

mgr inż. Krzysztof Kulikowski

dr inż. Dariusz Szpica

Faculty of Mechanical Engineering
Białystok University of Technology,
Wiejska Str. 45C, 15-351 Białystok, Poland
E-mail: k.kulikowski@doktoranci.pb.edu.pl
d.szpica@pb.edu.pl

Wyznaczanie sztywności kierunkowych opon pojazdów samochodowych w warunkach statycznego działania obciążenia

Słowa kluczowe: sztywność, opona pneumatyczna, wyznaczenie, badania statyczne

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań stanowiskowych różnego rodzaju opon samochodowych w warunkach statycznych. Próby przeprowadzono na stanowisku umożliwiającym rejestrację siły i odkształcenia badanej opony. Uzyskane wyniki posłużyły wyznaczeniu sztywności kierunkowych opon, wykorzystując własne oprogramowanie identyfikujące. W kolejnym etapie wykonano odciski bieżnika, które posłużyły do wyznaczenia pola powierzchni styku opony z podłożem w zależności od ciśnienia wewnątrz opony oraz obciążenia. Wyniki wykazały korelacje dotyczące wzrostu sztywności w miarę zwiększania ciśnienia w oponie przy ocenie promieniowej, wzdłużnej, skrętnej, przeciwne wnioski wysunięto w przypadku oceny obwodowej. Zaprezentowano również opony odstające o charakterystykach znacznie odbiegających od badanej grupy. Otrzymane wyniki mogą być danymi wejściowymi do badań dynamicznych.

1. Wstęp

Oczekiwania jakie stawia się oponom samochodowym nie ograniczają się jedynie do zapewnienia im jak najdłuższej żywotności. Tabela 1 przedstawia szereg innych wymagań stawianych ogumieniu.

Tab.1. Wymagania stawiane oponom samochodowym

Wymagania stawiane oponom samochodowym			
materiałowe:	ekonomiczne:	eksploatacyjne:	funkcjonalne:
<ul style="list-style-type: none">• możliwość bieżnikowania	<ul style="list-style-type: none">• dostępność technologii wykonania	<ul style="list-style-type: none">• dobra przyczepność	<ul style="list-style-type: none">• prawidłowa charakterystyka naprężenie – odkształcenie
<ul style="list-style-type: none">• odporność na warunki klimatyczne	<ul style="list-style-type: none">• dostępność materiałowa	<ul style="list-style-type: none">• odporność na starzenie	<ul style="list-style-type: none">• odprowadzanie wody
<ul style="list-style-type: none">• niska masa	<ul style="list-style-type: none">• niska cena	<ul style="list-style-type: none">• odporność na ścieranie	<ul style="list-style-type: none">• równowaga statyczna i dynamiczna
<ul style="list-style-type: none">• możliwość recyklingu		<ul style="list-style-type: none">• niski hałas	
		<ul style="list-style-type: none">• długa żywotność	

Wymagania stawiane oponom to również wysoka odporność na ścieranie, optymalne charakterystyki sztywności oraz niskie opory toczenia [9]. Zostały one przedstawione na w tabeli 1. Zachowanie opony zależy w głównej mierze od jej interakcji z podłożem [7], ale wpływ na ich pracę ma również prędkość jazdy oraz naciski na osie pojazdu [15]. Parametrami decydującymi o zdolności kontroli pojazdu, poza geometrią układu jezdnego (kierowniczego), naciskami na oś i prędkością jazdy, są m.in. wyznaczone w poniższej pracy sztywności oraz pole powierzchni styku bieżnika opony z podłożem. Decyduje to o kącie znoszenia bocznego ogumienia [5].

Na podstawie analizy literatury w przedmiotowej tematyce należy stwierdzić, iż niewielka jej część dotyczy wyznaczania istotnych parametrów opon będących w eksploatacji. W opracowaniu [17] przedstawiono metody wyznaczania sztywności promieniowej m.in. metodę statyczną, w której badania przeprowadzono przy różnych ciśnieniach wewnątrz ogumienia, jednak dotyczyło to opon fabrycznie nowych. Z kolei w pracy [2, 16] skupiono się nad wpływem sztywności opon na drgania pojazdów – w efekcie na komfort użytkowników (również opony nowe). W pracy [12] przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu wkładki run-flat jedynie na sztywność promieniową opony, gdzie należałoby oczekiwać oceny również pod kątem sztywności bocznej. Wartość sztywności obwodowej była podstawowym parametrem, który w pracy [6] posłużył do sformułowania parametru współczynnika wzdłużnej sztywności poślizgowej.

Należy mieć na uwadze, iż producenci opon dysponują parametrami ogumienia, które mogą posłużyć do celów porównawczych, jednak nie dostarczają ich wraz z oponą. Jednym z ogólnodostępnych parametrów wchodzących w skład oznaczenia widniejącego na boku opony jest indeks nośności [10], wartości pozostałych parametrów dostępne są za dopłatą.

Z uwagi na powyższe, za celowe uznano wyznaczenie sztywności kierunkowych opon o różnej konstrukcji i przeznaczeniu, będących w różnym stadium zdolności eksploatacyjnej, w wyniku czego możliwym byłoby porównanie ich parametrów. Wyznaczone w ten sposób wartości charakterystyczne docelowo mogą posłużyć do modelowania ruchu pojazdu, szczególnie w symulacjach zderzeń, gdzie pojazdy uczestniczące nie zawsze są fabrycznie nowe.

Charakterystyki sztywności najczęściej wyznacza się w sposób statyczny mocując koło ogumione na stanowisku umożliwiającym przykładanie obciążenia i pomiar wywołanego nim ugięcia opony.

Ogólną sztywność opony pneumatycznej C [6] definiujemy jako:

$$C = \frac{\Delta x}{\Delta l} \left[\frac{N}{m} \right] \quad (1)$$

gdzie: Δx – przyrost wartości statycznej reakcji (promieniowej, wzdłużnej, bocznej, skrętnej), Δl – przyrost odkształcenia opony

W zależności od kierunku działania siły wyróżnia się:

- Sztywność promieniową – wyznaczana jako zależność ugięcia promieniowego opony, od siły pionowej. Od sztywności promieniowej w dużej mierze zależy wielkość obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego ale również komfort jazdy [12]. Z uwagi na to, że opona pneumatyczna posiada wielowarstwową budowę, podczas jej deformacji zachodzi zjawisko histerezy – powstawanie strat energii podczas dociążania i odciążania opony [3, 6, 8, 12].
- Sztywność obwodową – jest to zależność przemieszczenia wzdłużnego od siły wzdłużnej, przykładanej do osi koła. Działanie sił obwodowych (hamowanie, napędzanie) powoduje powstawanie obwodowych odkształceń powłoki opony. Sztywność obwodowa pozwala określać właściwości opony w kierunku wzdłużnym oraz sztywność poślizgową [6].

- Sztywność boczna – zależność przemieszczenia bocznego opony od siły bocznej, przykładanej do osi koła. Sztywność boczna jest szczególnie istotna przy tzw. zjawisku nadbiegania opony podczas znoszenia bocznego opony [11]. Nadbieganie ogumienia podczas zamiany warunków znoszenia bocznego koła jest skutkiem zmiany odkształcenia powłoki opony w kierunku poprzecznym [15], inaczej mówiąc, reakcja boczna powstająca w strefie styku bieżnika z podłożem jest przenoszona na obręcz koła za pomocą elementu sprężystego (opona). To dzięki sztywności bocznej można określić właściwości sprężyste opony w kierunku poprzecznym [11].
- Sztywność skrętna – to zależność otrzymanego kąta obrotu opony od momentu skręcającego. Parametr ten znacząco wpływa na kąt znoszenia bocznego ogumienia, co jest bardzo ważne w przypadku pojazdów sportowych [4, 14, 16].

Badania nad wpływem ciśnienia w ogumieniu na wielkość pola powierzchni styku bieżnika opony z nawierzchnią [13] prowadzono już w latach 80-tych. Dowiedziono, że zmiana ciśnienia wewnątrz opony ma istotny wpływ na zmianę rozkładu naprężeń na powierzchni jej styku z podłożem [1].

Przeprowadzone badania mają na celu ustalenie istnienia wpływu wielkości wejściowych (ciśnienie w oponie, obciążenie, co za tym idzie rozkład naprężeń) na wielkości wyjściowe (sztywność opony, wielkość pola powierzchni styku opony z podłożem) bez określania zależności funkcyjnej.





2. Charakterystyka obiektów badań

Zważając na różnorodność dostępnych opon samochodowych, przy wyborze grupy reprezentacyjnej opon kierowano się ogólnymi kryteriami, m.in. dostępność, popularność rozmiarowa, rodzaj bieżnika, zastosowanie.








Obiekty badań zostały podzielone na 3 grupy ze względu na ich zastosowanie, m.in.:

- grupa I (opony letnie),
- grupa II (opony błotnośniegowe M+S),
- grupa III (inne, w skład których wchodzi opona dojazdowa, terenowa oraz po regeneracji-nalewana).

Tab.2. Marki i modele opon wykorzystywanych w badaniach

Lp.	Marka i model	Rozmiar	Indeks nośności	Indeks prędkości	Rok produkcji	Budowa wewnętrzna opony		Zdjęcie
						Bok	Bieżnik	
GRUPA I								
1.	Uniroyal Rallye 680	175/65 R13	-	-	-	1 poliester	1 poliester 2 stal	
2.	Kormoran Impulser	155/70 R13	75	T	2000	1 poliester	1 poliester 2 stal	
3.	Dębica Passio	135/80 R12	68	T	2004	-	-	
4.	Dębica D-164	135/70 R13	68	T	1994	1 wiskoza	1 wiskoza 2 stal	

c.d. Tab.2. Marki i modele opon wykorzystywanych w badaniach

Lp.	Marka i model	Rozmiar	Indeks nośności	Indeks prędkości	Rok produkcji	Budowa wewnętrzna opony		Zdjęcie
						Bok	Bieżnik	
GRUPA II								
5.	Marshal Powergrip 749	175/70 R13	82	T	2002	1 poliester	1 poliester 2 steel	
6.	Pirelli Iceplus	155/65 R13	73	Q	2009	1 poliamid	1 poliamid 2 stal	
7.	Berlin-tyre	155/70 R13	-	-	1995	-	-	
8.	Pirelli P400 Aquamile	155/70 R13	75	T	2006	1 poliester	1 poliamid 2 stal 1 poliester	
GRUPA III								
9.	USSR MB – 167	5,90-13	-	-	-	-	-	
10.	Continental CST 14	105/70 R14	84	M	1991	-	1 wiskoza 2 stal	
11.	Stomil D-90	165 R13	-	-	-	-	-	

Ze względu na to, że opony wykorzystane w badaniach były oponami eksploatowanymi, pochodzącymi z demontażu, oraz dawno wyłączonymi z produkcji, uzyskanie niektórych danych nie było możliwe.

3. Metodyka badań

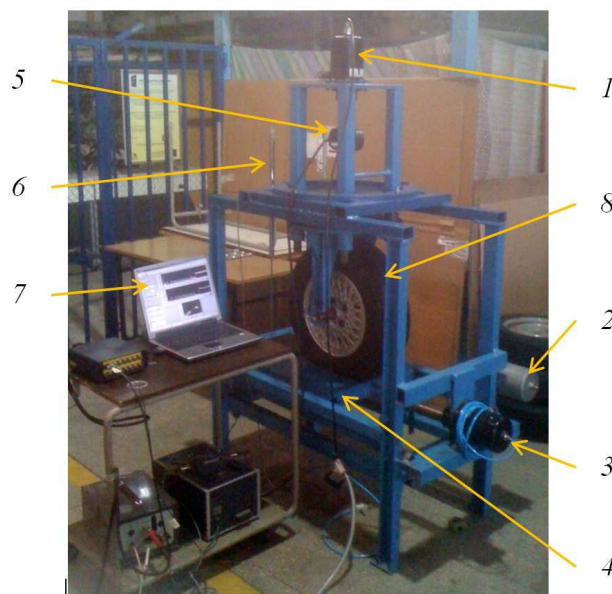
Badania składały się z trzech etapów:

- etap I – badania eksperymentalne (przy ciśnieniach w ogumieniu – 1,2 bar; 2,2 bar; 3,2 bar), rejestracja obciążenia i odkształcenia,
- etap II – identyfikacja sztywności opon pneumatycznych,
- etap III – wykonanie odcisków bieżnika opony.

Charakterystyki zostały wykonane na stanowisku do statycznych badań opon samochodowych znajdującym się w Laboratorium Pojazdów Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej (rys. 1).

4. Rejestracja pomiarów

Do odczytu parametrów (siła, odkształcenie) w trakcie badań wykorzystano: przetwornik siły Dir-1-WT1, przetwornik przemieszczeń CI100 i laptop z kartą NI DAQCard-6024E. Rejestracja przebiegów była realizowana oryginalnym programem stworzonym w środowisku LabView, gdzie widoczny był podgląd parametrów bieżących, jak też możliwy był zapis wyników do pliku tekstowego. Wykonano 10 powtórzeń każdego pomiaru.



Rys. 1 Stanowisko do wyznaczania sztywności opon samochodowych: 1 – siłownik pneumatyczny do realizacji obciążenia promieniowego, 2 – siłownik pneumatyczny do realizacji obciążenia skrętnego, 3 – siłownik pneumatyczny do realizacji obciążenia obwodowego i bocznego, 4 – płyta przesuwna, 5 – przetwornik siły Dir-1-WT1, 6 – przetwornik przemieszczeń C1100, 7 – laptop z kartą NI DAQCard-6024E, 8 – badana opona.

4.2. Obróbka wyników badań eksperymentalnych

W związku z tym, że urządzenia elektryczne (laptop, przetworniki, wzmacniacze) używane podczas badań były zasilane z sieci eklektycznej, oprócz wyników zarejestrowane zostały również zakłócenia (szumy i „piki”), ponieważ karta pomiarowa była bardzo czuła na minimalne zmiany napięcia. Zakłócenia te (pochodzące z sieci elektrycznej) były wynikiem m.in. innych prac wymagających włączania i wyłączania sprzętu elektrycznego w obrębie stanowiska. Częstotliwość zakłóceń wskazywała na 50 Hz, co wynika z częstotliwości napięcia zasilania, a amplituda nie przekraczała 5% badanego zakresu. Z kolei chwilowe rejestrowane piki nie przekraczały 20% badanego zakresu. Pomiarzy miały charakter statyczny, dlatego w rejestrowanym przedziale chwilowe piki stanowiły do 5% całości wyników. W celu usunięcia zakłóceń, zarejestrowane wyniki zostały poddane obróbce (filtrowaniu). Filtracja sygnału polega na wygaszaniu widma sygnału w zadanych przedziałach częstotliwości. Do usunięcia szumów z zarejestrowanych pomiarów użyto filtru dolnoprzepustowego Butterwortha [18].

4.3. Identyfikacja sztywności

Do identyfikacji sztywności wykorzystano regresję liniową, metodę najmniejszych kwadratów, procedury zapisano w kodzie środowiska MATLAB – SIMULINK, dodatek Guide. Minimalizację wskaźnika FPE_1 (2) przeprowadzono numerycznie bezgradientową metodą sympleksu Nelder – Meada [18], aż do osiągnięcia żądanej dokładności obliczeń, przyjętej na poziomie $1e^{-6}$ (rys. 2).

$$FPE_1 = \frac{m+l}{m(m+l)} \sum_{i=1}^m (F_d - F_m)^2 \quad (2)$$

gdzie: m – liczba, l – liczba, F_d - wartości doświadczalne siły, F_m - wartości modelowe siły

Wykorzystując zarejestrowane przebiegi zmian siły poszukiwano w kolejnych iteracjach przebiegu modelowego F_m .

W celu wyznaczenia błędu średniego został określony wskaźnik FPE_2 zdefiniowany następująco:

$$FPE_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (F_d - F_m) \quad (3)$$

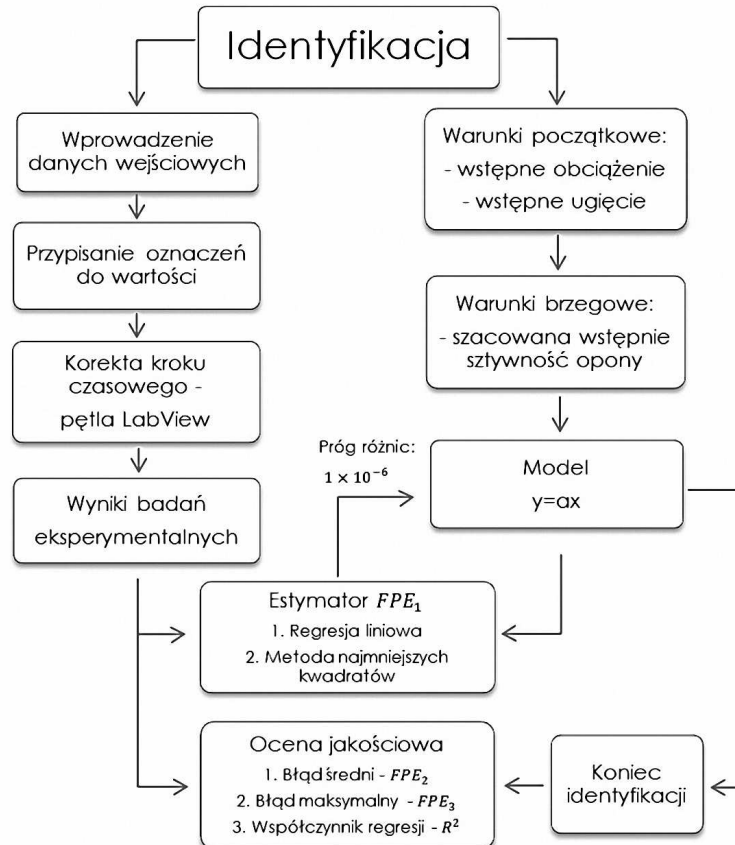
oraz wskaźnik FPE_3 będący maksymalną wartością błędu:

$$FPE_3 = \text{MIN}(F_d - F_m) \quad (4)$$

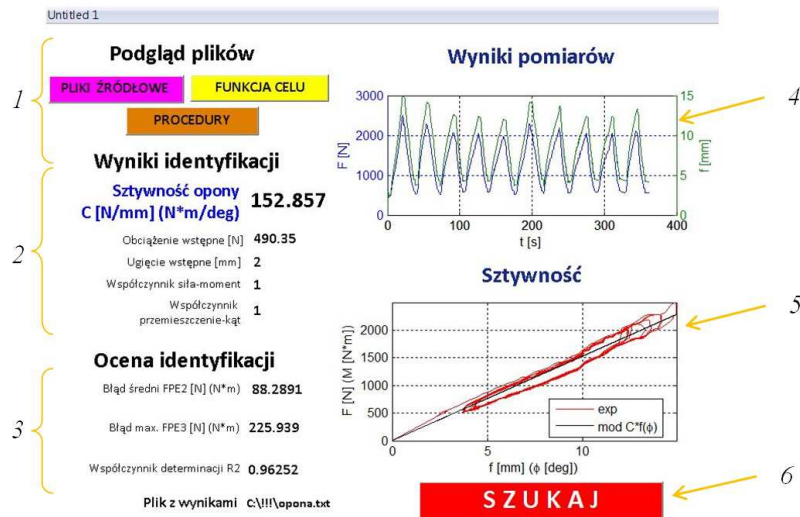
Oceny jakościowej dopasowania wartości siły doświadczalnej F_d i modelowej F_m dokonano na podstawie wartości współczynnika regresji liniowej skorygowanego na stopnie swobody:

$$R^2 = 1 - \frac{m-l}{m-1} \frac{\sum_{i=1}^m (F_d - F_m)^2}{\sum_{i=1}^m (F_d - \overline{F_m})^2} \quad (5)$$

Okno dialogowe programu do identyfikacji sztywności (rys. 3) zawiera: przyciski funkcyjne, za pomocą których określa się pliki źródłowe, funkcję celu oraz procedury (obciążenie wstępne, wgięcie wstępne) (1), obszar wskazujący wynik identyfikacji oraz założone ugięcie i obciążenie wstępne, współczynnik siła – moment i przemieszczenie – kąt (2), obszar przedstawiający FPE_1 , FPE_2 , FPE_3 oraz R^2 (3), okno przedstawiające przebieg siły i ugięcia w czasie (4), okno przedstawiające zależność siły od ugięcia (5) oraz przycisk rozpoczynający identyfikację (6). Schemat blokowy programu przedstawia rysunek 2.



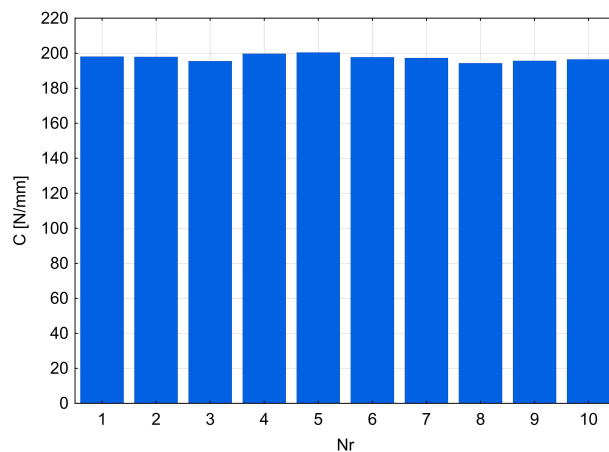
Rys. 2 Schemat blokowy programu do identyfikacji sztywności „Opona” w środowisku Matlab – Simulink dodatek Guide.



Rys. 3 Okno dialogowe programu do identyfikacji sztywności (Matlab - Simulink dodatek Guide)

4.4. Maksymalny błąd szacunku przy założonej liczbie powtórzeń

W celu wyznaczenia dokładności wyników badań (maksymalnego błędu szacunku) przy określonej minimalnej liczbie pomiarów, zostały przeprowadzone badania wstępne. Badanie polegało na obciążaniu pionowym opony umieszczonej na obręczy oraz rejestracji jej ugięcia w funkcji siły obciążającej, przy nominalnym ciśnieniu w ogumieniu równym 2,2 bar. Badania powtórzono 10 razy. Z przeprowadzonych pomiarów wyznaczono sztywność promieniową ogumienia, a wyniki przedstawiono za pomocą wykresu słupkowego (rys. 4). Wyznaczone wartości przyjęto do analizy statystycznej, oraz w celu wyznaczenia maksymalnego błędu szacunku w badaniach właściwych.



Rys. 4 Wykres słupkowy przedstawiający wyznaczone wartości sztywności promieniowej opony przy 10 powtórzeniach

Ważnym parametrem, który należało określić w celu obliczenia maksymalnego błędu szacunku to liczba stopni swobody, zawierająca się jako liczba niezależnych wyników obserwacji pomniejszona o liczbę związków, które łączą te wyniki ze sobą. Zakładając liczbę powtórzeń pomiarów $n = 10$, oraz wariancję określono maksymalny błąd szacunku.

$$D = \sqrt{\frac{S^2 \cdot t_\alpha}{n}} = 0,95 \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (6)$$

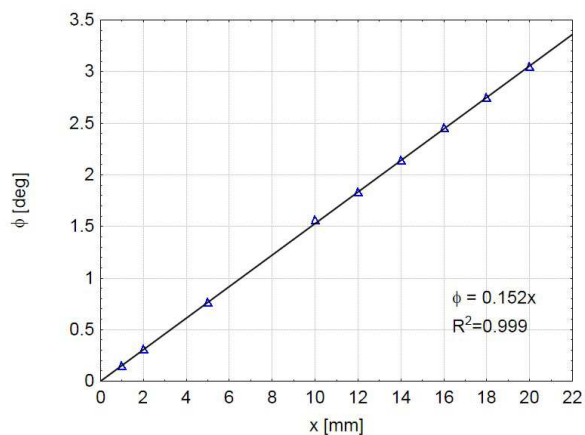
gdzie: S – odchylenie standardowe z próby, n – liczba powtórzeń, t_α - statystyka.

5. Wyznaczanie sztywności skrętnej

Wyznaczanie sztywności skrętnej polegało na wykorzystaniu zespołu umożliwiającego „skręcanie” opony. Realizowano to poprzez użycie płyty skrętnej (rys. 5) zamontowanej ruchliwie na łożyskach oporowych do stołu. Zależność kąta skręcenia ϕ od przesunięcia x przedstawia rys. 6.



Rys. 5 Zespół do badania sztywności skrętnej:
1 – silownik, 2 - przetwornik przemieszczeń CI100,3 – przetwornik siły Dir-1-WT1,
4 – popychacz, 5 – opona, 6 – płyta skrętna,
7 – sworzень.



Rys. 6 Zależność kąta skręcenia ϕ [deg] od przesunięcia x [mm]

Znając ramię r na jakim działa siła F , określono moment skręcający z zależności:

$$M_s = F \cdot r \quad [N \cdot m] \quad (7)$$

gdzie: M_s – moment skręcający [Nm], F – siła [N], r – promień [m].

Otrzymane równanie wykorzystano w programie do identyfikacji sztywności.

Tab. 3 Kodowanie badanych opon

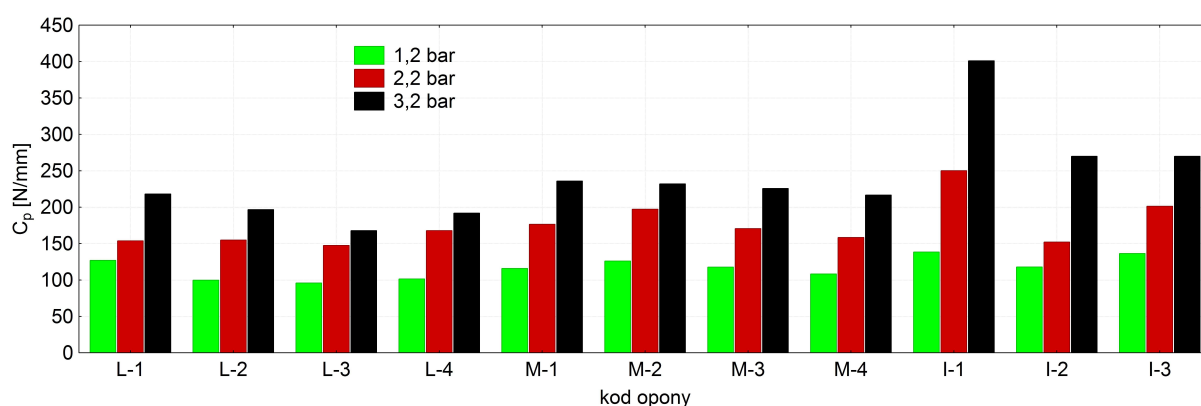
Kod	Marka	Model
Opony z grupy I		
L-1	Uniroyal	Ralle 680
L-2	Kormoran	Impulser
L-3	Dębica	Passio
L-4	Dębica	D-164
Opony z grupy II		
M-1	Marshal	Powergrip 749
M-2	Pirelli	Iceplus
M-3	Berlin-Tyre	-
M-4	Pirelli	P400 Aquamile
Opony z grupy III		
I-1	USSR	ИВ – 167
I-2	Continental	CST14
I-3	Stomil	D-90 Nalewana

6. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów słupkowych, które w sposób przejrzysty prezentują różnicę sztywności badanych opon, w zależności od ciśnienia w oponie. W celu polepszenia czytelności wykresów zastosowano kodowanie nazw opon samochodowych. Pełne zestawienie wyników przedstawiono w [10].

6.1. Sztywność promieniowa

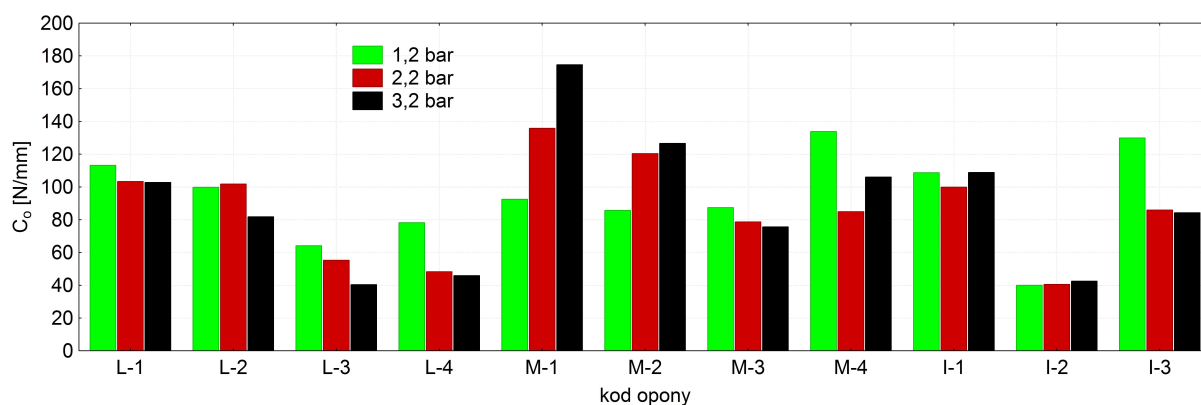
Rozpatrując wyznaczone sztywności promieniowe badanych opon (rys. 7) można w każdym przypadku zauważyć, że wraz ze wzrostem ciśnienia w oponach wzrasta ich sztywność. Największy skok sztywności promieniowej zanotowano w przypadku opony I-1, między ciśnieniami w oponie 2,2 bar - 3,2 bar (60,3%). Najmniejszą różnicę w sztywności odnotowano w przypadku opony L-3 między ciśnieniami w oponie 2,2 bar - 3,2 bar równą 13,7%.



Rys. 7 Zmiany sztywności promieniowej opon w zależności od ciśnienia w oponie

6.2. Sztywności obwodowa

Odnosząc się do sztywności obwodowej wybranych opon z każdej z grup (rys. 8), zauważono, że wartość sztywności obwodowej wraz ze wzrostem ciśnienia w oponie maleje.



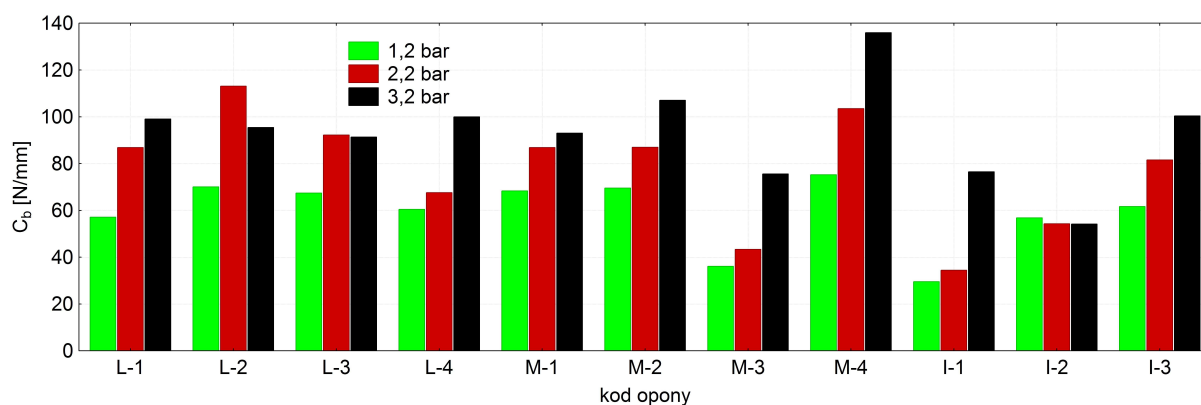
Rys. 8 Zmiany sztywności obwodowej opon w zależności od ciśnienia w oponie

W oponie L-4 przy najmniejszym ciśnieniu (1,2 bar) sztywność obwodowa wyniosła 78,2 N/mm, natomiast przy ciśnieniu maksymalnym, równym 3,2 bar tylko 45,9 N/mm (różnica 70%). W przypadku opony M-4, przy najmniejszym ciśnieniu (1,2 bar) sztywność obwodowa wyniosła aż 133,88 N/mm, przy ciśnieniu nominalnym równym 2,2 bar tylko

84,96 N/mm (różnica 57,5%). Przy dalszym wzroście ciśnienia odnotowano wzrost sztywności obwodowej o 24,7%. Odnosząc się do sztywności obwodowej opon z grupy III zauważono spadek wartości sztywności obwodowej wraz ze wzrostem ciśnienia w oponie I-3. Przy najmniejszym ciśnieniu (1,2 bar) sztywność obwodowa wyniosła 129,95 N/mm , przy ciśnieniu nominalnym równym 2,2 bar - 85,95 N/mm (różnica 51,2%). Przy dalszym wzroście ciśnienia odnotowano nieznaczny spadek sztywności do wartości 84,25 N/mm . Zmiana sztywności opony w funkcji ciśnienia w oponie I-2 jest niewielka (ok. 5%).

6.3. Sztywność boczna

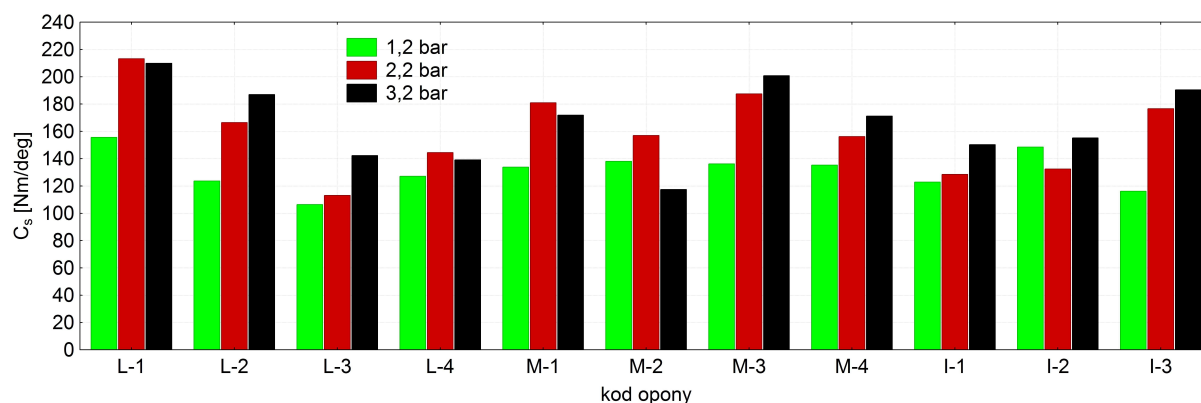
W przypadku kolejnego wyznaczanego parametru, którym jest sztywność boczna (rys. 9), podobnie jak przy sztywności promieniowej, wykres słupkowy przedstawia tendencję rosnącą sztywności wraz ze wzrostem ciśnienia w oponie w każdej grupie opon oprócz opony I-2, w której odnotowano spadek sztywności przy wzroście ciśnienia. Również w oponie L-2 zauważono spadek sztywności przy wzroście ciśnienia w oponie z 2,2 bar na 3,2 bar o 18,5%. Stosunkowo duży skok sztywności (54,9%) widoczny jest przy zmianie ciśnienia z 1,2 bar na 1,2 bar w oponie L-2 (61,5%) oraz z ciśnienia 2,2 bar na 3,2 bar w oponie L-4 (48%).



Rys. 9 Zmiany sztywności bocznej opon w zależności od ciśnienia w oponie

6.4. Sztywność skrętna

W przypadku ostatniego wyznaczonego parametru, którym jest sztywność skrętna (rys. 10), podobnie jak przy sztywności obwodowej, w oponie L-1 zauważalny jest spadek sztywności przy wzroście ciśnienia w oponie z 2,2 bar na 3,2 bar o 1,6%.

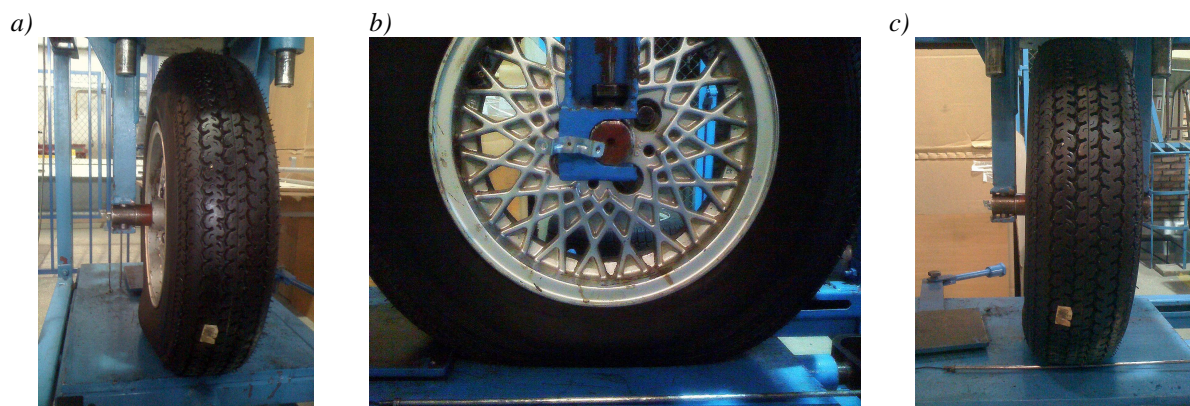


Rys. 10 Zmiany sztywności skrętnej opon w zależności od ciśnienia w oponie

Stosunkowo duży skok sztywności (37%) widoczny jest przy zmianie ciśnienia z 1,2 bar na 2,2 bar w tej samej oponie (L-1). Zmiana ciśnienia z 2,2 bar na 3,2 bar spowodowała spadek sztywności skrętnej opony L-4 o 3,8%. Kolejny zauważalny spadek sztywności przy wzroście ciśnienia występuje w oponie w oponie M-1 (z 2,2 bar na 3,2 bar o 5,2%). W oponie I-2 przy zmianie ciśnienia z 1,2 bar na 2,2 bar sztywność skrętna maleje o 12%. Przy dalszym wzroście ciśnienia do 3,2 bar odnotowano wzrost sztywności o 17% w stosunku do sztywności przy ciśnieniu 2,2 bar.

7. Odształcenia opon

Obciążenie pionowe, które zadawano oponie w celu wyznaczenia jej sztywności promieniowej, powoduje odkształcenie opony w sposób widoczny na rys. 11. Obciążenie opony siłą ciężkości pojazdu powoduje powstanie siły wzdłużnej w obszarze styku koła z podłożem i skutkuje odkształceniem widocznym na rys. 11a. Obciążenie opony momentem hamowania lub momentem napędowym powoduje powstanie siły wzdłużnej w obszarze styku koła z podłożem i skutkuje odkształceniem widocznym na rysunku 11b. Natomiast w przypadku wyznaczania sztywności bocznej, czyli przykładaniu siły w kierunku poprzecznym do osi wzdłużnej opony i rejestrowaniu przemieszczenia stołu można było zauważyć odkształcenie opony jak na zdjęciu (rys. 11c).

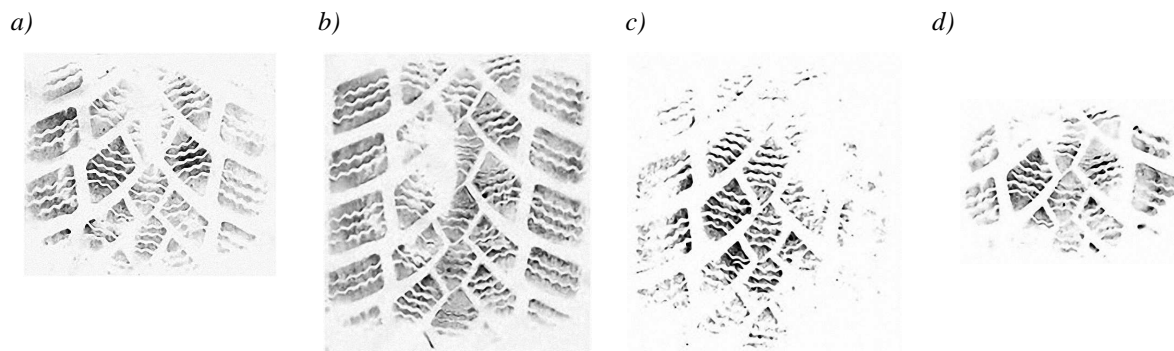


Rys. 11 Odształcenie opony podczas wyznaczania sztywności: a) promieniowej, b) obwodowej, c) bocznej.

8. Odciski bieżnika

Podczas toczenia się koła po twardej nawierzchni opona ulega deformacji co skutkuje powstawaniem kontaktu powierzchniowego z jezdnią. Wszystkie siły potrzebne do przyśpieszania, hamowania i realizacji skrętu są przenoszone poprzez powierzchnię kontaktu opony z nawierzchnią drogi. Zmiana ciśnienia w ogumieniu wpływa bezpośrednio na wielkość pola powierzchni styku opony z drogą. Jak wiadomo, im jest większe pole powierzchni styku opony z nawierzchnią, tym mniejsze jest zagłębianie się opony w miękkie podłoże (fakt wykorzystywany w samochodach terenowych - obniżanie ciśnienia podczas przepraw w trudnym terenie). Skutkuje to większymi oporami toczenia, co za tym idzie, większym spalaniem oraz hałasem emitowanym przez bieżnik opon.

W celu sprawdzenia, jak bardzo zmienia się pole powierzchni styku opony z nawierzchnią pod wpływem różnych ciśnień w ogumieniu oraz różnych obciążeń, wykonano odciski bieżnika jednej z opon (rys. 12).

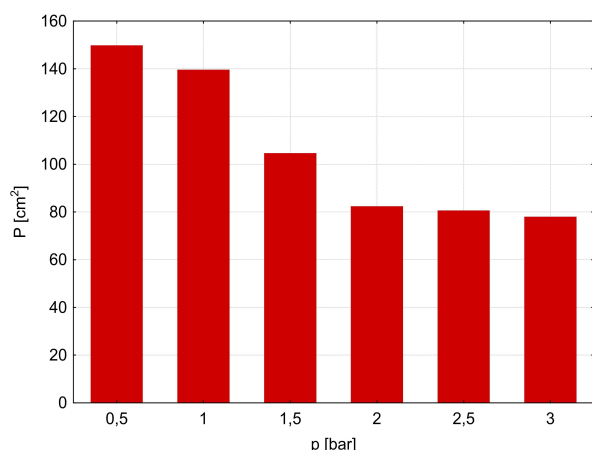


Rys. 12 Odciski opony Uniroyal Rallye 680:

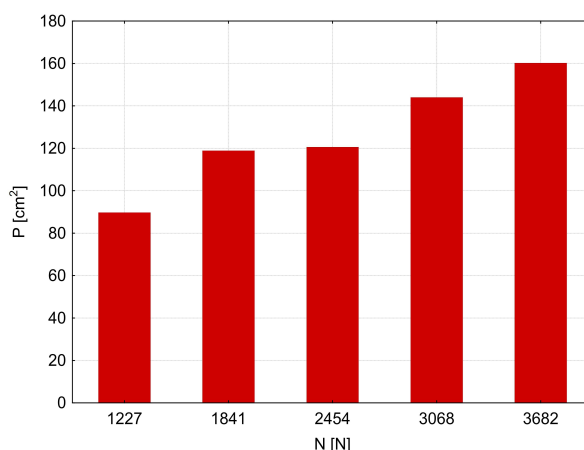
- ciśnienie w oponie 2,2 bar - obciążenie: a - 1841 N, b - 3682 N;
 - obciążenie 614 N - ciśnienie w oponie : c - 1,5 bar, d - 3 bar.

Na podstawie otrzymanych wyników stworzono wykresy słupkowe przedstawiające zależność zmiany pola powierzchni styku w funkcji ciśnienia w oponie (rys. 13) oraz zależność zmiany pola powierzchni styku w funkcji nacisku (rys. 14).

Wraz ze wzrostem ciśnienia w oponie pole powierzchni styku bieżnika z nawierzchnią się zmniejsza. Największą zmianę pola powierzchni (ok. 70%) zauważono w zakresie zmiany ciśnienia od 1 bar do ok. 2 bar (rys. 13). W przypadku zwiększania obciążenia opony, przy stałej wartości ciśnienia nominalnego 2,2 bar w oponie (rys. 14), pole powierzchni styku bieżnika z nawierzchnią wzrasta. Jest to najbardziej zauważalne w zakresach zmiany obciążenia od 1227 N do 1841 N (ok. 66%) oraz od 2454 N do 3068 N (ok. 80%).



Rys. 13 Zmiana pola powierzchni styku w funkcji ciśnienia w oponie przy stałym obciążeniu



Rys. 14 Zmiana pola powierzchni styku w funkcji nacisku, przy stałym ciśnieniu w oponie

9. Podsumowanie

Przedstawione wyniki dotyczące sztywności opon samochodowych odnoszą się do opon eksploatowanych, będących w różnym stadium zdatności. Badania miały charakter porównawczy, gdzie starano się stwierdzić pewne korelacje w warunkach statycznych. W wyniku przeprowadzonych badań na 11 egzemplarzach różnego rodzaju opon, ustalono że średnio opona charakteryzuje się sztywnością promieniową ok. 180 [N/mm], obwodową 80 [N/mm], boczną 65 [N/mm] oraz skrętną 150 [(N·m)/deg]. W przypadku sztywności promieniowych, wraz ze wzrostem ciśnienia w oponach rosły ich wartość, podobnie, jak przy sztywności bocznych. W niektórych przypadkach stwierdzono spadki sztywności obwodowej i skrętnej w miarę zwiększania ciśnienia w oponie.

Wraz ze wzrostem ciśnienia w oponie pole powierzchni styku z nawierzchnią zmniejsza się. Największą zmianę pola powierzchni (ok. 70%) zauważono w zakresie zmiany ciśnienia od 1 *bar* do ok. 2 *bar*. W przypadku zwiększania obciążenia opony, przy stałej wartości ciśnienia nominalnego 2,2 *bar* w oponie, pole powierzchni styku z nawierzchnią wzrasta do 35%.

Przedstawione parametry mają zastosowanie w przypadku modelowania ruchu pojazdu, gdzie operuje się głównie kątem znoszenia bocznego ogumienia, który ma wpływ na sterowność pojazdu, szczególnie sportowego [14]. W dalszym etapie planuje się budowę stanowisk do badań dynamicznych opon, szczególnie do wyznaczania znoszenia bocznego ogumienia, czy tłumienia, gdzie przewidziano oprócz modele identyfikujące o wyniki dotychczasowych prac.

Literatura

1. Bris S. S, Ungureanu N, Maican E, Murad E, Vladut V. FEM model to study the influence of tire pressure on agricultural tractor wheel deformations. International Scientific Conference: Engineering for Rural Development 2011; 10: 223-228.
2. Dworecki Z, Fiszer A, Łoboda M, Przybył J. Równania opisujące wpływ sztywności opon na drgania ciągnika rolniczego. Inżynieria Rolnicza 2007; 2(90): 43-48.
3. Fielding-Russell G. S, Pillai P.S. Tire rolling resistance from whole-tire hysteresis ratio. Rubber Chemistry and Technology 1992; 65(2): 444-452.
4. Genta G, Morello L. The Automotive Chassis. Volume 1: Components Design. Torino: Springer, 2009.
5. Gruber P, Sharp R. S, Crocombe A. D. Friction and camber influences on the static stiffness properties of a racing tyre. Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, 2008.
6. Jackowski J, Luty W, Wieczorek M. Analiza możliwości oszacowania wzdłużnej sztywności poślizgowej opon na podstawie statycznych badań laboratoryjnych. Journal of KONES Powertrain and Transport 2006, 13(1): 94-101.
7. Jackowski J, Prochowski L. Analiza wpływu konstrukcji ogumienia na obciążenia dynamiczne pojazdu i nawierzchni drogi. Biuletyn WAT 10/89.
8. Kasprzyk T, Prochowski L, Szurkowski Z. Optymalizacja własności sprężystych i dobór konstrukcji ogumienia samochodu osobowego dla różnych warunków eksploatacji. Auto-Technika Motoryzacyjna 10/74 i 11/74.
9. Krmela J, Beneš L, Krmelová V. Statical experiments of tire as complex long-fibre composite for obtaining material parameters and deformation characteristics. Materials Engineering - Materiálové inžinierstvo 2012; 19: 124-135.

10. Kulikowski K. Badania statyczne opon samochodowych. Praca dyplomowa magisterska, pod kierunkiem D. Szpicy, Politechnika Białostocka, Białystok, 2012.
11. Luty W. Wyznaczanie parametrów modelu nadbiegania ogumienia na podstawie wyników badań eksperymentalnych. *Postępy Nauki i Techniki* 2012; 14: 135-147.
12. Luty W, Simiński P. Analiza sprężystości promieniowej ogumienia 14.00R20 z wkładką typu RUN-FLAT. *Czasopismo Techniczne M* 2008; 132-138.
13. Marshek K. M, Saraf C. L, Chen H. H, Connell R. B., Hudson W. R. Experimental Investigation of Truck Tire Inflation Pressure on Pavement-tire Contact Area and Pressure Distribution. n. Report No. 386-1. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Austin, 1985.
14. Milliken W.F, Milliken D.L. Race car vehicle dynamics. Warrendale: SAE International, 1995.
15. Mitschke M. Dynamika samochodu, Drgania. tom 2. Warszawa: WKiŁ, 1987.
16. Pacejka Hans B. Tyre and vehicle dynamics. 2nd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
17. Taylor R. K, Bashford L. L, Schrock M. D. Methods for measuring vertical tire stiffness. *Transactions of the ASAE* 2000; 43(6): 1415-1419.
18. Yang W. Y, Cao W, Chung T. S, and Morris J. Applied numerical methods using MATLAB. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.