

mgr inż. Przemysław Dąbek
dr hab. inż. Andrzej Szosland, prof. PŁ
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW SKRĘTNYCH OPONY NIEPNEUMATYCZNEJ ROBOTA MOBILNEGO

W artykule przedstawiono wyniki identyfikacji parametrów skrętnych ogumienia stosowanego w lekkich robotach kołowych: sztywności skrętnej oraz tłumienia skrętnego, gdy skręcanie zachodzi względem osi obrotu koła. Badaniu poddano dwa rodzaje małych opon niepneumatycznych. Otrzymane wartości parametrów porównano z poddanymi skalowaniu wartościami dla typowej opony samochodowej i wyciągnięto wnioski, że proste skalowanie nie będzie dawało zadowalających rezultatów. Praca jest kolejnym krokiem na drodze do opracowania modelu ogumienia robota mobilnego.

IDENTIFICATION OF ROTATIONAL PROPERTIES OF A NON-PNEUMATIC TYRE OF A MOBILE ROBOT

The paper presents results of identification of rotational stiffness and damping of small-size tyres of a wheeled mobile robot. The investigation was conducted for two types of non-pneumatic tyres. The values of parameters obtained for the robot tyres were compared to the scaled values for a typical passenger car tyre, which led to the conclusion that simple scaling does not yield accurate results in this case. The work is a step forward on the way to devise the tyre model tailored for the needs of a wheeled mobile robot.

1. WPROWADZENIE

Szeroki zakres zastosowań robotów mobilnych sprawia, że posiadają one duży potencjał rozwojowy [1]. Coraz wyższe wymagania stawiane robotom mobilnym powodują, że w pracach rozwojowych nad tymi urządzeniami coraz szerzej wykorzystywane są technologie prototypowania wirtualnego w tym symulacji komputerowej. Modele matematyczne urządzeń czy pojazdów będących przedmiotem takich symulacji w wymagają wyznaczenia wartości parametrów, których liczba może zmieniać się (często wzrastać) wraz z udoskonalaniem modeli.

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki identyfikacji parametrów ogumienia robota mobilnego Scout (PIAP): sztywności skrętnej K i współczynnika tłumienia skrętnego C , związanych z obrotem względem stopki i bieżnika opony. Wielkościami te, poza innymi zastosowaniami, są parametrami modelu umożliwiającego wyznaczenie sił działających na oponę ze strony podłoża w fazie ruszania pojazdu.

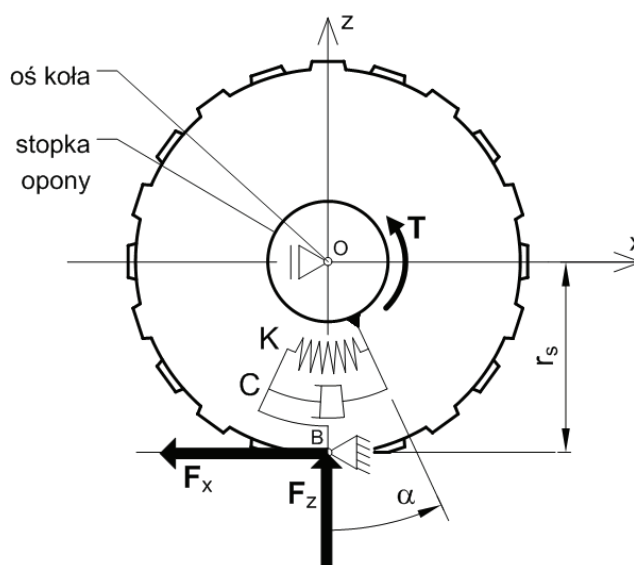
Modele ogumienia opisujące zjawiska dynamiczne w oponie przedstawiono w [2] oraz [3] (tzw. model sztywnego pierścienia – ang. „rigid ring”). Prace te koncentrują się na wpływie drgań ogumienia w płaszczyźnie koła na siły generowane między oponą a podłożem. Z kolei praca [4] dotyczy roli sztywności i tłumienia skrętnego ogumienia w badaniach drgań układu przeniesienia napędu w pojazdach samochodowych. Przedstawiono w niej dość obszerny przegląd literatury związanej z wielkościami będącymi w centrum zainteresowania niniejszej pracy. Wskazano również na możliwość i potrzebę prowadzenia badań sztywności i tłumienia skrętnego ogumienia. Z punktu widzenia niniejszej pracy najważniejsze jest jednak modelowanie sił w kontakcie opona-podłoże w fazie ruszania. Stosowany model ogumienia przedstawiono w pracy [5].

Należy podkreślić, że przedstawione wyżej prace dotyczą ogumienia pneumatycznego stosowanego w samochodach osobowych. Niniejsza praca jest kolejnym krokiem w kierunku opracowania modelu niepełnego atycznego ogumienia robota kołowego uwzględniającego specyfikę jego eksploatacji [6].

2. METODA BADAWCZA

Wyznaczenie własności skrętnych ogumienia lekkiego robota zostało przeprowadzone na podstawie danych doświadczalnych uzyskanych na stanowisku do badań ogumienia Katedry Pojazdów Politechniki Łódzkiej [6].

Badanie polegało na wyznaczeniu charakterystyki $T(\alpha)$, tj. zależności momentu skręcającego działającego na stopkę opony T od kąta wychylenia osi koła α . Metoda pomiaru została pokazana na rys. 1. Zakłada ona brak przemieszczenia osi koła w kierunku x ($x_o = const$), unieruchomienie bieżnika w miejscu styku z podłożem ($x_B, z_B = const$) oraz wymuszenie kinematyczne kątem α o przebiegu harmonicznym.



Rys. 1. Metoda badawcza i przyjęty model własności skrętnych ogumienia

Zgodnie z modelem pokazanym na rys. 1 równanie zależności $T(\alpha)$ ma postać:

$$T = K\alpha + C\dot{\alpha}, \quad (1)$$

gdzie: T – moment skręcający działający na stopkę opony, α – kąt wychylenia obręczy koła, K – sztywność skrętna, C – współczynnik tłumienia skrętnego.

Ponieważ badanie przeprowadzono przy wymuszeniu kinematycznym harmonicznym kątem α możemy założyć, że wymuszenie $\alpha(t)$ i odpowiedź $T(t)$ mają postać:

$$\alpha(t) = \hat{\alpha} \cos(\omega_w t) \quad (2)$$

$$T(t) = \hat{T} \cos(\omega_w t + \delta) \quad (3)$$

przy czym zgodnie z rys. 1:

$$T = F_x \cdot r_s, \quad (4)$$

gdzie: ω_w – częstość kołowa wymuszenia równa $\omega_w = 2\pi f$ gdzie f – częstość wymuszenia, δ – kąt przesunięcia fazowego między wymuszeniem a odpowiedzią, F_x – siła wzdłużna w miejscu styku opony z podłożem, r_s – promień statyczny opony.

Można wówczas pokazać, że szukane współczynniki sztywności K i tłumienia skrętnego C wyrażają się następującymi wzorami:

$$K = \frac{\hat{T}}{\hat{\alpha}} \cos(\delta) \quad (5)$$

$$C = \frac{\hat{T}}{\hat{\alpha} \cdot \omega_w} \sin(\delta). \quad (6)$$

Wynikiem pomiaru są przebiegi czasowe $\alpha(t)$, $F_x(t)$, $r_s(t)$ oraz $F_z(t)$, gdzie F_z to siła obciążenia pionowego osi koła.

3. PRZEDMIOT I PROGRAM BADAŃ

Szczegółowy program badania ogumienia przedstawiono w tab. 1. W właściwe badanie zostało poprzedzone badaniem pomocniczym polegającym na wyznaczeniu maksymalnej siły tarcia statycznego dostępnej między oponą a bieżnią.

Tab. 1. Szczegółowy program badań

program badania właściwego	
opona	2 egz. opony typu Scout, 1 egz. opony typu XTM Racing Meats
ślady kontaktu	2 ślady, zgodnie z rys. 2
obciążenie pionowe osi koła (N)	60, 80, 100
częstotliwość wymuszenia (Hz)	3 – 10, co 1
ilość powtórzeń 3	
program badania pomocniczego	
opona	1 egz. opony typu Scout, 1 egz. opony typu XTM Racing Meats
ślady kontaktu	2 ślady, zgodnie z rys. 2
obciążenie pionowe osi koła (N)	60
wymuszenie	statyczne
ilość powtórzeń 3	

Jak pokazuje tab. 1 badanie przeprowadzono dla trzech opon, każdą z nich zbadało się przy dwóch różnych śladach kontaktu z bieżnią, dla trzech obciążeń pionowych osi koła i ośmiu częstotliwości wymuszenia. Każde badanie zostało trzykrotnie powtórzone.

Ślad kontaktu opony z podłożem zdefiniujemy jako odcisk pozostawiany na podłożu przez bieżnię opony obciążonej. Typy opon oraz wzory śladów kontaktu, dla których wykonano badanie przedstawia rys. 2. Ślady kontaktu dobrano w taki sposób, aby w założeniu uzyskać jak największą różnicę w sztywności. W przypadku opony typu Scout wybrano wzory z klockiem bieżnika usytuowanym w centrum śladu oraz z klockami na peryferiach śladu. W przypadku opony typu XTM wybrane zostały wzory zawierające dwa lub jeden rodzaj klocków bieżnika.



Rys. 2. Badane obiekty i wzory śladów kontaktu opon z podłożem

Przebadano dwa typy opon: Scout stosowaną w robocie rozpoznawczym Scout produkcji PIAP oraz XTM Racing Meats o takiej samej średnicy osadzenia i zbliżonym promieniu swobodnym. Charakterystyka badanych obiektów jest przedstawiona w tab. 2.

Tab. 2. Cechy badanych obiektów w porównaniu z cechami typowej opony samochodowej

	opona 145/70 R13 (A)	opona Scout (B)	opona XTM	A/B
wymiary ogólne				
szerokość (mm)	145	105	115	1
promień swobodny (mm)	267	95	118	3
średnica osadzenia (mm)	330	110	110	3
wysokość ścianki (mm)	102	40	63	3
grubość ścianki w 1/2 profilu (mm)	8	3	3	3
konstrukcja				
wypełnienie	sprężony gaz	pianka poliuretanowa	pianka poliuretanowa	-
struktura	kompozyt (guma + kord stalowy)	materiał homogeniczny (guma)	materiał homogeniczny (guma)	-

Tab. 2 zawiera również dane porównawcze dla typowej opony samochodowej R13. Najważniejsze różnice między nietypową oponą robota, a typową oponą samochodową są następujące: ok. 3-krotnie mniejsza średnica zewnętrzna, wypełnienie wkładkami z pianki, jednorodny materiał konstrukcyjny – guma.

4. WYNIKI BADAŃ

Siły między oponą a bieżnią otrzymane w wyniku badania zostały porównane z określonymi wcześniej maksymalnymi siłami tarcia statycznego dostępnymi dla danej pary materiałów i danej siły nacisku (tab. 3).

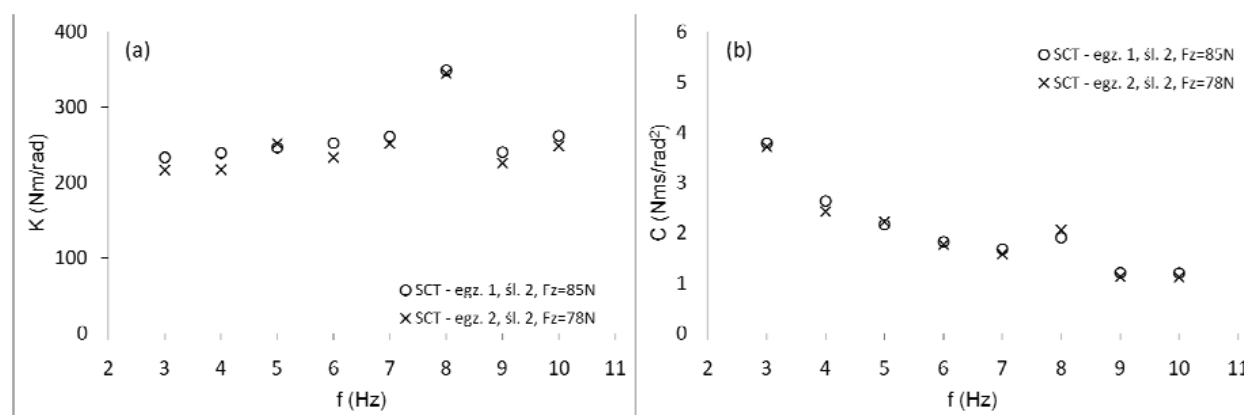
Tab. 3. Maksymalna siła tarcia statycznego dla pary ciernej opona-bieżnia przy nacisku nominalnym 60 N

$F_{t,max}$ (N)		
	Scout-bieżnia	XTM-bieżnia
ślad 1	151 121	
ślad 2	128 114	

Wspomniane porównanie wykazało, że na ogół zmierzone siły nie przekraczają dostępnej siły tarcia statycznego. Wyjątkami są: w prawie każdym badaniu znaczne przekroczenie dla częstotliwości wymuszenia 8 Hz oraz dodatkowo przekroczenia rzędu kilku N dla częstotliwości wymuszenia 5, 7, 9 i 10 Hz w przypadku badania opony typu Scout (egz. 1, ślad kontaktu 2).

Uzyskane wartości sztywności i tłumienia skrętnego przeanalizowano w następujących aspektach: (1) wpływ częstotliwości wymuszenia, (2) wpływ egzemplarza opony, (3) wpływ śladu kontaktu, (4) wpływ rodzaju opony, (5) wpływ obciążenia pionowego osi, (6) porównanie z wartościami dla ogumienia samochodowego.

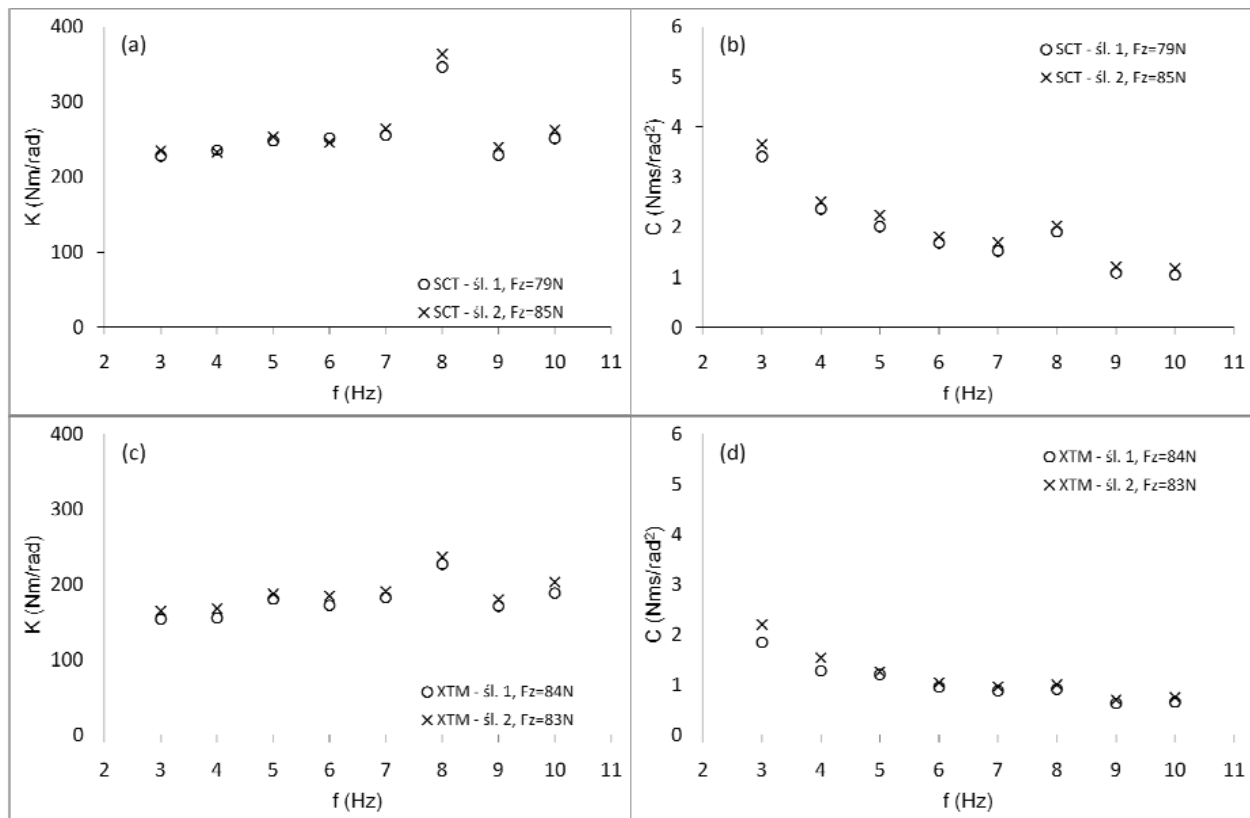
Na rys. 3 pokazano wartości sztywności skrętnego (a) i współczynnika tłumienia skrętnego (b) w funkcji częstotliwości wymuszenia f . Wykresy przedstawiają typowy rozkład tych wartości występujący w każdym badaniu. W przypadku sztywności wartości oscylują względem pewnego stałego poziomu. W przypadku współczynnika tłumienia uwidacznia się wyraźny spadek wartości z częstotliwością wymuszenia. Jest to zgodne z oczekiwaniami, ponieważ współczynnik tłumienia jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości wymuszenia (zob. równanie (6)). W przypadku obydwu wielkości dla częstotliwości 8 Hz widać wyraźny wzrost wartości, co jest najprawdopodobniej związane z charakterystyką częstotliwościową układu stanowisko-opona (rezonans dla częstotliwości bliskiej 8 Hz).



Rys. 3. Wartości sztywności skrętnego K (a) i tłumienia skrętnego C (b) dla dwóch różnych egzemplarzy opony Scout i nominalnego obciążenia osi $F_z = 80$ N

Ponadto, rys. 3 pokazuje porównanie wartości dla dwóch egzemplarzy opony typu Scout. Zgodna z oczekiwaniami i zbliżona wartość wyników pozwala na stwierdzenie wiarygodności uzyskanych wyników dla opony typu Scout.

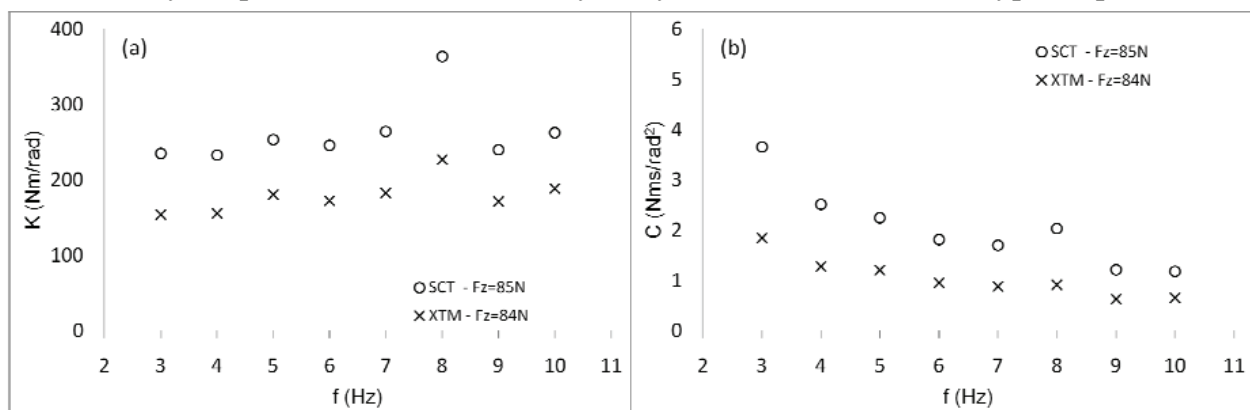
Na rys. 4 przedstawiono zestawienie wyników dla różnych śladów kontaktu między oponą a podłożem.



Rys. 4. Wartości sztywności skrętniej K (a), (c) i tłumienia skrętnego C (b), (d) dla dwóch różnych śladów kontaktu opony z podłożem dla opony Scout (wykresy górne) i opony XTM (wykresy dolne) i obciążenia nominalnego osi $F_z=80\text{ N}$

Na wykresach z rys. 4 można zaobserwować pewne niewielkie różnice wartości dla różnych śladów podparcia, jednak na podstawie bieżących badań trudno jednoznacznie stwierdzić, czy są one spowodowane cechami i ogumieniem, czy bieżniami systematycznymi (np. fluktuacjami wartości siły pionowej F_z). W tym momencie wpływ śladu kontaktu powinien w sposób jednoznaczny uwidocznić się w wartościach sztywności i współczynnika tłumienia skrętnego. Brak jednoznacznej zależności w przypadku prezentowanych badań może być spowodowany brakiem rozgraniczenia cech bieżni i ścian bocznej. Jeśli przyjąć, że ściana boczna posiada kilkukrotnie większą sztywność skrętną niż bieżnia, co zachodzi dla opony samochodowej, to jest możliwe, że efekty związane z bieżnią są zbyt małe, aby uwidocznić się w bieżącym badaniu.

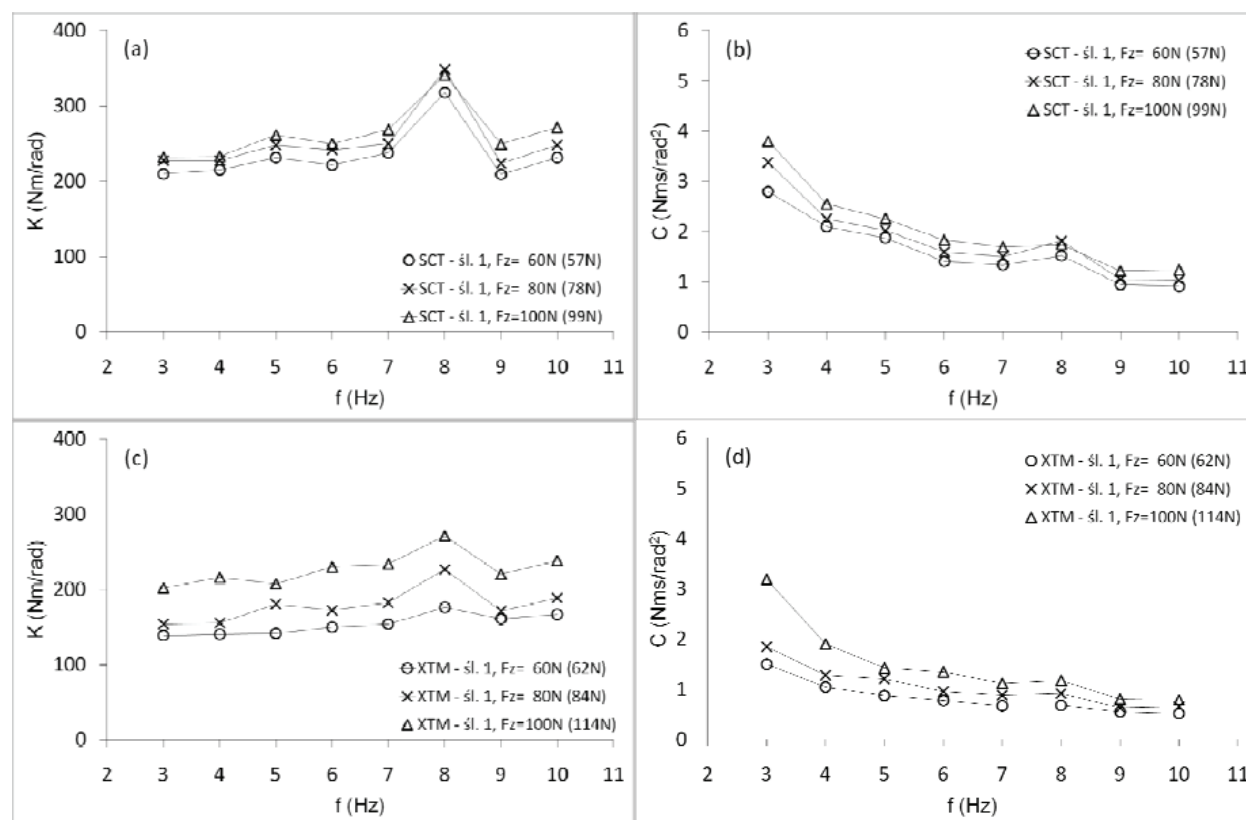
Na rys. 5 pokazano zestawienie uzyskanych wartości dla dwóch typów opon.



Rys. 5. Wartości sztywności skrętniej K (a) i tłumienia skrętnego C (b) dla dwóch typów opon Scout i XTM przy obciążeniu nominalnym osi $F_z=80\text{ N}$

Zaobserwowano, że sztywność skrętna K opony Scout jest średnio 1,5-krotnie większa niż opony XTM (iloraz sztywności waha się w granicach od 1,4 do 1,6 w zależności od częstotliwości). Podobnie współczynnik tłumienia skrętnego C opony Scout jest średnio 2-krotnie większy niż opony XTM (wahania ilorazu w granicach od 1,8 do 2,2).

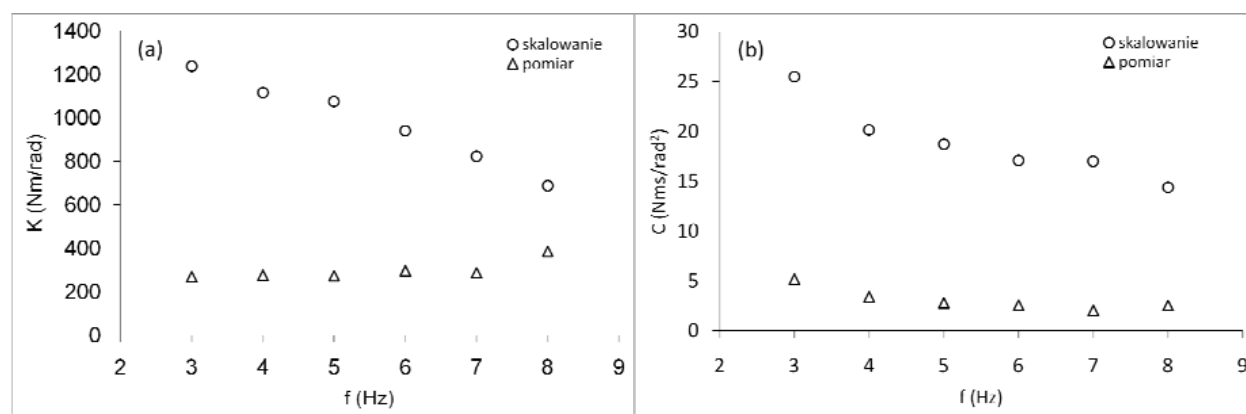
Rys. 6 przedstawia zależność badanych wielkości od obciążenia pionowego osi koła. Zarówno dla opony Scout jak i XTM RM zaobserwowano wyraźny wzrost wartości współczynników sztywności i tłumienia skrętnego wraz ze wzrostem obciążenia pionowego osi koła.



Rys. 6. Wartości sztywności skrętniej K (a), (c) i tłumienia skrętnego C (b), (d) dla opony Scout (wykresy górne) i opony XTM RM (wykresy dolne) przy trzech różnych obciążeniach nominalnych osi F_z

Wzrost sztywności K można scharakteryzować wielkością średnią $0,7 \text{ Nm/Nrad}$ (tj. zmiana wartości sztywności na 1 N zmiany obciążenia pionowego osi koła) w przypadku opony Scout (rys. 6a), oraz $1,4 \text{ Nm/Nrad}$ w przypadku opony XTM (rys. 6c). Analogiczne wielkości w przypadku współczynnika tłumienia C wynoszą $0,010 \text{ Nm}^2/\text{s/Nrad}^2$ dla opony Scout (rys. 6b) i $0,012 \text{ Nm}^2/\text{s/Nrad}^2$ dla opony XTM (rys. 6d).

Wyniki weryfikacji hipotezy o możliwości wykorzystania prostego skalowania wartości parametrów dla opony samochodowej do określenia wartości parametrów dla opony robota przedstawiono na rysunku 7. Skalowaniu poddano parametry opony samochodowej 145/70 R13. Współczynnik skali został obliczony jako stosunek objętości opony samochodowej do objętości opony robota i wynosi $i = 14$. Do obliczeń przyjęto objętość samej powłoki opony, tj. wykluczono objętość wewnątrz torusa opony, według wymiarów podanych w tab. 2.



Rys. 7. Skalowane i zmierzone wartości sztywności skrętnej K (a) i tłumienia skrętnego C (b); opona samochodowa: 145/70 R13; opona robota: typ Scout

W przypadku sztywności K wartości skalowane są ponad 4-krotnie większe niż wartości wyznaczone z badania obiektu, natomiast w przypadku współczynnika tłumienia nawet 7-krotnie większe, przy czym podane ilorazy wahają się dla różnych częstotliwości wymuszenia.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawioną analizę wyników badania parametrów skrętnych opon niepneumatycznych można podsumować w postaci sześciu zasadniczych wniosków:

1. W wyniku przeprowadzonych badań opon niepneumatycznych otrzymano charakterystyki częstotliwościowe sztywności skrętnej K oraz współczynnika tłumienia skrętnego C w zakresie 3–10 Hz. Średnia wartość sztywności skrętnej K w podanym zakresie częstotliwości dla obciążenia nominalnego osi 60 N wynosi: 237 Nm/rad dla opony typu Scout oraz 156 Nm/rad dla opony typu XTM. Średnia wartość tłumienia skrętnego C w podanym zakresie częstotliwości dla obciążenia nominalnego osi 60 N wynosi: 1,8 Nm s/rad² dla opony typu Scout oraz 0,8 Nm s/rad² dla opony typu XTM.
2. Wyniki otrzymane dla dwóch różnych egzemplarzy opony typu Scout są zbliżone, co stanowi ich dodatkową weryfikację.
3. Sztywność skrętna K i tłumienie skrętne C badanych nietypowych opon zależą od obciążenia pionowego osi koła.
4. Nie stwierdzono oczekiwanego wpływu wzoru śladu kontaktu opony z podłożem na wartości parametrów skrętnych opony, co może być związane z brakiem rozróżnienia w przedstawionych badaniach między parametrami ścian i bieżnika opony.
5. Sztywność K opony Scout jest średnio 1,5-krotnie większa niż sztywność opony XTM Racing Meats (iloraz ten zmienia się wraz z częstotliwością wymuszenia w granicach od 1,4 do 1,6). Współczynnik tłumienia C jest średnio 2-krotnie większy niż sztywność opony XTM (wahania ilorazu w granicach: 1,8–2,2).
6. Możliwości zastosowania skalowania wartości parametrów skrętnych opon samochodowych do określenia analogicznych wartości badanych opon nietypowych są bardzo ograniczone.

Planuje się przeprowadzenie dalszych badań ogumienia lekkiego robota kołowego w zakresie właściwości skrętnych samego bieżnika oraz w właściwości skojarzenia ciernego bieżnika z podłożem utwardzonym.

BIBLIOGRAFIA

1. Masłowski, A.: *Nowe inicjatywy w robotyce zaawansowanej*. Pomiar Automatyka Robotyka nr 2/2009, 90–95.
2. Zegelaar, P.W.A, Gong, S., Pacejka, H. B.: *Tyre Models for the Study of In-Plane Dynamics*. Vehicle System Dynamics (1994), 23: 1, 578–590.
3. Zegelaar, P. W.A., Pacejka, H.B.: *Dynamic Tyre Responses to Brake Torque Variations*. Vehicle System Dynamics (1997), 27: 1, 65–79.
4. Guzzomi, A.L., Sharman, A., Stone, B.J.: *Some torsional stiffness and damping characteristics of a small pneumatic tyre and the implications for powertrain dynamics*. Proc. IMechEng: D-J Aut (2010), 224: 2, 229–244.
5. Andrzejewski, R.: *Modele procesu napędu koła jezdnego. Modele tarcia*. Archiwum Motoryzacji (2005) nr 1, 59–76.
6. Dąbek, P.: *Stanowisko do identyfikacji parametrów ogumienia robota mobilnego Scout*. Pomiar Automatyka Robotyka, nr 2/2010, 380–385.