

BADANIA EKSPERYMENTALNE OGUMIENIA W NIEUSTALONYCH WARUNKACH ZNOSZENIA BOCZNEGO

WITOLD LUTY¹

Politechnika Warszawska

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych ogumienia samochodu ciężarowego w nieustalonych warunkach znoszenia bocznego. Badania wykonano przy wykorzystaniu dwóch stanowisk badawczych: stanowiska do badań quasi - statycznych oraz przyczepy do badań dynamicznych ogumienia. Zaprezentowano wyniki pomiaru wartości reakcji bocznej przenoszonej przez koło na tle zmian warunków ruchu koła. Podczas badań wymuszano szybkie zmiany wartości kąta znoszenia koła. Zadawano pojedyncze, skokowe albo oscylacyjne realizacje wymuszenia. Przedstawiono metodę obserwacji i analizy udziału nabiegania ogumienia w procesie przenoszenia reakcji bocznej w nieustalonych warunkach znoszenia bocznego koła. Uzyskane wyniki pomiarów przybliżają problematykę nabiegania ogumienia. Jednocześnie stanowią zasób danych umożliwiających weryfikację modelu współpracy koła ogumionego z podłożem, uwzględniającego nabieganie ogumienia.

Słowa kluczowe: nabieganie ogumienia, badania eksperymentalne ogumienia, znoszenie boczne

1. Wstęp

Badanie ogumienia w nieustalonych warunkach ruchu koła jest zadaniem szczególnie trudnym. Takie badanie wymaga stosowania specjalnych stanowisk badawczych, metod badania, a także metod obserwacji i obróbki wyników pomiaru. Wyniki takich badań zapewniają możliwość obserwacji zjawiska nabiegania i rozpoznania jego natury. Jednocześnie dają możliwość weryfikacji przygotowanego modelu nabiegania ogumienia w zakresie poprawności zastosowanego opisu matematycznego, jak i doboru jego współczynników.

Do badania ogumienia w nieustalonych stanach znoszenia bocznego najczęściej są stosowane stanowiska badawcze do badań dynamicznych [2,9,13]. Takie stanowiska zapewniają realne warunki ruchu koła, ale wprowadzają również ograniczenia w zakresie szybkości ich zmian, co znacznie utrudnia realizację poznawczych celów prowadzonych badań. W określonych przypadkach korzystne jest stosowanie stanowisk quasi - statycznych, w których można symulować skokowe zmiany niektórych warunków ruchu koła, np. kąta

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: wluty@wt.pw.edu.pl, tel. 22 234 81 13

znoszenia albo obciążenie normalnego koła [6]. Pośrednią metodą badania nieustalonych stanów znoszenia bocznego ogumienia mogą być również badania drogowe pojazdu w dynamicznych warunkach ruchu [9].

Nieustalone stany znoszenia bocznego najczęściej są kojarzone z przypadkiem szybkich zmian wartości kąta znoszenia koła. Jednak w rzeczywistości mogą zachodzić również na skutek zmiany każdej z wielkości fizycznych, determinujących wartość reakcji bocznej przenoszonej przez koło w warunkach znoszenia bocznego. Można to wyjaśnić na przykładzie opisu matematycznego modelu współpracy koła ogumionego z podłożem. Praktycznie w każdym ze znanych modeli, wartość reakcji bocznej F_y przenoszonej przez koło ogumione może być wyrażona iloczynem dwóch czynników:

$$F_y = s_y \cdot k_\delta \quad (1)$$

gdzie: F_y – reakcja boczna działająca w strefie styku czoła opony z podłożem,

s_y – poślizg boczny koła,

k_δ – współczynnik proporcjonalności, który można również nazwać współczynnikiem odporności koła na znoszenie boczne, w ustalonych warunkach ruchu koła.

Na przykładzie modelu Dugoffa-Fanchera-Segela (DFS) czynniki te można opisać jako [1]:

$$s_y = tg\delta \quad (2)$$

$$k_\delta = \frac{c_y}{1 - s_x} \quad \text{dla } s_w \leq 0.5 \quad (3)$$

albo

$$k_\delta = \frac{c_y}{1 - s_x} \left(\frac{4 \cdot s_w - 1}{4 \cdot s_w^2} \right) \quad \text{dla } s_w \geq 0.5 \quad (4)$$

gdzie dodatkowemu obliczeniu podlegają:

$$s_w = \frac{\sqrt{c_x^2 \cdot s_x^2 + c_y^2 \cdot s_y^2}}{\mu \cdot F_z \cdot (1 - s_x)} \quad (5)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 - k \cdot v_{s\delta}) \quad (6)$$

$$v_{s\delta} = v_x \cdot \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad (7)$$

W wyrażeniach zastosowano następujące oznaczenia:

δ – kąt znoszenia koła,

c_x – współczynnik wzdłużnej sztywności poślizgowej opony,

c_y – współczynnik bocznej sztywności poślizgowej opony,

s_x – poślizg wzdłużny koła,

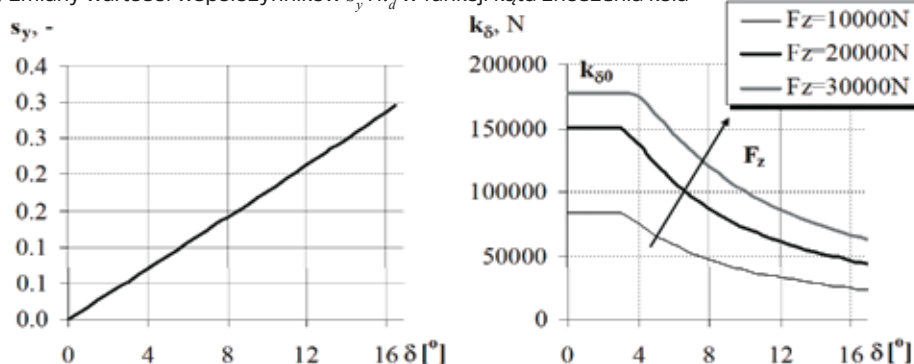
s_y – poślizg boczny koła,

μ_0 – współczynnik tarcia gumy bieżnika względem podłoża,

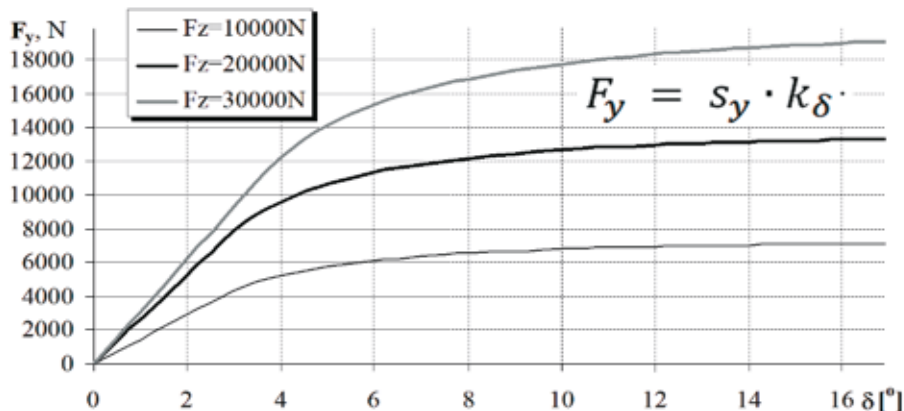
- k – współczynnik wpływu prędkości poślizgu na współczynnik tarcia gumy bieżnika do podłoża,
 $v_{s\delta}$ – prędkość poślizgu koła względem podłoża,
 v – prędkość wzdłużna środka koła względem podłoża,
 F_z^x – obciążenie normalne koła (reakcja normalna działająca na koło w strefie styku czoła opony z podłożem).

Współczynniki s_y i k_δ zmieniają się wraz ze wzrostem wartości kąta znoszenia w sposób pokazany na rysunku 1a, tworząc zgodnie z równaniem (1) charakterystykę odporności koła na znoszenie boczne. Na przykładzie przedstawionego rysunku widać, że wartość reakcji bocznej F_y przenoszonej przez koło w ustalonym stanie znoszenia bocznego zależy nie tylko od wartości poślizgu bocznego koła s_y , ale również od chwilowej wartości współczynnika odporności koła na znoszenie boczne k_δ . Ten współczynnik przyjmuje wartość współczynnika bocznej sztywności poślizgowej c_y tylko dla małych wartości kąta znoszenia.

a) Zmiany wartości współczynników s_y i k_δ w funkcji kąta znoszenia koła



b) Charakterystyka odporności na znoszenie boczne



Rys. 1. a) Zmiany poślizgu bocznego s_y oraz współczynnika odporności na znoszenie boczne k_δ w funkcji kąta znoszenia koła δ ; b) charakterystyki odporności koła ogumionego na znoszenie boczne wyznaczone dla różnych wartości obciążenia normalnego koła F_z

W związku z tym zmiany warunków ruchu koła, a tym samym występowanie nieustalonych warunków znoszenia bocznego koła, dotyczą nie tylko zmian wartości kąta znoszenia, ale również współczynnika odporności na znoszenie boczne k_{δ} . Na podstawie zależności 3-7 można stwierdzić, że współczynnik ten może się istotnie zmieniać wraz ze zmianą innych warunków ruchu koła, w tym:

- poślizgu wzdłużnego s_x – np. podczas gwałtownego hamowania i odhamowania kół jezdnych,
- poślizgu bocznego koła s_y – np. podczas gwałtownych manewrów skrętu lub oddziaływania silnych i gwałtownych impulsów wiatru bocznego,
- współczynnika tarcia gumy bieżnika względem podłoża μ – np. podczas jazdy po nawierzchni o zmiennych właściwościach, wpływających na przyczepność kół jezdnych pojazdu do podłoża,
- obciążenia normalnego koła F_z – np. podczas jazdy po nierównościach drogi.

Przygotowując model współpracy koła ogumionego z podłożem, z uwzględnieniem nabiegania ogumienia, wykonano badania eksperymentalne koła ogumionego w nieustalonych warunkach znoszenia bocznego. Obserwowano zachowanie ogumienia w różnych przypadkach zmiany warunków ruchu koła, możliwych do zadania w warunkach laboratoryjnych, wykorzystując dostępne wyposażenie badawcze.

W badaniach wykorzystano stanowiska badawcze zbudowane w Wojskowej Akademii Technicznej, w tym:

- stanowisko do quasi - statycznych badań ogumienia [4],
- przyczepę dynamometryczną do dynamicznych badań ogumienia wraz ze stanowiskiem bębnowym [5].

Zastosowano różne warianty wymuszenia zmiany warunków ruchu koła podczas toczenia ze znoszeniem bocznym. W tym przypadku pokazano wyniki badań koła ogumionego w warunkach zmian wartości kąta znoszenia koła podczas:

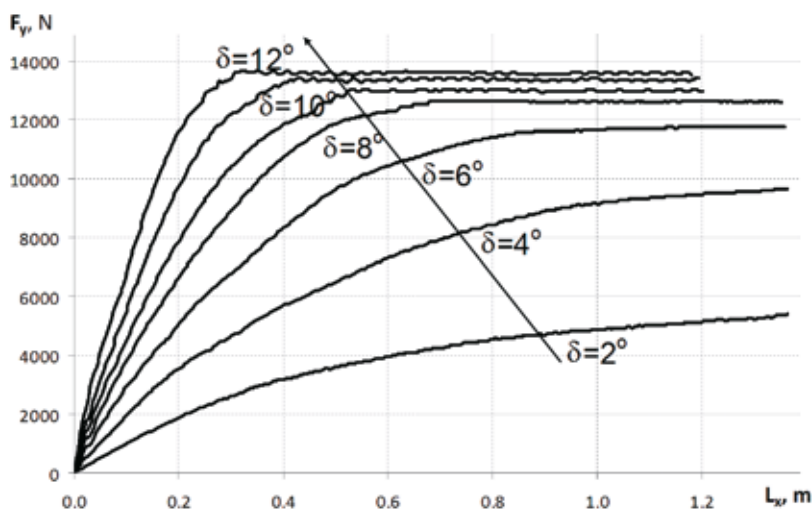
- skokowej zmiany wartości kąta znoszenia w quasi - statycznych warunkach ruchu koła,
- oscylacyjnych zmian wartości kąta znoszenia koła podczas toczenia koła na wprost w warunkach dynamicznych,
- oscylacyjnych zmian wartości kąta znoszenia koła względem wstępnie ustalonej jego wartości stałej.

2. Wyniki badań ogumienia

Paradoksalnie proces nabiegania ogumienia łatwo zasymulować i obserwować podczas badań w quasi-statycznych warunkach ruchu koła [6]. Rozpoczęcie toczenia koła dociśniętego do bieżni stanowiska ze wstępnie ustawionym kątem znoszenia δ powoduje, że reakcja boczna F_y przenoszona przez koło narasta w sposób charakterystyczny dla procesu nabiegania ogumienia (rys. 2).

W quasi-statycznych warunkach badań dla każdej z zadanych wstępnie wartości kąta znoszenia koła δ reakcja boczna F_y narasta aż do osiągnięcia wartości, jaką koło może osiągnąć w ustalonych warunkach ruchu. Przebieg zmiany wartości reakcji bocznej F_y w funkcji przebytej drogi albo w funkcji czasu można nazwać charakterystyką nabiegania ogumienia. Przedstawione na rysunku 2 charakterystyki nabiegania są typowe dla elementu inercyjnego I rzędu [8]. W praktyce charakterystyki nabiegania ogumienia wyznaczone w warunkach quasi - statycznych umożliwiają dobór wartości tzw. drogi nabiegania L_n . Droga nabiegania jest istotnym współczynnikiem w modelu nabiegania ogumienia. Przy określonej prędkości toczenia koła v_x jej wartość determinuje czas nabiegania według zależności [6]:

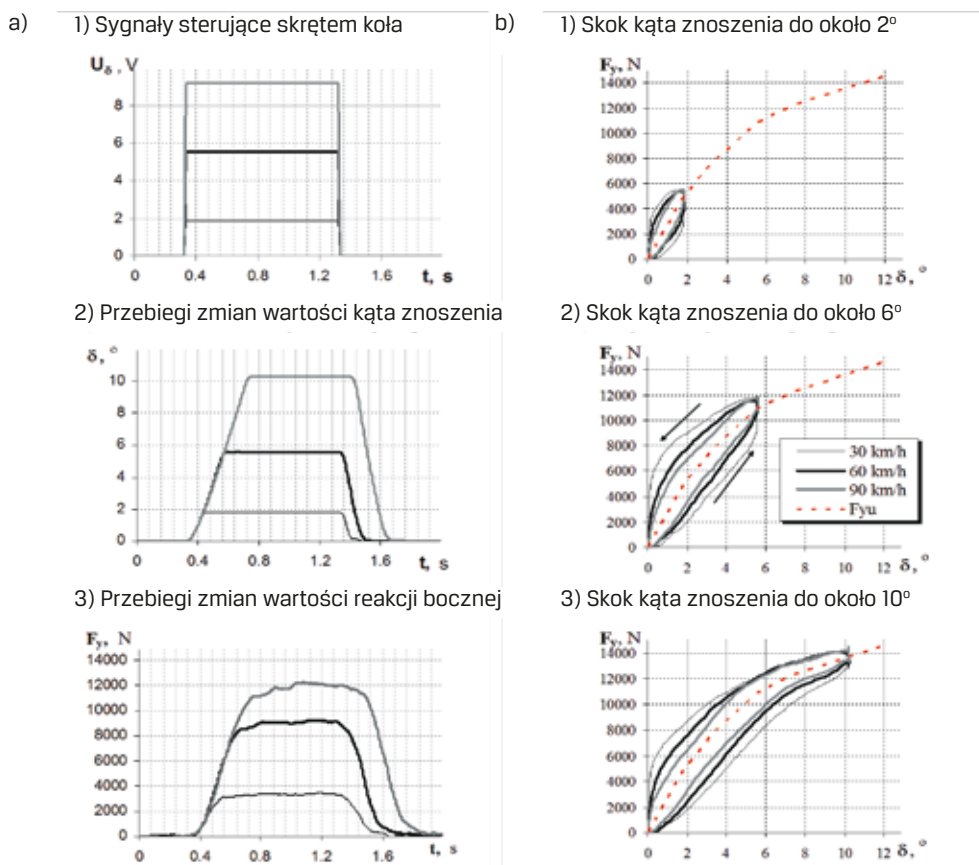
$$t_n = \frac{L_n}{v_x} \quad (8)$$



Rys. 2. Charakterystyki nabiegania ogumienia wyznaczone w quasi - statycznych warunkach ruchu koła (ogumienie samochodu ciężarowego średniej ładowności, obciążenie normalne koła $F_z = 20\,000\text{ N}$)

Charakterystyk nabiegania przedstawionych na rysunku 1 nie da się obserwować w dynamicznych warunkach ruchu koła. Podczas toczenia koła z dużą prędkością nie ma możliwości zadania skokowej zmiany wartości kąta znoszenia, nawet w przypadku maszynowego sterowania skrętem koła. Maksymalna szybkość skrętu koła, a więc szybkość zadania określonej wartości jego kąta znoszenia koła, jest ograniczona mocą mechanizmu skrętu oraz oporami bezwładności skręcanego koła. Na przykładzie wyników pomiaru przedstawionych na rysunku 3a widać, że nawet przy skokowej zmianie napięcia sterującego hydraulicznym układem skrętu koła przyczepy dynamometrycznej, zmiana kąta znoszenia koła nie jest skokowa. W efekcie również tempo zmian wartości reakcji bocznej F_y przenoszanej przez badane koło jest wyraźnie zmniejszone (rys. 3a). Zmiany wartości reakcji bocznej F_y podążają za zmianami wartości kąta znoszenia koła δ . Jednak, obserwując przebiegi wartości tych wielkości fizycznych w dziedzinie czasu, trudno ocenić, a nawet stwierdzić jednoznacznie, czy

łączy je zależność z udziałem zjawiska nabiegania opony. Mimo to również w takich warunkach ruchu koła można zaobserwować efekty nabiegania ogumienia. Widać je na rysunku 3b. Po złożeniu przebiegów zmian zmierzonej reakcji bocznej F_y w funkcji zadawanego kąta znoszenia δ widać, że zmiany wartości reakcji bocznej podążają za zmianami kąta znoszenia z wyraźną zwłoką, tworząc pętlę lewoskrętną. Zwłoka ta jest spowodowana głównie nabieganiem ogumienia. Jej skutkiem jest różnica pomiędzy wartościami mierzonej reakcji bocznej F_y a wartością reakcji F_{yu} , którą koło może przenosić w ustalonych warunkach ruchu. Oczekiwane wartości tej siły zaznaczono również na rysunku 3b. Wykorzystując zasady analizy właściwości układów dynamicznych na podstawie krzywych Lissajous można stwierdzić, że w tym przypadku szerokość utworzonej pętli jest miarą przesunięcia fazowego zmian reakcji bocznej F_y względem zadawanych zmian wartości kąta znoszenia koła δ [7].



Rys. 3. Wyniki badań koła ogumionego w warunkach dynamicznej zmiany kąta znoszenia; a) przykład sygnałów sterowania wraz z wynikami pomiaru kąta znoszenia δ oraz reakcji bocznej F_y przenoszonej przez koło ($v = 30 \text{ km/h}$); b) wyniki pomiaru wartości reakcji bocznej F_y dla różnych wartości zadawanego kąta znoszenia δ i prędkości toczenia koła v

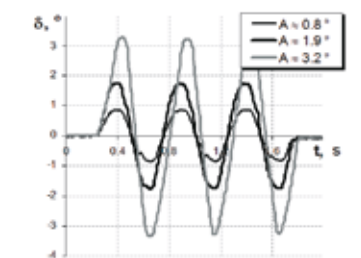
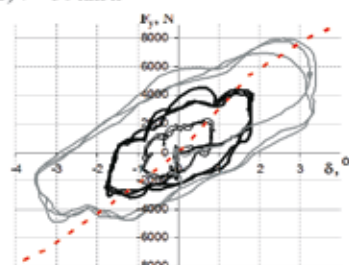
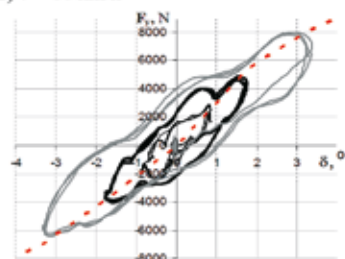
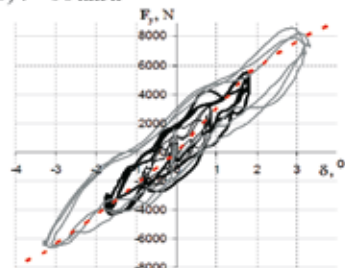
Szerokość zakreślonej pętli histerezy jest tym mniejsza, im szybsza jest reakcja opony na zmiany warunków ruchu koła – w tym przypadku zmiany kąta znoszenia koła δ . Na rysunku 3b widoczne jest zmniejszenie szerokości pętli wraz ze wzrostem prędkości toczenia koła oraz ze wzrostem kąta znoszenia. To znaczy, że udział nabiegania opony w procesie przenoszenia reakcji bocznej podczas toczenia koła ze znoszeniem bocznym wyraźnie zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości oraz kąta znoszenia koła.

Zjawisko nabiegania ogumienia jest obecne również w innych przypadkach zmiany wartości kąta znoszenia koła w warunkach dynamicznych. W kolejnym etapie badań wymuszeniem zmian warunków ruchu koła były oscylacje wartości kąta znoszenia δ podczas toczenia koła na wprost (bez znoszenia bocznego) (rys. 4a) oraz względem wstępnie ustalonej wartości kąta znoszenia δ_u (rys. 4b).

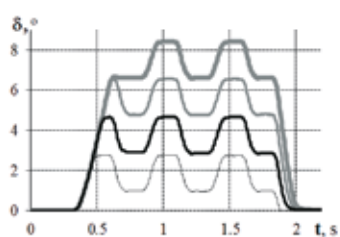
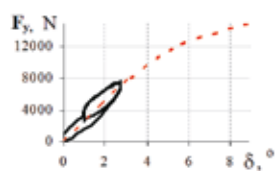
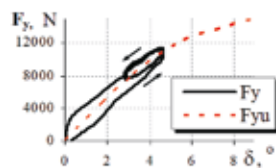
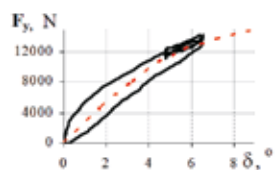
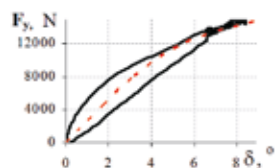
W przypadku toczenia koła na wprost, zwiększanie amplitudy przy ustalonej częstotliwości oscylacji prowadzi do szybszych zmian wartości kąta znoszenia koła δ . Tym samym wyraźnie zwiększa się szerokość obserwowanych pętli wykresu $F_y = f(\delta)$. Jednocześnie, podobnie jak w poprzednim przypadku, szerokość zakreślonej pętli zmniejsza się wyraźnie wraz ze wzrostem prędkości toczenia koła v_x (rys. 4a). Z kolei oscylacje kąta znoszenia koła δ wokół wstępnie ustalonej jego wartości δ_u również prowadzą do powstania charakterystycznej pętli zależności $F_y = f(\delta)$ (rys. 4b). W tym przypadku widać, że szerokość pętli wyraźnie zmniejsza się wraz ze wzrostem wstępnie zadanej wartości kąta znoszenia koła δ_u . Zatem również ten etap badań potwierdza, że udział nabiegania ogumienia w procesie przenoszenia reakcji bocznej podczas toczenia koła ze znoszeniem bocznym wyraźnie zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości oraz kąta znoszenia koła.

Wykazane zachowanie opony potwierdzają wyniki prac własnych oraz źródła literaturowe [6,8,3]. Udział zjawiska nabiegania w procesie przenoszenia reakcji bocznej przez oponę zależy od rzeczywistej wartości czasu nabiegania t_n w każdym konkretnym teście. Czas ten zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości toczenia koła oraz ze spadkiem długości drogi nabiegania L_n według zależności (8). Natomiast długość drogi nabiegania L_n zmniejsza się wraz ze wzrostem kąta znoszenia koła.

a) Wymuszenie

1) $v = 30 \text{ km/h}$ 2) $v = 60 \text{ km/h}$ 3) $v = 90 \text{ km/h}$ 

b) Wymuszenie

1) $\delta_{s0} = 1.9^\circ$ 2) $\delta_{s0} = 3.8^\circ$ 3) $\delta_{s0} = 5.6^\circ$ 4) $\delta_{s0} = 7.8^\circ$ 

Rys. 4. Nabieganie ogumienia w warunkach oscylacyjnych zmian wartości kąta znoszenia koła; a) oscylacje kąta znoszenia koła δ wokół zerowej wartości z różnymi amplitudami ($f = 2 \text{ Hz}$); b) oscylacje kąta znoszenia koła δ wokół zadanej wstępnie jego wartości δ_u ($f = 2 \text{ Hz}$, $A = 1^\circ$, $v_x = 60 \text{ km/h}$)

3. Podsumowanie

Na przykładzie przedstawionych wyników badań eksperymentalnych pokazano metody symulacji nieustalonych stanów znoszenia bocznego koła poprzez zmianę jego kąta znoszenia w warunkach laboratoryjnych. Zaprezentowano wyniki obserwacji i oceny udziału nabiegania ogumienia w procesie przenoszenia przez koło reakcji bocznej podczas toczenia koła ze znoszeniem bocznym. Proces nabiegania ogumienia można obserwować w warunkach quasi - statycznych w postaci funkcji narastania wartości reakcji bocznej przenoszonej przez koło w dziedzinie przemieszczenia koła lub czasu. W warunkach dynamicznych badanie procesu nabiegania ogumienia wymaga zmiany dziedziny obserwowanych wyników pomiaru. Wykazano, że analiza zmian wartości reakcji bocznej w funkcji wymuszenia (w tym przypadku zmian kąta znoszenia koła) daje możliwość obserwacji i jakościowej oceny udziału nabiegania ogumienia w procesie przenoszenia reakcji bocznej przez koło. Wykazano, że w warunkach dynamicznych udział nabiegania ogumienia może się zmieniać w zależności od prędkości toczenia koła, wartości oraz szybkości zmian kąta znoszenia koła. Przedstawione wyniki badań stanowią podstawę do przygotowania opisu matematycznego zjawiska nabiegania ogumienia lub do weryfikacji ilościowej i jakościowej modelu nabiegania ogumienia z uwzględnieniem wykazanych zależności.

Literatura

- [1] DUGOFF, H.; FANCHER, P. S.; SEGEL, L.: *An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance*. SAE Transactions 700377, Vol. 79.
- [2] LEE, S.; HEYDINGER, G. J.; GUENTHER, D. A.: *The application of pulse input techniques to the study of tire lateral force and self-aligning moment dynamics in the frequency domain*. SAE Paper 950317, 1995.
- [3] LOEB, J. S.; GUENTHER, D. A.; Chen, H. H. F.; Ellis, J. R.: *Lateral stiffness, cornering stiffness and relaxation length of the pneumatic tire*. SAE Paper 900129, 1990.
- [4] LUTY, W.; PROCHOWSKI, L.; SZURKOWSKI, Z.: *Stanowisko do badań ogumienia dużego rozmiaru*, VII Międzynarodowe Sympozjum IPM. Warszawa-Rynia, 8-10.12.1999.
- [5] LUTY, W.; WYSOCKI, T.: *Przyczepa dynamometryczna do badań dynamicznych ogumienia*, VII Międzynarodowe Sympozjum IPM. Warszawa-Rynia, 8-10.12.1999.
- [6] LUTY, W.: *Wyznaczanie parametrów modelu nabiegania ogumienia na podstawie wyników badań eksperymentalnych*, Postępy Nauki i Techniki No. 14, 2012.
- [7] SYDENHAM, P. D.: *Podręcznik metrologii*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
- [8] RILL, G.: *First order tire dynamics*. 3rd European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, Portugal, 5-8 June 2006, University of Applied Sciences Regensburg.
- [9] SAR, H.; REŃSKI, A.: *Simulation of non-steady-state curvilinear vehicle motion*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 16, No. 3/2009.
- [10] SCHMID, I.; TOMASKE, W.: *Tire testing facility for simulation of transient operating conditions*. ATZ 1/ 1984.
- [11] TAKAHASHI, T.; PACEJKA, H. B.: *Cornering on uneven roads*. Supplement to Vehicle System Dynamics, Vol. 17 (1988).
- [12] WILLUMEIT, H. P.; BÖHM, F.: *Wheel vibration and transient tire forces*. Vehicle System Dynamics, Vol. 24 (1995), pp. 525-550.
- [13] ZANTEN, A.; ERHARDT, R.; LUTZ, A.: *Measurement and simulation of transients in longitudinal and lateral tire forces*. SAE Paper 900210, 1990.