicznych warunków, przy których dojdzie do przewrócenia pojazdu.

Słowa kluczowe: stateczność pojazdu, badania pojazdu, tor krzywoliniowy.

Measurement of the vehicle torsional stiffness

Abstract

Vehicles with high location of the centre of mass tend to roll over, particularly while executing the sudden turn manoeuvres. Many factors influence the parameters determining the vehicle side stability, such as: the location of the centre of the mass, the suspension stiffness, the moment of inertia of a car body and the vehicle motion parameters. Investigations conducted in the Department of Combustion Engines and Vehicles makes it possible to determine the influence of construction factors on the truck stability. Similar problems refer to automobiles, however, the probability of overturn is smaller in that case. The paper presents the performed investigations of the vehicle and the procedure for determining the torsional stiffness of suspensions. The automobile suspensions cause that during the vehicle movement in the after-effect of the forces operation, the body leans and the centre of the mass moves. The change of the centre of the mass position causes lowering the critical parameters for which there occurs the vehicle rollover. The angle of the body tilting is dependent on the suspension stiffness. The proportionality coefficient between the angle of the car body inclination and the reactionary moment of the resilience of suspensions is called the torsional stiffness of suspensions. Its reverse is the vehicle rollover threshold. The value of the torsional stiffness of suspensions k_{φ} will be uniform in the case of the drive steady conditions. During executions of sudden manoeuvres damping forces in suspensions will cause the change of their characteristics. This will enlarge the effective stiffness. Additional springy units cooperate at large angles of the car body inclination and change the suspension characteristic. On the basis of the measurements taken and analyses performed one can state that:

- it is possible to define the vehicle suspension torsional stiffness on a basis of road tests,
- the measurement accuracy is determined by many factors such as: the investigated track surface irregularity, deviation from the given drive velocity, deviation from the given steering wheel angle, change of the schedule of the weight on wheels, change of the friction coefficient between wheels and road, etc.
- the determined stiffness values oscillate around the average value which was assumed to be the suspension torsional stiffness value of the tested vehicle.

The torsional stiffness obtained from the suspension investigations can be used for calculations of the critical velocity of possible vehicle rollover.

Keywords: vehicle stability, truck road test, curvilinear track.

1. Wstęp

Do wywrócenia się pojazdu zazwyczaj dochodzi w przypadku jazdy z nadmierną prędkością po łuku drogi lub w następstwie wykonywania gwałtownych manewrów skrętu. W przypadku samochodów osobowych najpierw występuje zarzucanie, a potem może dojść do przewrócenia, przy samochodach ciężarowych faza zarzucania może nie wystąpić. Przyczyną wywracania się pojazdów jest działanie sił bocznych na pojazd (sił odśrodkowych, wiatru bocznego, pochylenia drogi oraz sił bezwładności). Siła boczna (rys. 1) działająca na pojazd powoduje odchylenie siły wypadkowej od siły prostopadłej do jezdni. Prowadzi to do zmiany nacisków na prawą i lewą stronę pojazdu, pochylenie nadwozia, odkształcenia opon a w granicznych przypadkach przewrócenie pojazdu.

Prędkość graniczną [1,2,4,5], której przekroczenie może skutkować przewróceniem pojazdu, można wyznaczyć z zależności:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{gR(b_K + 2h_s \tan \beta)}{2h_s - t \tan \beta}} \quad (1)$$

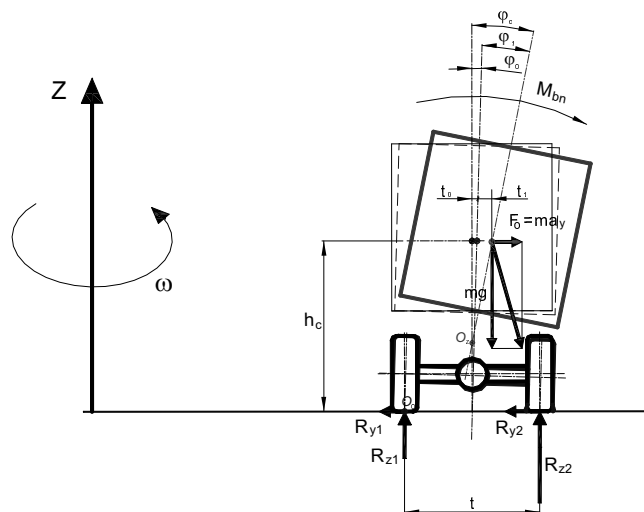
gdzie:

- v_{\max} – prędkość graniczna,
- R – promień skrętu,
- h_s – odległość środka masy od powierzchni jezdni,
- t – rozstaw kół,
- β – kąt pochylenia powierzchni jezdni,
- g – przyspieszenie ziemskie.

Z zależności (1) wynika, że najbardziej narażone na przewrócenie są pojazdy z wysoko położonym środkiem masy, których zadaniem jest szybkie dostanie się do miejsca działania. Tego typu pojazdy to samochody straży pożarnej, pogotowia ratunkowego, gazowego i podobne. Ze względu na swoją budowę problem ten dotyczy również ciągników z naczepami.

Na rysunku 2 przedstawiono moment bezwładności powodujący przewrócenie pojazdu z zaznaczeniem miejsca, w którym warunki wywrotu zostały osiągnięte.

Wyznaczona w ten sposób graniczna prędkość jazdy po łuku drogi została obliczona przy założeniu, że ruch pojazdu jest jednostajny, promień skrętu nie zmienia się, nie działają siły zewnętrzne, a pojazd jest traktowany jako ciało sztywne. Pominięcie założeń upraszczających powoduje skomplikowanie zależności.



Rys. 1. Rozkład sił działających na pojazd podczas poruszania się po torze krzywoliniowym

Fig. 1. Diagram of forces acting on a vehicle in curvilinear track motion

2. Sztywność kątowna zawiesznień

Stosowanie zawiesznień w samochodach powoduje, że podczas ruchu pojazdu w następstwie działania sił, nadwozie pochyla się, a środek masy przemieszcza się. Zmiana położenia środka masy może powodować obniżenie granicznych parametrów, przy których może dojść do przewrócenia pojazdu. Przechył pojazdu następuje wokół osi przechyłu poprzecznego. W takim przypadku na nadwozie działają siły równoważone przez moment reakcyjny sprężystości zawiesznień.

$$F_G h_p + G b_\varphi = M_{s_zaw} \quad (2)$$

gdzie:

- M_{s_zaw} – moment reakcyjny sprężystości zawiesznień,
- F_G – siła boczna,
- G – ciężar pojazdu,
- h_p – odległość środka masy od osi przechyłu,
- b_φ – boczne przesunięcie środka masy wynikające z pochylenia nadwozia o kąt φ .

Moment M_{s_zaw} można wyznaczyć z zależności:

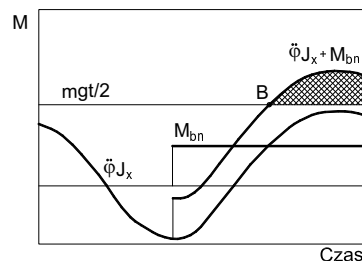
$$M_{s_zaw} = \left(2k_1 \cdot \frac{b_{s1}^2}{4} + 2k_2 \cdot \frac{b_{s2}^2}{4} + k_{s1} + k_{s2} \right) \cdot \varphi = k_\varphi \cdot \varphi \quad (3)$$

gdzie:

- φ – kąt pochylenia nadwozia,
- $k_{1,2}$ – współczynnik sztywności zawieszienia osi przedniej/tylnej,
- $b_{s1,s2}$ – odległość elementów sprężystych zawieszienia przedniego/tylnego,
- $k_{s1,s2}$ – współczynnik sztywności stabilizatora przedniego/tylnego,
- k_φ – sztywność kątowna zawieszienia samochodu.

Dodatkowy moment wywracający M_{bn} wynika z momentu bezwładności pojazdu J_x względem osi podłużnej pojazdu i przyspieszenia kąowego $\ddot{\varphi}$ pochylania nadwozia (rys. 2).

$$M_{bn} = J_x \cdot \ddot{\varphi} \quad (4)$$



Rys. 2. Moment bezwładności powodujący przewrócenie pojazdu; w punkcie B warunki wywrótu są osiągnięte [1]

Fig. 2. Moment of inertia causing rollover; in B the condition for rollover is reached [1]

Zawieszienia składają się z elementów sprężystych i tłumiących. W przypadku ustalonych warunków jazdy wartość sztywności kątownej zawiesznień k_φ będzie stała. Podczas wykonywania gwałtownych manewrów siły tłumiące w zawieszeniach będą powodowały zmianę ich charakterystyki, co będzie skutkowało zwiększeniem sztywności. Przy dużych kątach pochylenia nadwozia do współpracy wchodzi dodatkowe elementy sprężyste zmieniające charakterystykę zawiesznień. To również będzie wpływało na sztywność kątowną zawiesznień. Problem się komplikuje w przypadku uwzględnienia sztywności skrętnej ramy podwozia pojazdu.

Drogą do poprawienia stateczności bocznej pojazdów jest stosowanie stabilizatorów lub elementów sprężystych o nieliniowej charakterystyce, które będą powodowały zmniejszenie kątów pochylenia nadwozia pod wpływem działania sił bocznych.

3. Wyznaczenie kątownej sztywności zawiesznień metodą doświadczalną

Ze względu na wielość czynników wpływających na sztywność kątowną zawiesznień, wyznaczono ją na drodze doświadczalnej. Przy ustalonej prędkości jazdy po torze kołowym można założyć, że przyspieszenie poprzeczne a_y jest ustalone, a w takim przypadku można założyć, że moment bezwładności M_{bn} nie występuje.

Wykonano badania drogowe pojazdu Renault Midlum 4x4 z nadwoziem poźarniczym. Badania wykonano dla samochodu w pełni obciążonego wyposażeniem ratowniczym w stanie gotowym do akcji. W kabinie znajdowały się 2 osoby (kierowca i obsługujący aparaturę pomiarową). Wybrane dane badanego pojazdu zamieszczono w tabeli 1.

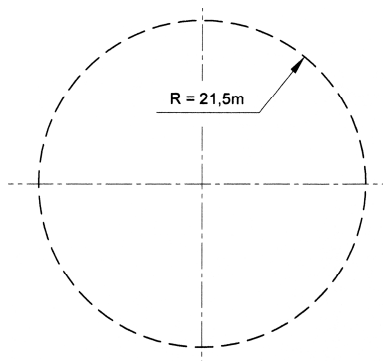
Tab. 1. Parametry badanego pojazdu
Tab. 1. Vehicle parameters

Parametry pojazdu	Pojazd
długość/szerokość/wysokość, mm	7305/2504/3148
rozstaw osi, mm	3948
masa całkowita, kg	13246
wysokość środka masy, mm	1320
masa przypadająca na oś przednią, kg	4740
masa przypadająca na oś tylną, kg	8506
moc silnika, kW	206
zawieszienia pojazdu przód/tył	sztywne mosty oparte na resorach piórowych z odbojnikami gumowymi, amortyzatory teleskopowe
koła osi tylnej	Bliźniacze

4. Opis próby i aparatury pomiarowej

Celem przeprowadzonych pomiarów było zbadanie możliwości wykorzystania modelu do analizy stateczności poprzecznej samochodów o wysoko położonym środku masy [7, 8]. Dla wykonywanych badań porównawczych wybrano test jazdy po okręgu

(rys. 3 i 4) [3]. Test ten był realizowany ze stopniowo rosnącymi prędkościami i wzorowany na normie ISO-4138. Badania powtarzano trzykrotnie.



Rys. 3. Przyjęty tor ruchu środka masy
Fig. 3. Assumed track of the movement of the mass centre



Rys. 4. Widok pojazdu podczas testu
Fig. 4. View of the vehicle during the test

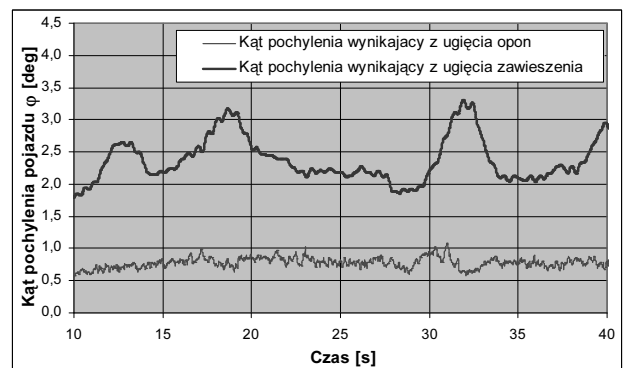
Podczas ruchu pojazdów były rejestrowane następujące parametry wykorzystując profesjonalną aparaturę pomiarową [6]:

- moment obrotowy na kole kierownicy (M_H), (kierownica pomiarowa MSW Corrsys-Datron),
- kąt obrotu koła kierownicy (δ_H), (kierownica pomiarowa MSW Corrsys-Datron),
- prędkość jazdy samochodu w kierunku osi X (v), (Correvit S-CE Corrsys-Datron),
- prędkość odchylenia bocznego w kierunku osi Y (v_0), (Correvit S-CE Corrsys-Datron),
- prędkość kątowna odchylenia nadwozia względem osi pionowej Z ($\dot{\psi}$), (czujnik żyroskopowy – Silikon Sensing Systems),
- prędkość kątowna przechyłu nadwozia względem osi podłużnej X ($\dot{\varphi}$), (czujnik żyroskopowy – Silikon Sensing Systems),
- prędkość kątowna przechyłu nadwozia względem osi porzecznej Y ($\dot{\theta}$), (czujnik żyroskopowy – Silikon Sensing Systems),
- przyspieszenie wzdłużne samochodu, a_x , (czujnik przyspieszeń ADXL 203 Analog Devices)
- przyspieszenie poprzeczne samochodu, a_y , (czujnik przyspieszeń ADXL 203 Analog Devices).

5. Wyznaczenie sztywności kątowej zawiesznień

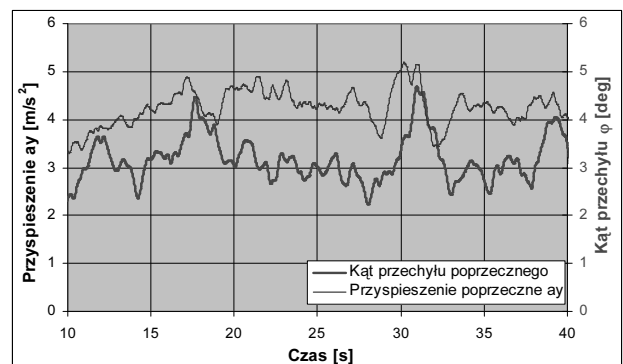
Na podstawie analizy danych pomiarowych wyznaczono siłę odśrodkową działającą na środek masy pojazdu oraz pochylenie

kątowne nadwozia. Przy kątach pochylenia nadwozia osobno analizowano wpływ ugięcia opony na kąt pochylenia nadwozia a osobno ugięcie zawiesznień (rys. 5).



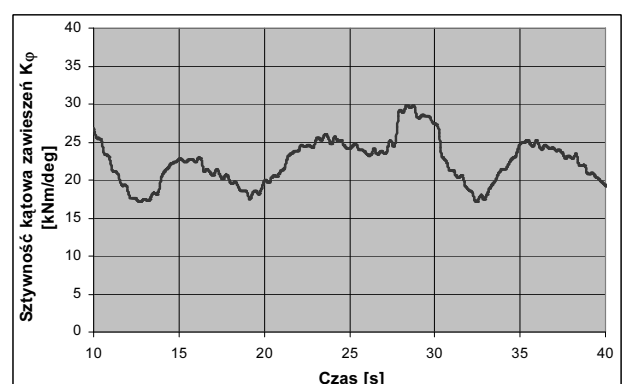
Rys. 5. Przebieg kąta pochylenia nadwozia wynikającego z ugięcia opon φ_0 i zawieszienia φ_1 podczas próby drogowej
Fig. 5. Vehicle body inclination angle resulting from deflection of tyres φ_0 and suspension φ_1 during the road test

Analizując ruch pojazdu wybrano fragment próby w warunkach ustalonej jazdy po okręgu. Ze względu na niewielkie nierówności terenu i niewielkie zmiany prędkości jazdy, kąt pochylenia pojazdu również się zmieniał (rys. 6).



Rys. 6. Przebieg kąta pochylenia nadwozia φ i przyspieszenia poprzecznego a_y podczas próby drogowej
Fig. 6. Vehicle body inclination angle φ and lateral acceleration a_y during the road test

Wzrost przyspieszenia poprzecznego a_y powodował powiększenie kąta pochylenia bocznego nadwozia φ .

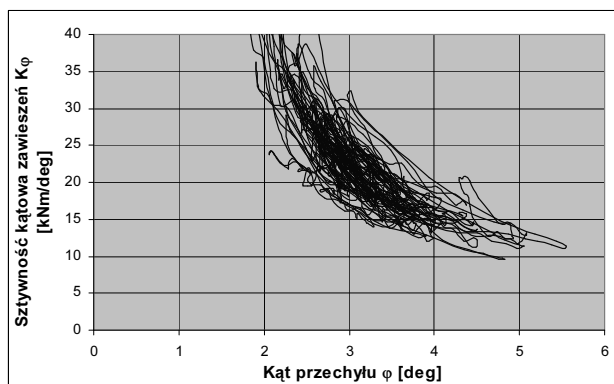


Rys. 7. Zmiany sztywności kątowej zawieszienia K_φ podczas próby drogowej
Fig. 7. Change of the suspension angular stiffness K_φ during the road test

Wraz z okresem trwania próby wartość sztywności kątowej (rys. 7) zmieniała się, wynikało to z niewielkich zmian prędkości jazdy. W zakresie od 10. do 15. sekundy prędkość wzrastała od 30. do 40. sekundy prędkość jazdy malała. Powodowało to zmianę

sztwności kątowej zawiesznień w następstwie działania sił tłumiących w zawieszeniach.

Wyniki pomiarów i analiz określają obszar możliwych wartości sztywności kątowych zawiesznień uzyskanych podczas próby (rys. 8). Dokładność wyznaczonych parametrów wynika z warunków pomiaru. Pomimo, że badania były prowadzone na specjalnym torze badawczym, występowały pewne oscylacje wyników wynikające z: niejednorodnego współczynnika przyczepności, odchylen od zamierzonej prędkości jazdy, zmiany kąta skrętu koła kierownicy, pochylenia terenu czy też sił wynikających z powiewów wiatru. Na podstawie analizy wyników określono sztywność kątową zawiesznień przy ustalonej prędkości jazdy i stałym przyspieszeniu poprzecznym, która oscylowała wokół wartości 28 kNm/°.

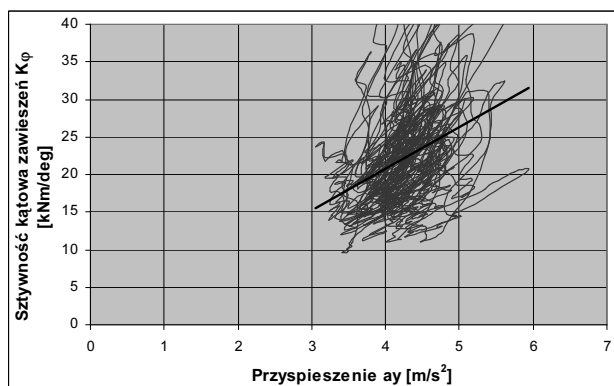


Rys. 8. Sztywność kątowa zawiesznień K_φ w zależności od kąta przechyłu nadwozia pojazdu

Fig. 8. The suspension angular stiffness K_φ vs. the car body inclination angle

Przedstawiona zmiana sztywności kątowej zawiesznień w zależności od przyspieszenia poprzecznego wskazuje na to, że przy większych przyspieszeniach do współpracy wchodziły odbojniki umieszczone pod resorami, co wpływało na zmianę charakterystyk zawiesznień.

Na wykresie 9 pokazano zakres zmian sztywności kątowej zawiesznień w zależności od przyspieszenia bocznego jak również linię trendu zmian tej sztywności. Podobnie jak opisano powyżej zmiana charakterystyki zawieszienia powoduje szybki wzrost sztywności kątowej.



Rys. 9. Sztywność kątowa zawiesznień K_φ w funkcji przyspieszenia poprzecznego a_y

Fig. 9. The suspension angular stiffness K_φ vs. the lateral acceleration a_y

6. Podsumowanie i wnioski

Z poszczególnych analiz wynika, że:

- istnieje możliwość określenia sztywności kątowej zawiesznień pojazdu na drodze doświadczalnej,
- dokładność pomiaru wynika z wielu czynników takich jak nierówności toru badawczego, odchylenie od zadanej prędkości

jazdy, odchylenie od zadanego kąta skrętu koła kierownicy, zmiany rozkładu nacisków kół na podłoże, współczynnika przyczepności między kołami a jezdnią, itp.

- wyznaczone wartości sztywności oscylują wokół wartości średniej, którą uznano za wartość sztywności kątowej zawiesznień dla badanego pojazdu,
- uzyskane średnie wartości sztywności $15 \div 33$ kNm/° są zgodne z danymi literaturowymi [4].

Uzyskane na podstawie badań sztywności kątowe zawiesznień mogą być stosowane w trakcie wyznaczania prędkości granicznych, po przekroczeniu, których może dojść do przewrócenia pojazdu.

7. Wykaz oznaczeń

v_{max} – prędkość graniczna,

R – promień skrętu,

h_s – odległość środka masy od powierzchni jezdni,

t – rozstaw kół,

β – kąt pochylenia powierzchni jezdni,

g – przyspieszenie ziemskie,

$M_{s_{zaw}}$ – moment reakcyjny sprężystości zawiesznień,

F_G – składowa boczna siły ciężkości,

G – ciężar pojazdu,

h_p – odległość środka masy od osi przechyłu,

b_φ – boczne przesunięcie środka masy wynikające z pochylenia nadwozia o kąt φ ,

φ – kąt pochylenia nadwozia,

φ_o – kąt pochylenia nadwozia wynikający z ugięcia opon,

φ – kąt pochylenia nadwozia wynikający z ugięcia zawiesznień,

$\ddot{\varphi}$ – przyspieszenie kątowe pochylenia nadwozia,

$k_{1,2}$ – współczynnik sztywności zawieszienia osi przedniej / tylnej,

$b_{s1,s2}$ – odległość elementów sprężystych zawieszienia przedniego / tylnego,

$k_{s1,s2}$ – współczynnik sztywności stabilizatora przedniego / tylnego,

k_φ – sztywność kątowa zawieszienia samochodu,

M_{bn} – moment bezwładności pojazdu,

J_x – masowy moment bezwładności względem osi podłużnej.

8. Literatura

- [1] Genta G.: Motor Vehicle Dynamics – Modeling and simulation, Singapore: Word Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1997.
- [2] Gillespie T. D.: Fundamentals of vehicle dynamics, Warrendale: SAE, 1992.
- [3] Parczewski K., Wnęk H.: The attempt to use the car model to the analysis of the vehicle movement after the curvilinear track. Trans. of the Universities of Košice 2009, nr 3.
- [4] Prochowski L., Unarski J., Wach W., Wicher J.: Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych, Warszawa: WKŁ, 2008.
- [5] Reński A. Budowa samochodów, Układy hamulcowe i kierownicze oraz zawieszienia, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Pol. Warszawskiej, 2004.
- [6] Pieniążek W.: Analiza błędów wyznaczania niektórych wskaźników oceny własności ruchowych samochodu przy zastosowaniu różnych metod pomiarowych. Warszawa 1993. Zeszyty Instytutu Pojazdów. Politechnika Warszawska SiMR.
- [7] Romaniszyn K. M.: Porównanie cech dynamicznych samochodu specjalnego przy różnych położeniach środków ciężkości. Kielce: Referat i publikacja przyjęte na konferencję „Problemy bezpieczeństwa w Pojazdach Samochodowych”, 2010.
- [8] Badania Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów ATH Bielsko-Biała związane z realizacją projektu badawczo-rozwojowego MNiSW nr N R10 0008 04 „Opracowanie sygnalizatora zagrożenia bezpieczeństwa do pojazdów o wysoko położonym środku masy”.