

Wyznaczanie charakterystyk opon i masowego momentu bezwładności samochodu na podstawie badań trakcyjnych

HUBERT SAR

Przemysłowy Instytut Motoryzacji w Warszawie

W pracy przedstawiono przykład wykorzystania jednośladowego modelu ruchu samochodu do opisu dynamiki krzywoliniowego ruchu pojazdu. Do obliczeń wykorzystano charakterystyki boczno-środkowego znoszenia opon, określone na podstawie pomiarów trakcyjnych pojazdu podczas ustalonego ruchu po okręgu. Na podstawie analizy porównawczej przebiegów prędkości kątowej oraz prędkości poprzecznej środka masy z przebiegami symulacyjnymi tych wielkości dokonano próby oszacowania momentu bezwładności samochodu względem centralnej osi bezwładności z . Do niniejszego opracowania wykorzystano wyniki badań trakcyjnych samochodu ford transit, będących przedmiotem pracy dyplomowej zrealizowanej w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej przez mgr inż. Marka Bielińskiego oraz mgr inż. Adama Daszewicza pod kier. mgr inż. Janusza Pokorskiego.

Wykaz używanych oznaczeń

- (x, y) – ruchomy układ współrzędnych związany z pojazdem
- (x_1, y_1) – ruchomy układ współrzędnych związany z osią przednią
- (x_2, y_2) – ruchomy układ współrzędnych związany z osią tylną
- (x_0, y_0) – nieruchomy układ współrzędnych
- x_{0S}, y_{0S} – współrzędne położenia środka masy S względem nieruchomego układu współrzędnych w kierunku osi x_0 , w kierunku osi y_0 [m]
- B_1, B_2 – siła poprzeczna przypadająca na oś przednią, tylną [N]
- F_y – siła boczna zakłócająca [N]
- I_z – masowy moment bezwładności pojazdu względem centralnej osi bezwładności z [kgm^2]
- K_1, K_2 – współczynnik odporności na boczne znoszenie kół osi przedniej, tylnej [N/rad]
- l_1, l_2 – odległość środka masy od osi przedniej, tylnej [m]
- m – masa pojazdu [kg]
- M_z – moment zakłócający w kierunku osi z [Nm]
- v – prędkość środka masy pojazdu [m/s]
- v_1, v_2 – prędkość wypadkowa osi przedniej, tylnej [m/s]
- v_{yA}, v_{yB} – prędkość poprzeczna pojazdu w miejscu zamocowania czujnika CORREVIT Q1, Q2 [m/s]
- v_{ysmodi} – symulacyjna prędkość poprzeczna środka masy pojazdu w i -tej chwili czasowej [m/s]
- v_{yspomi} – pomiarowa prędkość poprzeczna środka masy pojazdu w i -tej chwili czasowej [m/s]
- v_x – prędkość podłużna pojazdu [m/s]

- \dot{y} – prędkość poprzeczna środka masy pojazdu [m/s]
 \ddot{y} – przyspieszenie poprzeczne pojazdu [m/s²]
 α_1, α_2 – kąt bocznego znoszenia kół osi przedniej, tylnej [rad]
 β – kąt bocznego znoszenia pojazdu (kąt odchylenia kierunku prędkości środka masy od osi podłużnej pojazdu [rad]
 δ_1, δ_2 – kąt skrętu kół osi przedniej, tylnej [rad]
 ω_{modi} – symulacyjna prędkość kątowa pojazdu w i-tej chwili czasowej [rad/s]
 ω_{pomi} – pomiarowa prędkość kątowa pojazdu w i-tej chwili czasowej [rad/s]
 ψ – kąt odchylenia podłużnej osi pojazdu względem nieruchomego układu współrzędnych [rad]
 $\dot{\psi}$ – prędkość kątowa pojazdu [rad/s]
 $\ddot{\psi}$ – przyspieszenie kątowe pojazdu [rad/s²]

Pozostałe oznaczenia objaśnione są w miejscu ich występowania.

1. Wstęp

W pracy przedstawiono wyniki badań, na podstawie których wyznaczone zostały charakterystyki znoszenia kół przednich i tylnych oraz masowy moment bezwładności samochodu względem centralnej pionowej osi bezwładności.

Moment bezwładności został oszacowany na podstawie porównania wyników pomiarów z wynikami obliczeń prowadzonych dla jednośladowego modelu pojazdu, powszechnie stosowanego w tego typu badaniach.

2. Obiekt badań

Przedmiotem rozważań jest samochód marki Ford transit (1993) 2,5 D.

Tabela 1. Rozkład masy badanego samochodu (wybrane wartości).

Table 1. Research vehicle's mass distribution (selected values).

	Masa całkowita pojazdu m [kg]	Masa przypadająca na oś przednią m_p [kg]	Masa przypadająca na oś tylną m_t [kg]	Odległość środka masy od osi przedniej l_1 [m]	Odległość środka masy od osi tylnej l_2 [m]
Bez pasażerów	1826	1003	823	1,28	1,56
Kierowca i dwie osoby przy konsoli	2024	1081	943	1,32	1,51
Kierowca i pasażer z przodu oraz dwie osoby przy konsoli	2152	1122	1030	1,36	1,48
Kierowca i pasażer z przodu, trzy osoby przy konsoli oraz dwie osoby z tyłu	2377	1160	1217	1,45	1,38

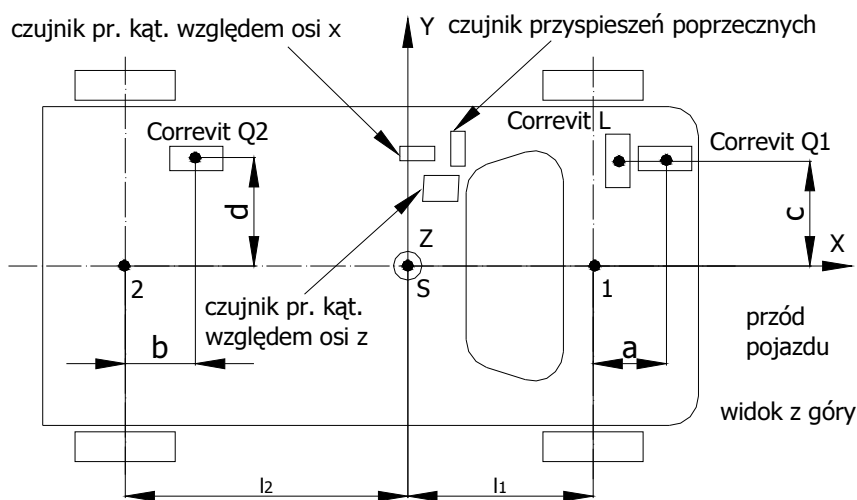
3. Aparatura pomiarowa

W trakcie pomiarów drogowych mierzono następujące wielkości:

- prędkość podłużną pojazdu,
- prędkość poprzeczną przedniej oraz tylnej części pojazdu,
- prędkość kątową pojazdu względem osi z,
- prędkość kątową pojazdu względem osi x,
- przyspieszenie poprzeczne,
- kąt obrotu koła kierownicy.

Zestaw pomiarowy (rys. 1) wykorzystywany w pomiarach składał się z:

- systemu pomiarowego PCI-EPP,
- czujnika prędkości podłużnej Datron Correvit L,
- czujników prędkości poprzecznej przedniej oraz tylnej części pojazdu Datron Correvit, odpowiednio Q1 oraz Q2,
- czujnika przyspieszeń Lucas-Schaevitz,
- czujnika obrotu koła kierownicy (śred. przełoż. u. kier. $i_k=26,2$),
- czujnika prędkości kątowej względem osi x,
- czujnika prędkości kątowej względem osi z.



Rys. 1. Umieszczenie czujników w pojeździe.

Fig. 1. Location of sensors in research vehicle.

$a=600\text{mm}$ - odległość czujnika prędkości poprzecznej Q1 od osi przedniej,

$b=480\text{mm}$ - odległość czujnika prędkości poprzecznej Q2 od osi tylnej,

$c=320\text{mm}$ - odległość czujnika prędkości poprzecznej Q1 od osi x,

$d=360\text{mm}$ - odległość czujnika prędkości poprzecznej Q2 od osi x,

1, 2 - środek geometryczny osi przedniej, tylnej.

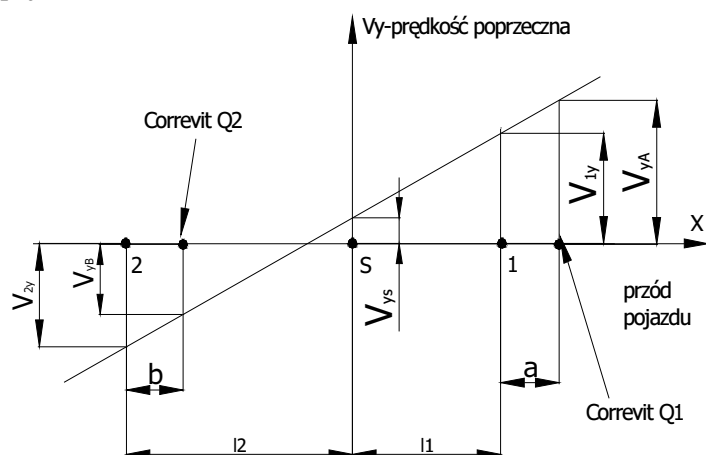
Dane na temat badań trakcyjnych samochodu ford transit można znaleźć w [1, 3].

4. Opracowanie wyników pomiarów

Identyfikacja masowego momentu bezwładności pojazdu względem osi z, poprzedzona wyznaczeniem charakterystyk opon, polegała na porównywaniu przebiegów prędkości kątowej oraz prędkości poprzecznej środka masy, uzyskanych z pomiarów z odpowiednimi wielkościami otrzymanymi na drodze obliczeniowej.

4.1. Pomiar prędkości kątowej oraz poprzecznej środka masy

Ze względu na brak możliwości umieszczenia czujników prędkości poprzecznej osi przedniej oraz tylnej pojazdu w płaszczyźnie osi przedniej oraz tylnej, należało zarejestrowane wartości z czujników Correvit Q zredukować odpowiednio do osi przedniej oraz tylnej. Na rysunku 2 przedstawiono liniową zależność prędkości poprzecznej wybranych punktów pojazdu w zależności od położenia tych punktów wzdłuż osi pojazdu:



Rys. 2. Liniowa zmiana prędkości poprzecznej wzdłuż osi podłużnej pojazdu.
Fig. 2. Linear change of lateral velocity across vehicle's longitudinal axis.

- prędkość poprzeczna osi przedniej:

$$v_{1y} = v_{yB} + \frac{v_{yA} - v_{yB}}{l_1 + a + l_2 - b} (l_1 + l_2 - b), \quad (1)$$

- prędkość poprzeczna osi tylnej:

$$v_{2y} = v_{yB} + \frac{v_{yA} - v_{yB}}{l_1 + a + l_2 - b} (-l_2 + l_2 - b), \quad (2)$$

- prędkość poprzeczna środka masy:

$$v_{yS} = v_{yB} + \frac{v_{yA} - v_{yB}}{l_1 + a + l_2 - b} (l_2 - b) , \quad (3)$$

- prędkość kątowna pojazdu:

$$\omega = \frac{v_{yA} - v_{yB}}{l_1 + l_2 + a - b} . \quad (4)$$

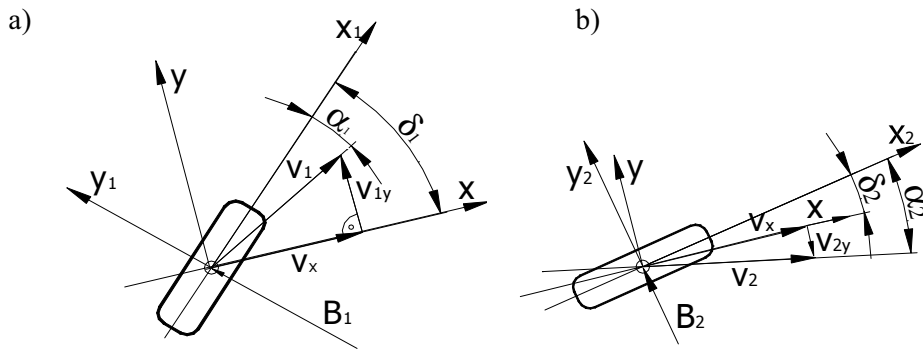
4.2. Wyznaczanie charakterystyk bocznego znoszenia opon

Charakterystyki bocznego znoszenia opon, reprezentatywne dla pary kół każdej z osi, wyznaczono na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych w warunkach ustalonego ruchu po okręgu o stałym promieniu ($R=20$ m) z różnymi prędkościami (pomiar wg ISO 4138). Do określenia charakterystyk konieczna była znajomość przebiegów czasowych:

- prędkości podłużnej pojazdu,
- prędkości poprzecznej osi przedniej,
- prędkości poprzecznej osi tylnej,
- kąta obrotu koła kierownicy,
- przyspieszenia dośrodkowego.

Znajomość przyspieszenia dośrodkowego była potrzebna do oszacowania sił bocznych, przypadających na oś przednią oraz tylną.

Zależności między kątami występującymi na kołach osi przedniej oraz tylnej ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Analiza kąta bocznego znoszenia opon na podstawie pomiarów trakcyjnych:

a) oś przednia, b) oś tylna.

Fig. 3. Analysis of slip angle on the basis of road measurement tests:

a) front axis, b) rear axis.

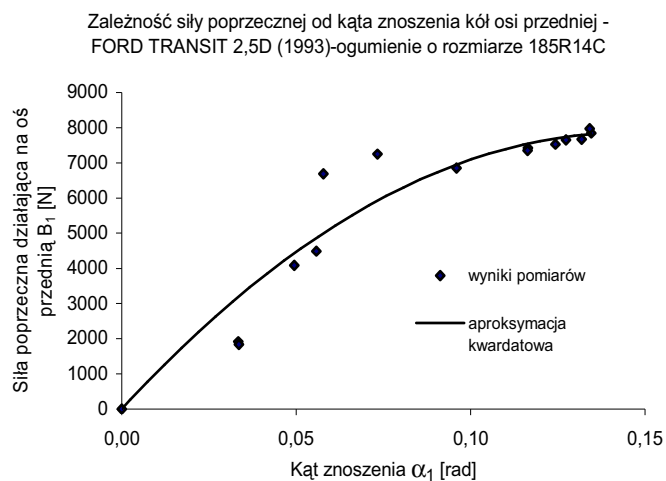
$$\alpha_1 = \delta_1 - \arctg \frac{v_{1y}}{v_x} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \delta_2 + \arctg \frac{v_{2y}}{v_x} \quad (6)$$

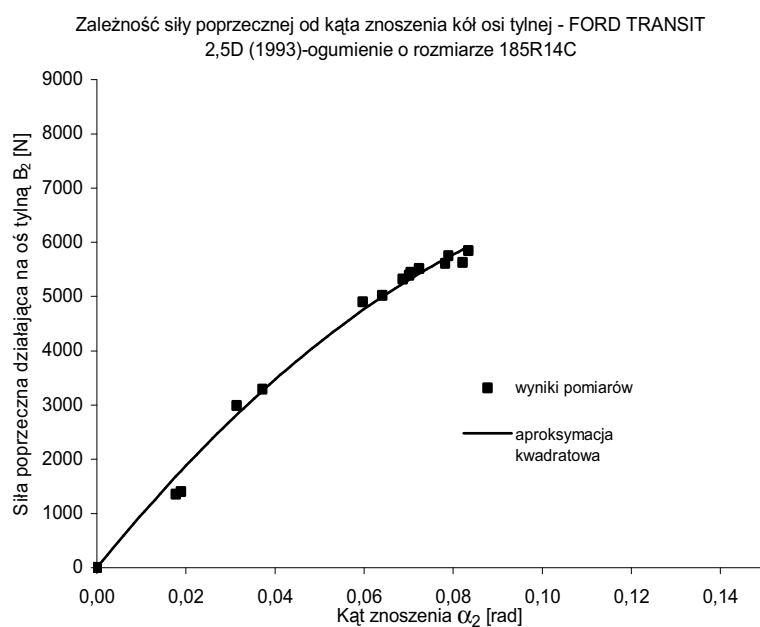
Tabela 2. Wartości siły bocznej oraz kątów bocznego znoszenia kół osi przedniej oraz tylnej.

Table 2. Lateral force and slip angles for front and rear axis.

Nazwa zbioru danych	Kąt skrętu kół osi przedniej δ_1 [rad]	Siła odśrodkowa bezwładności F_i [N]	Siła poprz. B_1 [N]	Kąt bocznego znoszenia kół osi przedniej α_1 [rad]	Siła poprz. B_2 [N]	Kąt bocznego znoszenia kół osi tylnej α_2 [rad]
OKRĄG1	0,18	13600	7850	0,14	5750	0,08
ok. 40km/h	0,17	13300	7650	0,13	5600	0,08
OKRĄG8	0,14	7800	4500	0,06	3300	0,04
ok. 30km/h	0,13	7100	4100	0,05	3000	0,03
OKRĄG9	0,14	3200	1850	0,03	1350	0,02
ok. 20km/h	0,13	3300	1900	0,03	1400	0,02



Rys. 4. Zależność siły poprzecznej działającej na oś przednią od kąta znoszenia kół osi przedniej.
Fig. 4. Lateral force acting on front axis in dependence on front axis wheels' slip angle.

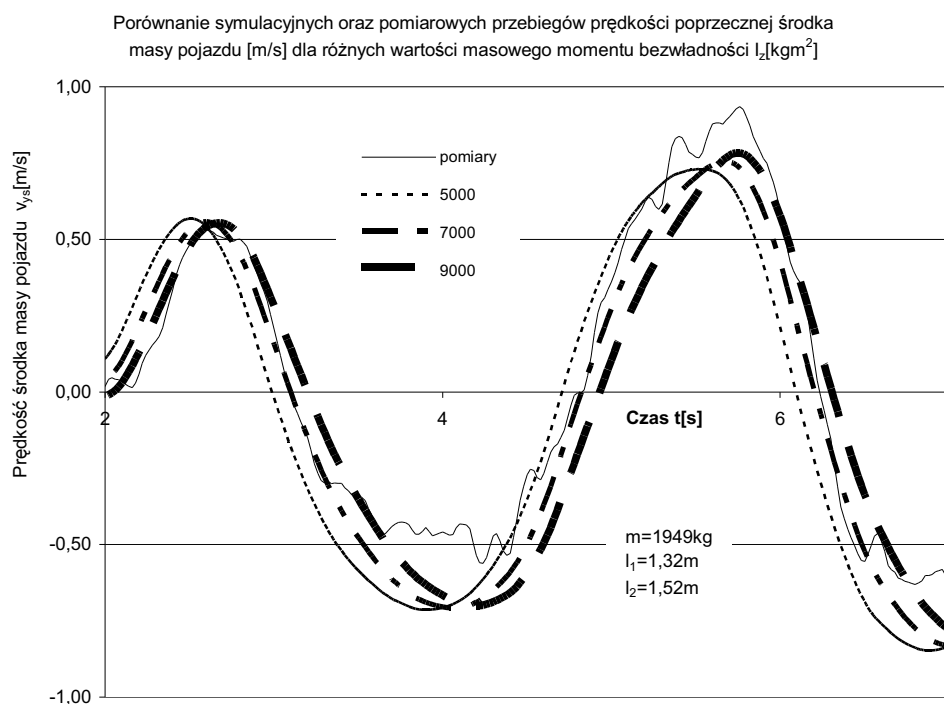


Rys 5. Zależność siły poprzecznej działającej na oś tylną od kąta znoszenia kół osi tylnej.
Fig. 5. Lateral force acting on rear axis in dependence on rear axis wheels' slip angle.

Jako siłę poprzeczną w przypadku obu osi przyjęto odpowiednią składową siły odśrodkowej.

Pominięto wpływ oddziaływań zewnętrznych – $F_y=0$, $M_z=0$.

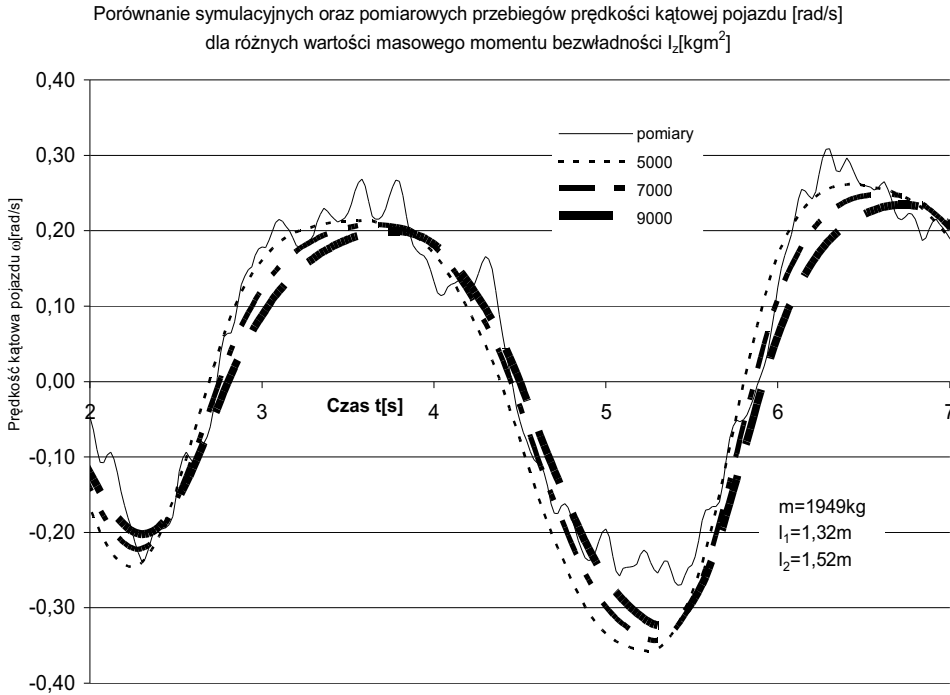
Na rysunku 7 dla próby slalomu przy prędkości około 80 km/h zestawiono przebiegi prędkości poprzecznej wynikające z pomiarów oraz z obliczeń modelu.



Rys. 7. Symulacyjne oraz pomiarowe przebiegi czasowe prędkości poprzecznej środka masy pojazdu [m/s] dla różnych wartości masowego momentu bezwładności I_z [kgm²].

Fig. 7. Simulated and measured real-time characteristics of vehicle's center of gravity lateral velocity [mps] for different values of mass moment of inertia I_z [kgm²].

Na rysunku 8 dla próby slalomu przy prędkości około 80 km/h przedstawiono uzyskane w ten sam sposób przebiegi prędkości kątowej pojazdu.



Rys 8. Symulacyjne oraz pomiarowe przebiegi czasowe prędkości kątowej pojazdu [m/s] dla różnych wartości masowego momentu bezwładności I_z [kgm²].

Fig. 8. Simulated and measured real-time characteristics of vehicle's angular velocity [rad/s] for different values of mass moment of inertia I_z [kgm²].

4.4. Identyfikacja masowego momentu bezwładności pojazdu względem osi z

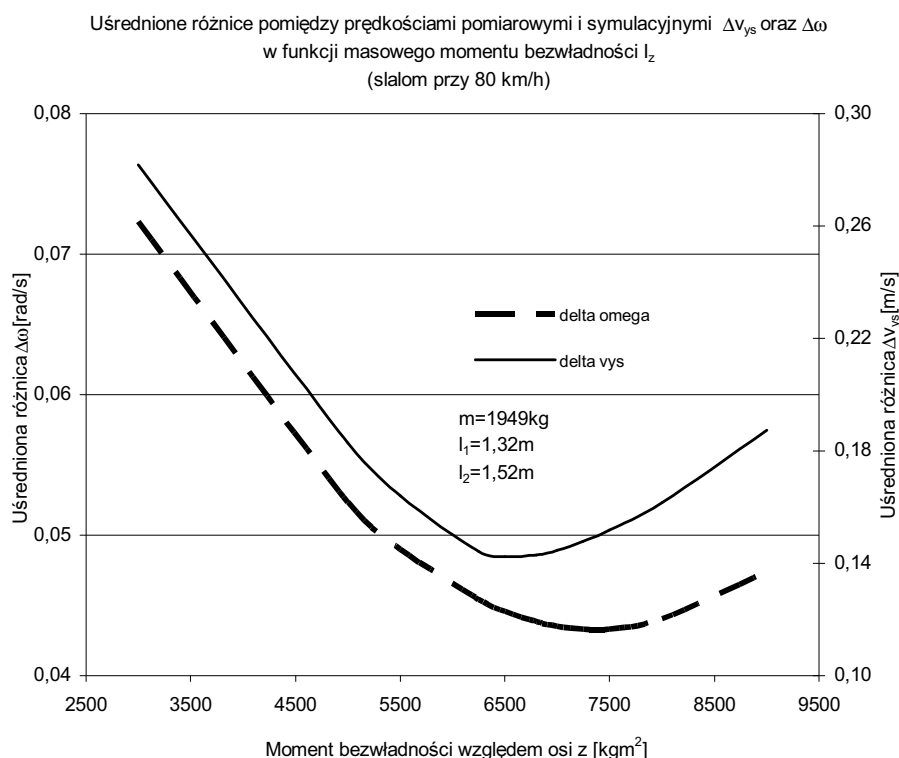
Na rysunku 9 zestawiono wartości różnic Δv_{ys} oraz $\Delta \omega$, uśrednionych dla tych samych przedziałów czasowych, pomiędzy prędkościami poprzeczną środka masy oraz kątową, uzyskanymi z pomiarów a wartościami symulacyjnymi tych wielkości w funkcji masowego momentu bezwładności pojazdu względem osi z, których wartości zdefiniowano wg następujących wzorów:

$$\Delta v_{ys} \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{\sum_{i=k}^n |v_{ys\text{pomi}} - v_{ys\text{modi}}|}{n-k+1}, \quad k \in N - \{0\}, \quad (8)$$

$$\Delta \omega \left[\frac{rad}{s} \right] = \frac{\sum_{i=k}^n |\omega_{pomi} - \omega_{modi}|}{n-k+1}, \quad k \in N - \{0\}. \quad (9)$$

gdzie:

- k - k -ta chwila czasowa,
- $n-k+1$ - liczba analizowanych punktów pomiarowych.



Rys. 9. Zestawienie uśrednionych różnic Δv_{ys} [m/s] oraz $\Delta\omega$ [rad/s] pomiędzy prędkościami symulacyjnymi i pomiarowymi w zależności od masowego momentu bezwładności pojazdu I_z [kgm²] względem osi z.

Fig. 9. Comparison of average differences Δv_{ys} [m/s] and $\Delta\omega$ [rad/s] between simulated and measured velocities for different values of mass moment of inertia I_z [kgm²] about z-axis.

5. Wnioski

Pomiary trakcyjne takich wielkości, jak prędkość podłużna, prędkość poprzeczna osi przedniej oraz tylnej oraz przyspieszenie poprzeczne i kąt obrotu kierownicy pozwalają m.in. na:

- wyznaczenie charakterystyk znoszenia opon,
- identyfikację masowego momentu bezwładności względem osi z.

Problemem jest jednak fakt, że:

- otrzymane w ten sposób charakterystyki opisują właściwości pary kół lewego oraz prawego, a nie każdego oddzielnie,
- przy identyfikacji masowego momentu bezwładności wartości z pomiarów prędkości poprzecznej środka masy nie zostały skorygowane o przechyły poprzeczne bryły nadwozia, co mogło prowadzić do pewnej rozbieżności wyników (kryterium prędkości poprzecznej i kątowej).

Pomiar przechyłów poprzecznych (względem osi x) przy użyciu czujnika prędkości kątowej oraz przy znajomości sztywności zawieszenia pojazdu dałby możliwość skorygowania wskazań optycznych czujników prędkości poprzecznej Datron COR-REVIT Q oraz wyznaczenie charakterystyk opon oddzielnie dla każdego z kół.

Identyfikacja masowego momentu bezwładności poprzez analizę porównawczą przebiegów czasowych prędkości poprzecznej środka masy oraz prędkości kątowej pojazdu z wartościami symulacyjnymi tych wielkości musi być zweryfikowana o statyczny stanowiskowy pomiar momentu bezwładności (np. metoda wahadła [2]).

Literatura

- [1] BIELIŃSKI M., DASZEWICZ A.: *Przygotowanie samochodu laboratoryjnego do badań dydaktycznych nad bezpieczeństwem ruchu pojazdu: kierowność, stateczność, hamowność*. Praca dyplomowa. Politechnika Warszawska, Wydział SiMR. Rok akad. 2002/2003.
- [2] Gernet M.M., Ratobylskij B.F.: *Opredelenje momentow inercji*. Maszynostrojenje. Moskwa 1969.
- [3] Pokorski J., Bieliński M.: *System pomiarowy do badania stateczności pojazdu*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, 4(51)/2003. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.

Identification of tyres' characteristics and vehicle's mass moment of inertia on the basis of road measurement tests

S u m m a r y

Article presents an example of using vehicle's "bicycle" motion model for the analysis of vehicle's curvilinear motion. The characteristics of tyres' side slip, identified on the basis of road measurement steady-state circle motion, were used in the analysis. According to specific comparison of real-time characteristics of measured angular velocity and center of gravity lateral velocity with the real-time simulated characteristics of these values, an attempt of rating the vehicle's mass moment of inertia about z-axis was done. For the article results of ford transit road measurement tests were used. They were the subject of master's thesis written by Mr Marek Bieliński MSc and Mr Adam Daszewicz MSc in The Institute of Vehicles at Warsaw University of Technology in support of Mr Janusz Pokorski MSc.