

ROBERT JANCZUR, JÓZEF KNAPCZYK*, MICHAŁ MANIOWSKI**

**BADANIE CHARAKTERYSTYK
ELASTOKINEMATYCZNYCH MECHANIZMU
5-WAHACZOWEGO PROWADZENIA
KÓŁ SAMOCHODU**

**STUDY FOR ELASTO-KINEMATIC CHARACTERISTICS
OF 5-ROD WHEEL GUIDING MECHANISM OF A CAR**

Streszczenie

Wykonano pomiary stanowiskowe przemieszczeń zwrotnicy koła pod działaniem sił podłużnej i poprzecznej, wywieranych w miejscu styku opony z platformą obrotowo-przesuwaną. Wyniki pomiarów opracowano jako charakterystyki elastokinematyczne mechanizmu prowadzenia kół przednich, złożonego z zawieszenia 5-wahaczowego i układu kierowniczego z przekładnią zębatkową samochodu VW Passat.

Słowa kluczowe: zawieszenie 5-wahaczowe, charakterystyki elastokinematyczne

Abstract

Spatial displacements of the wheel knuckle caused by quasi-static external load applied at the contact patch of the tire with the supporting plate are measured by using Datron RV3 Sensor. The measurement results are presented as elastokinematic characteristics of the studied wheel guiding mechanism, consisted of the 5-rod suspension with rack and pinion steering system of the VW Passat.

Keywords: 5-rod suspension, elastokinematic characteristics

*Dr inż. Robert Janczur, prof. dr hab. inż. Józef Knapczyk, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

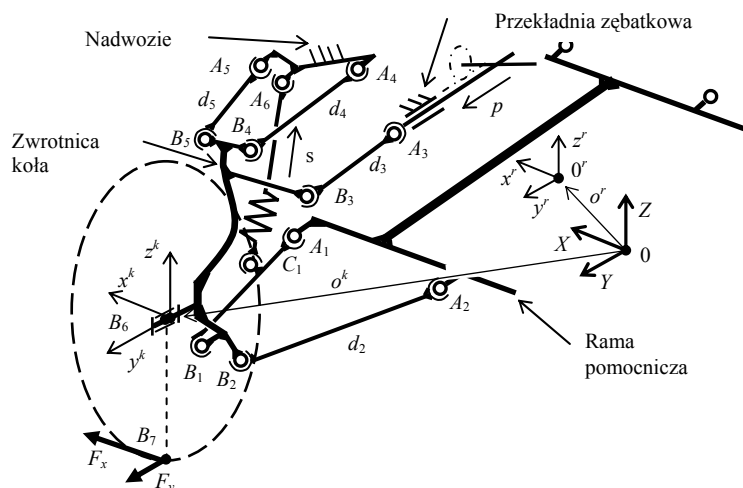
**Dr inż. Michał Maniowski, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Sztywność mechanizmu prowadzenia kół samochodu, zwłaszcza w kierunkach różnych od kierunku ruchu resorowania koła, znacząco wpływa na jego charakterystyki kierowalności i stateczności oraz komfortu. Nieodpowiednia sztywność elementu zawieszenia, np. tulejki metalowo-gumowej, może wywołać istotne przemieszczenia osi koła pod działaniem obciążenia, np. zmianę zbieżności kół, a także obniżyć częstość drgań własnych [5]. Wyniki analizy sztywności mechanizmu można przedstawić w postaci charakterystyk elastokinematycznych [1] lub jako zbiory liczbowe zapisane w postaci macierzy sztywności [2, 3], która jest zależna od położenia i stanu obciążenia.

W artykule rozpatrzono mechanizm prowadzenia kół przednich samochodu VW Passat (rok produkcji 2004) z zawieszeniem 5-wahaczowym, którego model kinematyczny przedstawiono na rys. 1. Znaczące przemieszczenia resorowania i zataczania kół są określone przede wszystkim przez więzy kinematyczne i odkształcenia członów o dużej podatności, jak np. ugięcie sprężyny resorującej s i promieniowe odkształcenie opony wywołane działaniem obciążenia zewnętrznego lub zmiany położenia mechanizmu kierowniczego w wyniku przesunięcia p przekładni zębatkowej. Analizy przemieszczeń resorowania i zataczania kół mogą być wykonane z zastosowaniem odpowiednich modeli kinematycznych mechanizmu prowadzenia (zawiesz) kół o 1 lub 2 stopniach ruchliwości [2, 5].

Odkształcenia elementów przegubów, np. tulejek elastomerowych (tzw. silentbloków) w wahaczach i drążkach zawieszenia, pod działaniem na koło obciążenia zewnętrznego wywołują dodatkowo małe, lokalne przemieszczenia, które wpływają na kierowalność, stateczność i komfort pojazdu [4, 5]. Charakterystyki elastokinematyczne mechanizmu prowadzenia koła samochodu zależą od wymiarów mechanizmu, przestrzennego rozkładu podatności w przegubach i członach mechanizmu, a także od położenia, kierunku i wartości działającego obciążenia zewnętrznego [3, 6].



Rys. 1. Schemat kinematyczny 5-wahaczowego mechanizmu prowadzenia koła (lewego) przedniego

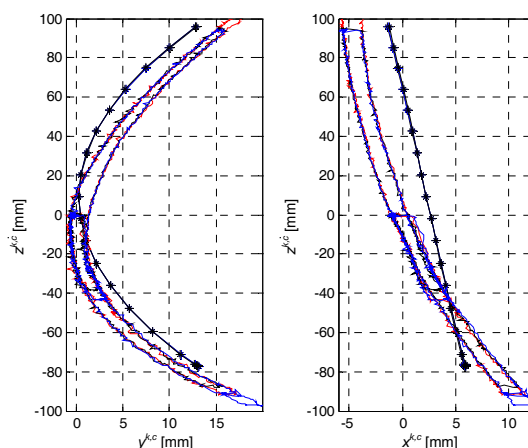
Fig. 1. Kinematic scheme of 5-rod mechanism for guiding of front left wheel

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie metody badań i opracowania wyników pomiarów zawieszenia 5-wahaczowego na stanowisku do badań elastokinematycznych. Uzyskane w ten sposób dane będą wykorzystane do opracowania modelu dynamicznego rozpatrywanego układu koło–zawieszenie.

2. Badanie przemieszczeń zwrotnicy koła bez obciążenia

Przed właściwymi badaniami elastokinematycznymi wykonano pomiary przemieszczeń zwrotnicy koła wynikających ze zmiany odległości punktów podparć sprężyny resorującej (wyjętej z układu) oraz przesunięcia zębátky, przy czym pomiary wykonano za pomocą manipulatora RV-3 Datron [4]. Przemieszczenia zwrotnicy wymuszano kinematycznie, zmieniając wartości: s – długości łącznika zastępującego sprężynę resorującą oraz p – przesunięcia zębátky układu kierowniczego. Rozpatrzono ruchy resorowania koła ($s = \text{var}$) przy stałym położeniu układu kierowniczego ($p = \text{const}$) oraz ruchy zataczania ($p = \text{var}$) przy stałej pozycji zawieszenia ($s = \text{const}$). W przyjętych warunkach badań (bez obciążenia układu) wpływ odkształceń podatnych przegubów zawieszenia może być pominięty [2].

Przykładowe wyniki pomiarów dotyczące wymuszenia ruchu resorowania ($s = \text{var}$) lewego przedniego koła przy stałym położeniu układu kierowniczego ($p = 0$) przedstawiono na rys. 2 i 3. Na charakterystyki otrzymane z pomiarów (z trzech powtórzeń) nałożono także odpowiednie wyniki z symulacji z wykorzystaniem modelu kinematycznego rozpatrywanego mechanizmu [4].



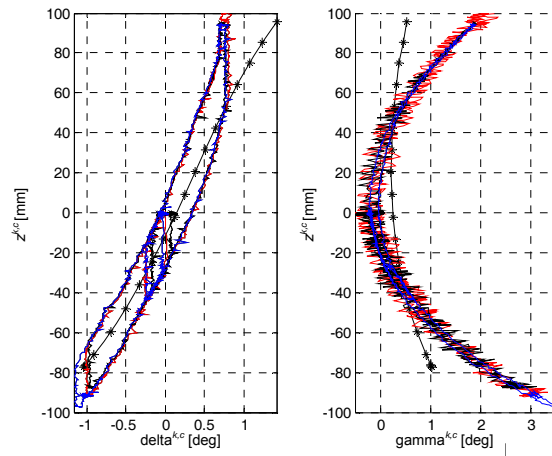
Rys. 2. Zmiany wartości współrzędnych (x^k i y^k) pozycji środka koła w funkcji ugięcia zawieszenia (z^k), porównanie wyników pomiarów (3 powtórzenia) i obliczeń (znacznik gwiazdka)

Fig. 2. Changes of wheel center coordinates (x^k i y^k) as a function of suspension travel (z^k), comparison of measurement (3 repetition) and simulation results (star marker)

Trajektorie pozycji środka koła w rzutach na płaszczyzny podłużną (xz) i poprzeczną (yz) w funkcji ugięcia zawieszenia (z^k), otrzymane z obliczeń i pomiarów, przedstawiono na

rys. 2. Środek koła przemieszcza się poprzecznie (wzdłuż osi y) o ok. 20 mm oraz podłużnie (wzdłuż osi x) o ok. 15 mm w funkcji ugięcia resorowania (przesunięcie wzdłuż osi z) mieszczącego się w zakresie ok. ± 100 mm (kompresja odpowiada wartościom dodatnim).

Zmiany wartości kątów zbieżności i pochylenia koła w funkcji ugięcia zawieszenia (z^k), otrzymane z obliczeń i pomiarów, przedstawiono na rys. 3. Kąt zbieżności koła zmienia się w zakresie ok. ± 1 deg, a kąt pochylenia do 3 deg. Nałożenie na rozpatrywane charakterystyki (rys. 2 i 3) wyników z trzech powtórzeń pomiarów potwierdza dobrą powtarzalność wyników. Stwierdza się także wystarczającą zgodność wyników otrzymanych za pomocą modelu w porównaniu z wynikami eksperymentalnymi.



Rys. 3. Zmiany wartości kątów zbieżności i pochylenia koła w funkcji ugięcia zawieszenia (z^k), porównanie wyników pomiarów (3 powtórzenia) i obliczeń (znacznik gwiazdka)

Fig. 3. Changes of wheel toe and camber angles as a function of suspension travel (z^k), comparison of measurement (3 repetition) and simulation results (star maker)

Na podstawie omówionych wyników pomiarów estymowano niektóre wymiary mechanizmu prowadzenia kół przednich, które podano w tab. 1. Do estymacji wykorzystano metody opracowane w [4].

Tabela 1

Dane geometryczne modelu mechanizmu zawieszenia (rys. 1) w pozycji konstrukcyjnej

[mm]	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
x	-103,2	309,3	200,8	205,8	-1,7	-96,0	0,0
y	-490,6	-204,6	-283,6	-269,6	-349,6	-52,9	5,6
z	-65,6	-49,6	-11,6	95,4	118,4	156,5	-302,0
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
x	-47,8	34,9	139,1	76,9	6,3	6,3	6,3
y	-50,1	-77,3	-47,4	-59,7	-52,2	-52,2	-52,2
z	-87,9	-133,8	-42,1	85,9	119,9	119,9	119,9

3. Badanie charakterystyk elastokinematycznych mechanizmu

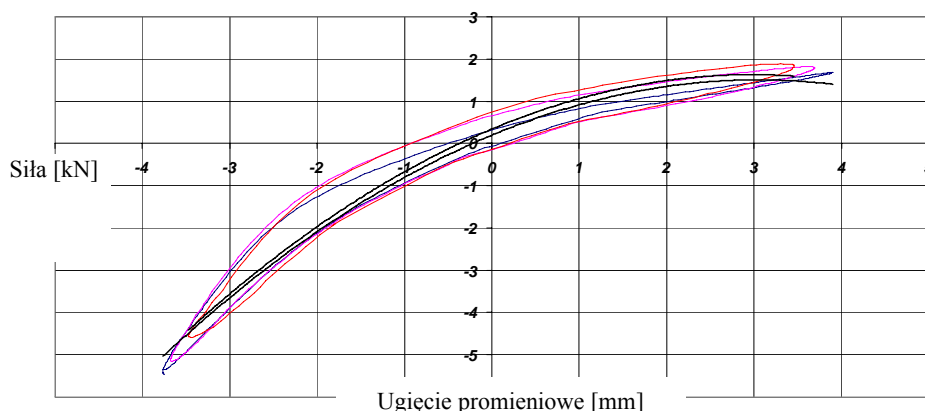
W celu wyznaczenia charakterystyk elastokinematycznych kompletnego mechanizmu prowadzenia koła samochodu badawczego wykonano pomiary przemieszczeń zwrotnicy koła pod działaniem obciążenia w płaszczyźnie jezdni (F_x , F_y), wywieranego quasi-stacycznie w miejscu współpracy opony z jezdnią (punkt B_7 na rys. 1). Do pomiarów pozycji i orientacji zwrotnicy koła wykorzystano manipulator RV-3 [4], do pomiarów obciążenia – czujniki tensometryczne naklejone na drążkach wahaczy oraz siłowniki hydrauliczne umożliwiające zadawanie oraz rejestrację siły wymuszającej. Nadwozie samochodu zostało zamocowane na stanowisku w położeniu konstrukcyjnym.

Charakterystyki siła–ugięcie (promieniowe) przegubów podatnych zainstalowanych w wahaczach rozważanego zawieszenia wyznaczono na stanowisku ze wzbudnikiem elektrohydraulicznym. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 4 dla wahacza nr 2 (rys. 1).

Do analizy elastokinematycznej, przy quasi-stacycznych obciążeniach, charakterystyki siła F_p –ugięcie x promieniowe i -tego przegubu, pomijając histerezę, aproksymowano wielomianem pierwszego lub wyższego stopnia, w zależności od charakterystyki przegubu, o następującej postaci

$$F_{p,i} = k_{i,1}x + k_{i,2}x^2 + k_{i,3}x^3; \quad i = 1 \dots 5 \quad (1)$$

W tabeli 2 podano przykładowe wyniki dotyczące współczynników sztywności podatnego łącznika wahacza nr 2 (rys. 1), wyznaczonych przy wymuszeniu sinusoidalnym o częstotliwości 1 oraz 20 Hz. Różnice wartości otrzymanych współczynników sztywności (tj. współczynników wielomianów aproksymujących) przy różnych częstotliwościach wymuszenia wynikają z właściwości reologicznych elastomeru (sztywność dynamiczna), co jest szczególnie ważne przy formułowaniu modelu dynamicznego przegubu podatnego.



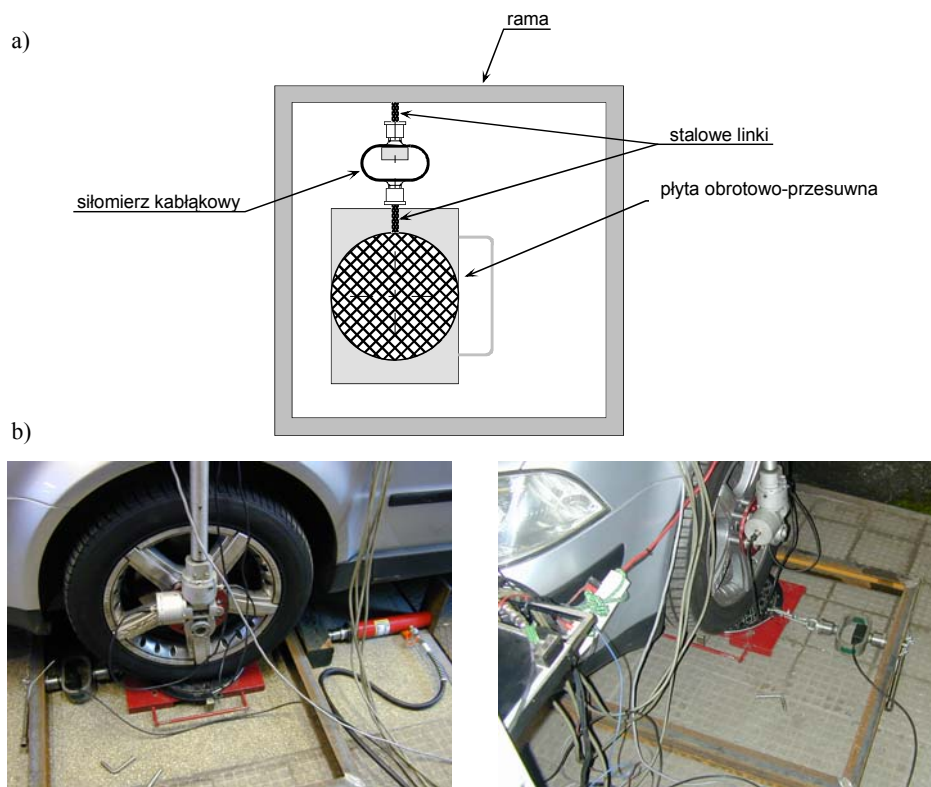
Rys. 4. Przykładowe charakterystyki siła–ugięcie promieniowe przegubu podatnego (wahacz nr 2) wraz z krzywą aproksymującą, wyznaczone na stanowisku z siłownikiem elektrohydraulicznym

Fig. 4. Sample of force-radial deflection characteristics of elastic bushing (link no. 2) together with approximation curves, determined at test rig with electro-hydraulic actuator

Współczynniki sztywności obliczone wg wzoru (1) dla podatnego łącznika wahacza nr 2, estymowane w warunkach wymuszenia sinusoidalnego o częstotliwości $f = 1$ oraz 20 Hz

Wahacz	Wsp. sztywności ($f = 1$ Hz)	Wsp. sztywności ($f = 20$ Hz)
2	$k_{2,1} = 0,8176$ [kN/mm] $k_{2,2} = -0,1382$ [kN/mm ²]	$k_{2,1} = 0,8536$ [kN/mm] $k_{2,2} = -0,1458$ [kN/mm ²]

Do wywierania sił stycznych (wzdłużnej lub poprzecznej) na koło samochodu, przy jednoczesnym zminimalizowaniu wartości momentu skręcającego koło w płaszczyźnie jezdni, wykonano urządzenie wyposażone w płytę obrotowo-przesuwną i siłomierz. Urządzenie to przedstawiono na rys. 5b). Płyta obrotowo-przesuwna, ułożyskowana tocznie, wykorzystana jako podparcie koła samochodu, jest połączona z siłomierzem kabłąkowym i ramą urządzenia za pomocą stalowych linek, przenoszących tylko siłę rozciągającą. Siłę



Rys. 5. Schemat przyrządu do wywierania siły stycznej na koło samochodu (a), przyrządu do wywierania i pomiaru siły stycznej na koło samochodu oraz do pomiaru przemieszczenia koła (b)

Fig. 5. Scheme of platform for exerting load on wheel (a), apparatus for exerting and measuring of horizontal force on wheel and for measurements of wheel displacement (b)

styczną działającą wzdłużnie lub poprzecznie względem osi podłużnej samochodu wywierano siłownikiem hydraulicznym na stalową ramę urządzenia, przesuwaną się na gładkim twardym podłożu. Siła ta, zmniejszona o opory tarcia ramy o podłoże, przenoszona była przez stalową linkę na siłomierz i z siłomierza na płytę obrotowo-przesuwną. W ten sposób mierzono siłę, z jaką rama urządzenia ciągnęła płytę obrotowo-przesuwną obciążoną zahamowanym przednim kołem badanego pojazdu. Przyrządy wykorzystane podczas badań pokazano na rys. 5b).

Tabela 3

Wyniki pomiarów elastokinematycznych mechanizmu zawieszenia (rys. 1) odpowiadające zmianie pozycji i orientacji środka koła z pozycji konstrukcyjnej pod wpływem obciążenia siłą wzdłużną

F_x [kN]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	δ [deg]	γ [deg]
-2	$-10 \pm 0,5$	$-0,5 \pm 0,5$	$-8 \pm 0,5$	$-0,1 \pm 0,2$	$0,1 \pm 0,2$
+2	$4 \pm 0,5$	$0,5 \pm 0,5$	$8 \pm 0,5$	$0 \pm 0,2$	$0 \pm 0,2$

Przykładowe wyniki pomiarów zawarto w tab. 3, odpowiadają one zmianie pozycji i orientacji środka koła z pozycji konstrukcyjnej zawieszenia pod wpływem obciążenia quasi-statycznego siłą wzdłużną (F_x) o wartości ± 2 kN.

Przyłożenie siły $F_x = -2$ kN, która może odpowiadać sile generowanej podczas hamowania samochodu, powoduje, że środek koła wyraźnie przemieszcza się do tyłu samochodu w kierunku osi x (-10 mm) oraz wzdłuż osi z (-8 mm) w kierunku odbicia zawieszenia. Przemieszczenie w pierwszym kierunku x jest związane z tzw. podatnością podłużną mechanizmu prowadzenia koła, która jest wymagana dla odpowiedniego komfortu. Przemieszczenie w drugim kierunku z jest związane z własnością rozpatrywanego zawieszenia do przeciwdziałania nurkowania nadwozia samochodu podczas hamowania. Badane koło przednie pod wpływem siły hamującej na stanowisku wysuwa się z nadkola w kierunku odbicia. W warunkach drogowych podczas hamowania taka cecha ma wpływ na zmniejszenie przechyłu podłużnego nadwozia przez zmniejszenie ugięcia po stronie kompresji zawieszenia przedniego. Pod wpływem omawianego obciążenia koło samochodu jest prowadzone praktycznie bez zmian orientacji, tzn. wartości kątów zbieżności δ i pochylenia γ koła są nieznaczne, co wpływa pozytywnie na jednoznaczność i precyzję prowadzenia samochodu.

Przyłożenie siły $F_x = +2$ kN, sprawia, że środek koła przemieszcza się w tych samych kierunkach, ale o przeciwnym zwrocie. Dodatkowo przemieszczenie w kierunku osi x osiąga teraz mniejsze wartości ($+4$ mm), jest to związane z większą sztywnością przegubu podatnego w wahaczu nr 2 po stronie rozciągania, co przedstawiono na charakterystyce z rys. 4. Przemieszczenie środka koła wzdłuż osi z osiąga taką samą wartość bezwzględną jak w poprzednim przypadku ($F_x = -2$ kN). Ta cecha mechanizmu zawieszenia zależy od wymiarów mechanizmu i sztywności w kierunku resorowania, a nie zależy praktycznie od sztywności przegubów podatnych.

4. Podsumowanie

Wykorzystując manipulator pomiarowy RV-3 Datron, mierzono przemieszczenia osi koła pod działaniem obciążenia quasi-statycznego w postaci siły podłużnej lub poprzecznej,

wywieranej w miejscu styku opony z platformą obrotową. Wyniki pomiarów opracowano w postaci charakterystyk elastokinematycznych mechanizmu prowadzenia kół przednich, złożonego z zawieszenia 5-wahaczowego i układu kierowniczego samochodu VW Passat. Koła samochodu obciążone siłami stycznymi (od hamowania czy poruszania się po łuku) wykonują elastyczne przemieszczenia, które zależą od rozkładu przestrzennej podatności mechanizmu zawieszenia.

Pełna estymacja charakterystyk elastokinematycznych jest bardzo pracochłonna. Wymaga znajomości wymiarów modelu mechanizmu i charakterystyk siła–ugięcie przegubów podatnych lub charakterystyk siła–przemieszczenie środka koła przy różnych złożonych stanach obciążenia.

Prace finansowano z grantu nr N502 059 031/2391.

Literatura

- [1] Knapczyk J., Maniowski M., *Charakterystyka elastokinematyczna wielowahaczowego zawieszenia koła samochodu z ramą pomocniczą*, Teka Komisji Nauk.-Probl. Motoryzacji PAN O. Kraków, z. 29–30, Kraków 2005.
- [2] Knapczyk J., Maniowski M., *Elastokinematic modeling and study of five-rod suspension with subframe*, Mechanism and Machine Theory, Elsevier, Vol. 41, 2006.
- [3] Knapczyk J., Maniowski M., *Synthesis of a five-rod suspension for given load-displacement characteristics, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Proc. ImechE, Vol. 220, 2006.
- [4] Maniowski M., *Analiza drgań wspornika koła samochodu wymuszonych pulsacjami momentu hamującego*, praca doktorska, Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej, Kraków 2005.
- [5] Matchinsky W., *Radfahrungen der Strassenfahrzeuge*, Kinematik, Elasto-Kinematik und Konstruktion, Springer, Berlin 1998.
- [6] Meissonnier J. et al., *Geometric identification of an elastokinematic model in a car suspension, Part D: J. Automobile Engineering*, Proc. ImechE, Vol. 220, 2006.