

# OCENA MOŻLIWOŚCI WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK KOŁA OGUMIONEGO ZA POMOCĄ AUTORSKIEGO SYSTEMU DO BADAŃ DROGOWYCH

TOMASZ LECH STAŃCZYK<sup>1</sup>, PIOTR STRACHOWSKI<sup>2</sup>

Politechnika Świętokrzyska

## Streszczenie

W pracy zaprezentowano autorską metodologię wykonywania pomiarów drogowych, umożliwiających w prosty sposób pozyskiwanie charakterystyk bocznego znoszenia kół ogumionych. Przedstawiono oryginalną przyczepę pomiarową zbudowaną w Katedrze Pojazdów Samochodowych i Transportu Politechniki Świętokrzyskiej. Zaprezentowano przyczepę na etapie jej projektowania i w postaci zbudowanego urządzenia. Opisano pomiary drogowe wykonane z użyciem przyczepy i przedstawiono przykładowy wynik tych pomiarów w postaci charakterystyki bocznego znoszenia badanego koła.

Następnie, w celu oceny poprawności zastosowanej metodologii, sformułowano model do badania dynamiki układu samochód – przyczepa. Wprowadzono niezbędne parametry i założenia oraz określono liczbę stopni swobody modelu. Opisano procedurę tworzenia modelu za pomocą oprogramowania do analizy dynamiki układów wielomasowych MD ADAMS. Scharakteryzowano elementy tworzące analizowany układ, bryły i więzy występujące pomiędzy nimi, siły zewnętrzne oraz użyty model koła ogumionego. Opisano przeprowadzone badania symulacyjne.

Przedstawiono wyniki otrzymane podczas badań symulacyjnych i procedurę ich analizy w celu otrzymania wartości siły bocznej dla argumentu zadanego w postaci kąta znoszenia. Otrzymaną charakterystykę bocznego znoszenia porównano z charakterystyką wzorcową modelu koła ogumionego, zastosowanego w badanym układzie. Dokonano podsumowania i oceny otrzymanych wyników.

**Słowa kluczowe:** koło ogumione, opona, znoszenie boczne, badania drogowe, badania symulacyjne, MD ADAMS

## 1. Wprowadzenie

Charakterystyki kół ogumionych otrzymuje się podczas badań laboratoryjnych lub drogowych. Badania drogowe kół ogumionych o charakterze naukowo – badawczym i rozwojowym prowadzone są przez ośrodki akademickie oraz firmy samochodowe i oponiarskie

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska, Katedra Pojazdów Samochodowych i Transportu, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego, 25-314 Kielce, e mail: stanczyk@tu.kielce.pl, tel. 41 342 43 36

<sup>2</sup> Stypendysta projektu: „INWENCJA – Potencjał młodych naukowców oraz transfer wiedzy i innowacji wsparciem dla kluczowych dziedzin świętokrzyskiej gospodarki” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, e-mail: strachowski@o2.pl, tel. 605 556 354

[1, 3, 7, 8, 10, 11, 15]. Parametry opon pozyskane z badań drogowych dają najpewniejsze odwzorowanie, praktycznie bez żadnych uproszczeń.

W badaniach drogowych najczęściej zakłada się, że podczas prostoliniowego ruchu pojazdu badawczego, wartość kąta znoszenia wyznaczona jest przez oś wzdłużną pojazdu i płaszczyznę koła pomiarowego. Powstająca na styku nawierzchni i koła pomiarowego siła boczna może zakłócić ruch pojazdu badawczego. Jednak przez odpowiednio dobrane parametry pojazdu (na przykład przez zwiększenie jego masy i odporności na boczne znoszenie kół jezdnych) wpływ siły zakłócającej jest znacznie ograniczony lub prawie zupełnie niwelowany.

Do badań drogowych używa się pojazdów lub zespołów pojazdów, których pierwszą zauważalną własnością jest ich wielkość w odniesieniu do rozmiaru (nośności) koła pomiarowego. Dzięki takiej konstrukcji zapewniana jest możliwość utrzymania stałej wartości kąta znoszenia badanego koła podczas przejazdu odcinka pomiarowego. Dzieje się tak, ponieważ koło pomiarowe (badane) nie oddziałuje na pojazd lub jego oddziaływanie jest na tyle niewielkie, że nie powoduje zaburzenia ruchu [3, 7, 8, 11, 15].

Drugą istotną cechą istniejących pojazdów jest to, że koło pomiarowe nie jest elementem ich układu jezdnego. Koło pomiarowe jest dodatkowym elementem sterowanym i obciążanym absolutnie niezależnie. Jednak z powodu wielkości i zaawansowanej konstrukcji takich pojazdów, czasochłonności i kosztów badań, praktyczne ich stosowanie w badaniach o charakterze ekspertyzowym (np. dla celów sporządzania opinii rzeczoznawczych) jest niemożliwe. W badaniach rzeczoznawczych, często wymagane jest sprawdzenie (wyznaczenie charakterystyki) współpracy koła ogumionego z nawierzchnią drogi w miejscu, w którym nastąpiło zdarzenie (wypadek). Wynika z tego konieczność prowadzenia badań na ograniczonym (krótkim) odcinku drogi. Pojawiają się także ograniczenia czasowe, spowodowane tym, że badania odbywają się na drodze publicznej. Również koszt ekspertyzy musi być wielokrotnie niższy od kosztów badań poznawczych.

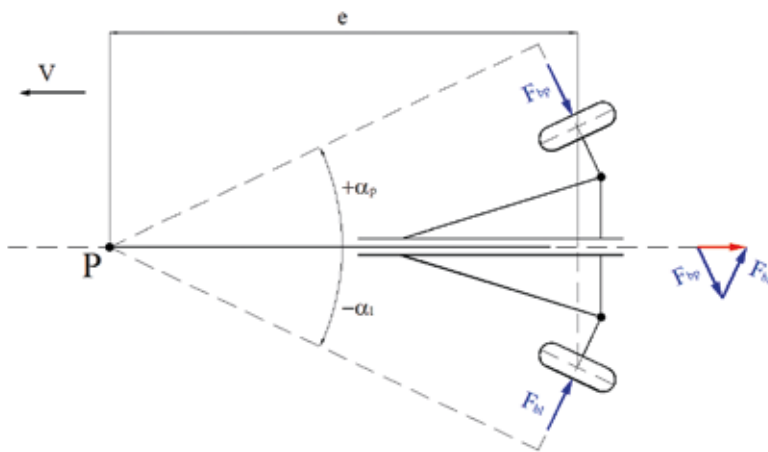
Poszukując rozwiązania optymalnego pod względem zdolności pomiarowych i kosztów, podjęto zagadnienie możliwości wyznaczania charakterystyk koła ogumionego za pomocą prostszego systemu do badań drogowych – przyczepy dynamometrycznej. Przy czym, przez prosty system, należy tu rozumieć pojazd – przyczepę, o budowie uproszczonej i odmiennej od wymienionych uprzednio, dużych i skomplikowanych pojazdów badawczych.

## **2. Koncepcja pozyskiwania charakterystyk bocznego znoszenia kół ogumionych za pomocą przyczepy pomiarowej**

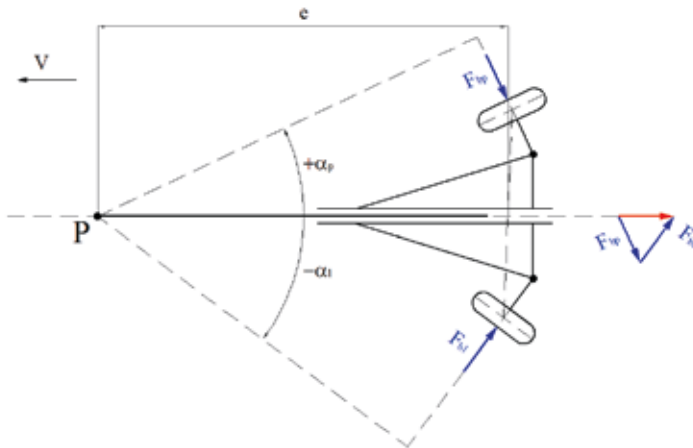
Rozwiązaniem zaproponowanym przez autorów jest, przedstawiona na schematach Rys. 1, Rys. 2. i Rys. 3. przyczepa dwukołowa, jednoosiowa łączona przegubowo z samochodem holującym. Przy czym za oś tej przyczepy przyjmuje się linię łączącą punkty przecięcia osi kół z ich płaszczyznami symetrii (rys. 1 i rys. 2) [12, 13, 14].

W przyczepie zakłada się możliwość instalowania jako kół pomiarowych, dla których mają być wyznaczone charakterystyki współpracy z nawierzchnią drogi, nieszkodzonych kół

z samochodu uczestniczącego w wypadku. Warunki pracy koła pomiarowego odpowiadają wówczas warunkom pracy jakim to koło poddawane było w samochodzie będącym przedmiotem ekspertyzy. Podczas badania możliwie najwierniej odwzorowuje się parametry koła takie jak obciążenie pionowe, moment hamujący czy też pochylenie koła.



Rys. 1. Schemat przyczepy pomiarowej ( $\alpha_p = -\alpha_t$ )



Rys. 2. Schemat przyczepy pomiarowej ( $\alpha_p \neq -\alpha_t$ )

Wykorzystanie jednoosiowej, dwukołowej przyczepy pomiarowej do badania kół jezdnych nie jest oryginalnym pomysłem autorów. Podobne rozwiązanie, ale przyczepy do badań kół samochodów ciężarowych, przedstawione zostało między innymi w pracach [2, 5, 6].

Przyczepa opracowana przez autorów jest odmiennej konstrukcji [12], posiada m.in. oryginalną piastę pomiarową [14].

Poza tym, koncepcja przyczepy dynamometrycznej opracowanej przez autorów opiera się na następujących założeniach:

- dla symetrycznych własności ogumienia prawej i lewej strony przyczepy, skręcenie obu jej kół o tę samą wartość, ale o przeciwnych zwrotach ( $\alpha_p = -\alpha_l$  wg rys. 1) powoduje, że suma momentów sił bocznych (powstających w punkcie kontaktu kół z nawierzchnią) względem osi przegubu (P na rys. 1) jest równa 0 i jej ruch odbywa się bez zakłóceń,
- dla niesymetrycznych własności ogumienia prawej i lewej strony przyczepy, skręcenie obu jej kół o różną wartość i o przeciwnych zwrotach ( $\alpha_p \neq -\alpha_l$  wg rys. 2) może w pewnym przypadku powodować, że suma momentów sił bocznych (powstających w punkcie kontaktu kół z nawierzchnią) względem osi przegubu (P na rys. 2) jest równa 0 i jej ruch odbywa się bez zakłóceń,
- koła pomiarowe są jednocześnie kołami jezdными przyczepy,
- kołem pomiarowym przyczepy może być dowolne z jej kół a zadana wartość kąta znośzenia jest równa kątowi skręcenia tego koła,
- każde z kół przyczepy może być skręcone niezależnie od drugiego (rys. 3),
- każde z kół przyczepy może być pochylone niezależnie od drugiego (rys. 3),
- każde koło przyczepy może być pochylone niezależnie od jego skręcenia (rys. 3),
- każde z kół przyczepy może być hamowane niezależnie od drugiego,
- odległość pomiędzy osią przyczepy a przegubem łączącym ją z pojazdem holującym (wymiar  $e$  na rys. 1 i rys. 2) jest regulowana dzięki zastosowaniu teleskopowego dyszla, co umożliwiłoby zapewnienie poprawy stateczności urządzenia podczas prób z dużymi prędkościami ruchu, jeżeli warunki przeprowadzenia ekspertyzy tego wymagają.



Rys. 3. Schemat niezależnego skręcenia i pochylecia kół przyczepy pomiarowej

### 3. Budowa przyczepy dynamometrycznej

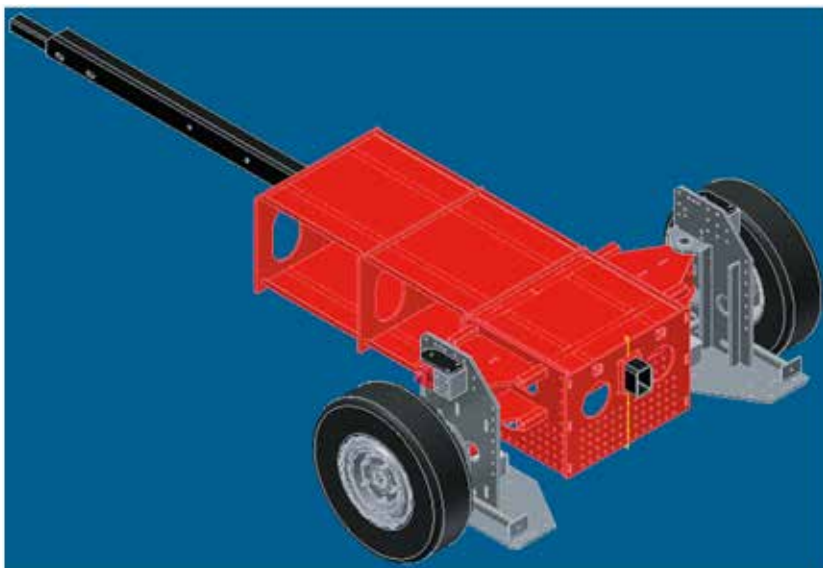
Budowę przyczepy poprzedził autorski projekt urządzenia wykonany z wykorzystaniem technik komputerowego wspomaganie projektowania. Wykonanie projektu przyczepy z wykorzystaniem oprogramowania CAD typu 3D umożliwiło m.in. precyzyjne wyznaczenie środka masy oraz dokładne określenie momentów bezwładności tego urządzenia [12].

Podczas projektowania i budowy przyczepy zostały także uwzględnione wyniki jakościowych i ilościowych analiz stateczności układu holownik – przyczepa [12, 13].

W przyczepie zastosowano m.in. teleskopowy dyszel, pozwalający na zmianę odległości osi przyczepy od przegubu (wymiar  $e$  na rys. 1 i rys. 2). Wprowadzono też możliwość regulacji wartości masy przyczepy i położenia jej środka za pomocą układu obciążników (patrz rys. 7).

Rysunek 4 przedstawia projekt przyczepy. Natomiast na rysunku 5 przedstawiono najważniejszy fragment przyczepy, koło zamocowane do piasty pomiarowej.

W zbudowanej przyczepie przyjęto rozwiązanie korzystne pod względem zdolności pomiarowych i kosztów. Ograniczono możliwości pomiarowe piasty do pary sił: bocznej ( $F_y$ , jasna strzałka na rys. 5) i normalnej ( $F_z$ , ciemna strzałka na rys. 5), które mierzone są za pomocą prostego, oryginalnego systemu pomiarowego.



Rys. 4. Rysunek przyczepy dynamometrycznej



Rys. 5. Rysunek koła pomiarowego

W skrócie, układ pomiarowy piasty można przedstawić jako ramę jednokrotnie statycznie niewyznaczalną, w której skuteczne, analityczne obliczenie wartości sił reakcji jest utrudnione. Jednak możliwe jest wyznaczenie tych reakcji metodą doświadczalną (empiryczną), poprzez pomiar i opisanie ich charakterystyką pola wygenerowanych sił zewnętrznych ( $F_y$  i  $F_z$ ) [14].

Zmontowaną i przygotowaną do badań drogowych przyczepę przedstawiono na ilustracjach rys. 6 i rys. 7.



Rys. 6. Przyczepa pomiarowa, regulacja kątów skręcenia i pochylenia kół



Rys. 7. Rysunek koła pomiarowego

Główne parametry przyczepy przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1. Parametry przyczepy dynamometrycznej**

Parametr	Oznaczenie	Wartość
masa własna przyczepy	$m_{w3}$	650 kg
moment bezwładności (oś wzdluzna)	$I_x$	150 kg·m <sup>2</sup>
moment bezwładności (oś poprzeczna)	$I_y$	250 kg·m <sup>2</sup>
moment bezwładności (oś pionowa)	$I_z$	400 kg·m <sup>2</sup>
kąt skręcenia, koło lewe	$\alpha_l$	5°...+25°
kąt skręcenia, koło prawe	$\alpha_p$	5°...+25°
kąt pochylenia, koło lewe	$\gamma_l$	10°...+10°
kąt pochylenia, koło prawe	$\gamma_p$	10°...+10°
masa obciążnika	$m_{ob}$	25 kg
maksymalna masa przyczepy	$m_{max3}$	1400 kg
Uwaga. Jako dodatni (+) przyjęto kąt skręcenia koła do wewnątrz przyczepy.		

## 4. Badania drogowe

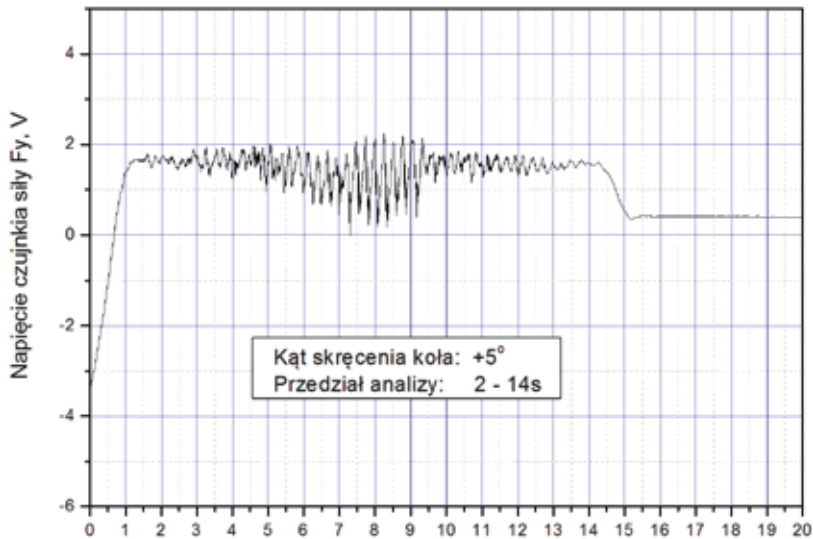
Z użyciem powstałej przyczepy przeprowadzono pomiary drogowe, podczas których mierzono siłę boczną oddziałującą na badane koło w funkcji jego kąta znoszenia.

W celu określenia pojedynczego punktu charakterystyki bocznego znoszenia  $F_y = f(\alpha)$ , przejeżdżano ze stałą prędkością, określony, prostoliniowy odcinek drogi. Warunkiem poprawności wykonywanego pomiaru było zachowanie równoległości pomiędzy wektorem prędkości samochodu holującego i osią wzdluzną przyczepy. Poprawność tę oceniano wzrokowo, obserwując położenie dyszla przyczepy względem nadwozia samochodu. Przyjęto również, że minimalny odcinek przejazdu wynosić powinien 10 m.

Oba koła przyczepy były o zbliżonych parametrach, miały takie same opony 195R14 z zimowym bieżnikiem. Kołem pomiarowym było koło lewe.

Charakterystykę bocznego znoszenia określano dla zakresu kąta  $\alpha$  od  $-2^\circ$  do  $+15^\circ$ . Przy czym od  $-2^\circ$  do  $+3^\circ$  kąt zmieniano co  $0,5^\circ$ , zaś od  $+3^\circ$  do  $+15^\circ$  co  $1^\circ$ . Łącznie dało to 23 punkty pomiarowe.

Jako bezpieczną prędkość ustalono i przyjęto 20 km/h (5,56 m/s). Czas rejestracji każdej próby był równy 20 s, natomiast do analizy sygnałów przyjmowany był jedynie, określony arbitralnie, fragment próby, w którym spełnione były założone warunki poprawności pomiaru. Wartość pojedynczego punktu charakterystyki dla określonego argumentu  $\alpha$  obliczano jako średnią arytmetyczną z danego sygnału w analizowanym fragmencie próby. Przykład



Rys. 8. Przykład zarejestrowanego sygnału  $F_y$

zarejestrowanego sygnału  $F_y$  z pojedynczej próby przedstawiono na ilustracji rys. 8 (wartości  $F_y$  są nieprzeskalowanie, w voltach).

Rezultat prób drogowych, w postaci 23 punktów charakterystyki znoszenia bocznego, przedstawiono w tabeli 2 i na ilustracji rys. 9. W charakterystyce uzyskiwanej za pomocą przyczepy pomiarowej przyjęto, że siły boczne mają znak zgodny ze znakiem kąta znoszenia.

Niestety, niemożliwe było porównanie zmierzonej przyczepą charakterystyki badanego koła z charakterystyką podawaną dla takiego koła jako wzorcowa z powodu braku dostępności takowej. Jednakże charakterystyka bocznego znoszenia z eksperymentu drogowego, zarówno jakościowo, jak i ilościowo, wydaje się potwierdzać poprawność przyjętej, autorskiej metodologii wykonywania pomiarów.

Absolutne potwierdzenie prawidłowości wykonywania zaprezentowanych pomiarów postanowiono uzyskać, przeprowadzając badania symulacyjne, które możliwie wiernie odwzorowałyby parametry i warunki z badań drogowych. Do realizacji tego celu zdecydowano się wykorzystać zaawansowane oprogramowanie do analizy dynamiki układów wielomasowych MD ADAMS.

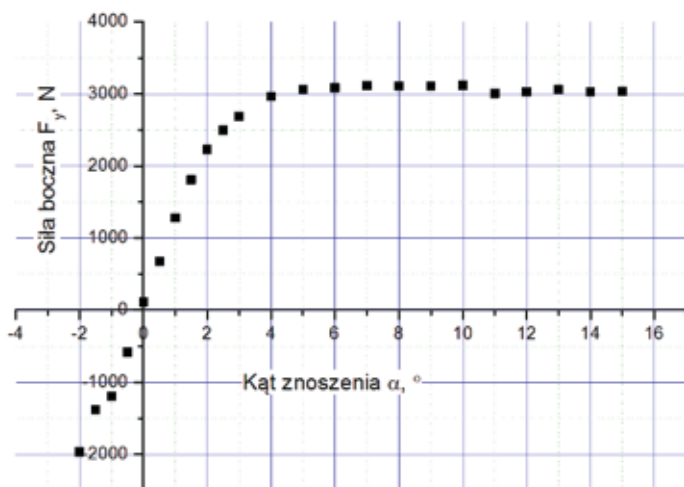
Tabela 2. Elementy charakterystyki znoszenia bocznego, lewego koła przyczepy

Kąt znoszenia $\alpha$ , °	Siła boczna $F_y$ , N
-2	-1967
-1,5	-1383



Tabela 2. cd.

-1	-1194
-0,5	-585
0	109
0,5	678
1	1278
1,5	1809
2	2229
2,5	2494
3	2688
4	2961
5	3062
6	3084
7	3118
8	3108
9	3105
10	3119
11	3005
12	3027
13	3064
14	3022
15	3033



Rys. 9. Charakterystyka znośności bocznej, lewego koła przyczepy

## 5. Model układu samochód – przyczepa

Model matematyczny zespołu pojazdów sformułowany został w celu określenia zakresu stosowalności przedstawionej w pracy metody badawczej.

Model tworzą: dwuosiowy samochód i jednoosiowa przyczepa połączone przegubowo (uwzględniono zjawisko tarcia w przegubie łączącym pojazdy). Przyjęto następujące założenia:

Założenia wspólne dla zespołu pojazdów:

- zespół pojazdów porusza się po poziomej nawierzchni,
- nawierzchnia ma jednorodny charakter przyczepności na całym odcinku przejazdu,
- wszystkie siły działające na pojazdy są skupione,
- wymuszenie kierunku toru ruchu zespołu pojazdów może być spowodowane przez: zmianę średniego kąta skrętu kół kierowanych samochodu, zmianę kąta skrętu koła (kół) przyczepy, zmianę kąta pochylenia koła (kół) przyczepy, obciążenie momentem zewnętrznym (hamującym) koła (kół) przyczepy.

Założenia dotyczące modelu samochodu:

- samochód modelowany jest za pomocą jednej, nieodkształcalnej bryły,
- nie uwzględnia się własności sprężystych i tłumiących zawieszenia,
- nie uwzględnia się własności sprężystych i tłumiących ogumienia,
- pomija się zjawiska przechyłu bocznego i wzdłużnego nadwozia,
- pomija się siły wzdłużne (napędzające i hamujące) w punkcie kontaktu kół z nawierzchnią drogi,
- utrzymywany jest stały kontakt kół ogumionych z drogą,
- dla opisu zjawiska znoszenia bocznego, w modelu samochodu wykorzystano liniowy model koła ogumionego,
- prędkość wzdłużna samochodu na całym odcinku przejazdu może być zmienna,
- wprowadza się tzw. nadwyżkową siłę napędową skupioną w środku masy samochodu; siła ta wymusza ruch i jednocześnie bilansuje siły oporu przyczepy.

Założenia dotyczące modelu przyczepy:

- przyczepa modelowana jest za pomocą trzech brył: jednej nieodkształcalnej bryły zastępującej wszystkie elementy nadwozia i podwozia i dwóch brył obrotowych zastępujących koła,
- w połączeniach pomiędzy bryłami umownymi nie występują żadne luzy,
- nie uwzględnia się własności sprężystych i tłumiących zawieszenia (przyczepa nie ma zawieszenia),
- uwzględnia się własności sprężyste i tłumiące ogumienia,
- brak elementów sprężystych i tłumiących w konstrukcji zawieszenia kół przyczepy pozwala przyjąć, że kąt przechyłu bocznego przyczepy jest pomijalnie mały i nie ma wpływu na kąt pochylenia kół,
- zjawisko przechyłu bocznego i wzdłużnego przyczepy wpływa jedynie na zmianę sił pionowych dociążających koła przyczepy,
- każde z kół przyczepy niezależnie od drugiego może być ustawione na wprost lub skręcone o stałą wartość na całym odcinku przejazdu,

- każde z kół przyczepy niezależnie od drugiego może być pochylone o stałą wartość na całym odcinku przejazdu,
- skręcenie któregokolwiek z kół przyczepy nie zmienia położenia punktu styku tego koła z drogą względem bryły przyczepy tylko na początku symulacji, gdy układ jest w stanie równowagi;
- każde z kół przyczepy niezależnie od drugiego może być hamowane,
- koła przyczepy mają po jednym stopniu swobody – obrót względem własnej osi,
- w modelu przyczepy może być wykorzystany dowolny model współpracy opony z nawierzchnią drogi.

Uwzględniając przedstawione założenia, wygenerowano model matematyczny o 8 stopniach swobody w celu badań dynamiki układu samochodów – przyczepa z wykorzystaniem oprogramowania MD ADAMS.

Model samochodu w programie MD ADAMS utworzono za pomocą elementu LINK. Geometrię samochodu (rozstaw osi, punkt zaczepu kulowego i środek masy) i jego masę przyjęto zgodnie ze stanem istniejącym dla samochodu Ford Transit. Moment bezwładności w ruchu obrotowym wokół osi pionowej obliczono dla przyjętego promienia bezwładności (1,5 m).

Przyczepę utworzono za pomocą elementu PLATE. Geometrię przyczepy (rozstaw kół, odległość osi od punktu zaczepu kulowego i środek masy) oraz jej masę przyjęto zgodnie ze stanem istniejącym. Momenty bezwładności w ruchu obrotowym wokół głównych osi obrotu wyznaczono podczas projektowania przyczepy z wykorzystaniem oprogramowania CAD.

Charakterystyczne punkty elementów LINK i PLATE odpowiadają typowym punktom modelu jak: miejsca kontaktu kół z podłożem czy też przegubowi łączącemu pojazdy.

Bryły kół przyczepy uzyskano wprowadzając zaimplementowany w bazie danych programu MD ADAMS model koła ogumionego [4]. Geometrię koła zdeterminował jego model. Masę koła przyjęto zgodnie ze stanem istniejącym. Momenty bezwładności koła wyznaczono podczas projektowania przyczepy z wykorzystaniem oprogramowania CAD.

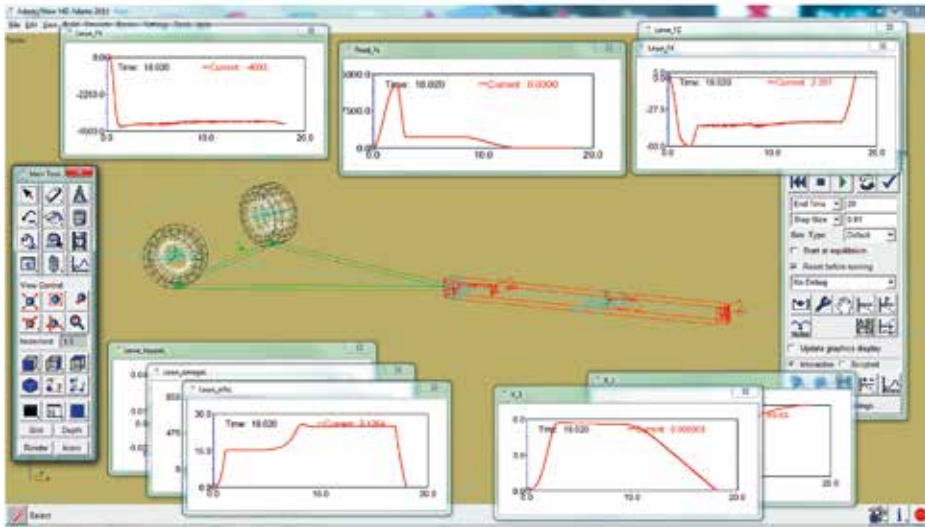
Wymaganą liczbę stopni swobody uzyskano wprowadzając elementy JOINT, czyli więzy, które ograniczyły ruch modelu do 8 stopni swobody.

Bryłę samochodu złączono z podłożem (GROUND) za pomocą więzu JOINT – PLANAR, ograniczając jej ruch do przemieszczeń wzdłużnych i poprzecznych oraz obrotu wokół osi pionowej, uzyskując 3 stopnie swobody w klasycznym ruchu płaskim.

Bryłę przyczepy połączono z bryłą samochodu za pomocą więzu JOINT – SPHERICAL, ograniczając jej ruch do obrotów wokół 3 osi, uzyskując kolejne 3 stopnie swobody w klasycznym ruchu kulistym (względem bryły samochodu).

Bryły kół połączono z bryłą przyczepy za pomocą więzów JOINT – REVOLUTE, ograniczając ich ruch do ruchu obrotowego wokół własnej osi i uzyskano kolejne 2 stopnie swobody.

Widok modelu w oknie programu MD ADAMS przedstawiony został na ilustracji rys. 10.



Rys. 10. Widok modelu w oknie programu MD ADAMS

Siły boczne w interakcji kół samochodu z podłożem opisano z wykorzystaniem jednokierunkowych elementów FORCE. W punktach miejsca styku kół samochodu z nawierzchnią wprowadzono dodatkowe elementy typu: MARKER, czyli lokalne układy współrzędnych związane z bryłą samochodu. Orientacja tych elementów (MARKER) względem samochodu definiuje w prosty i jednoznaczny sposób skręcenie kół. Natomiast chwilowe prędkości tych MARKERów w kierunkach x i y odpowiadają prędkościom wzdłużnej i poprzecznej danego koła, umożliwiając obliczanie chwilowych wartości kątów znoszenia bocznego. Wartości sił bocznych kół samochodu zdefiniowano jako liniowo zmienne w funkcji kąta znoszenia koła, w którym dana siła działa. Natomiast kierunek siły bocznej określa kierunek prędkości poprzecznej danego koła.

Kontakt kół przyczepy z drogą zamodelowano wykorzystując model koła „pac 2002\_235\_60R16” z bazy danych programu MD ADAMS. Przyjęto ten model ponieważ jest najbardziej zbliżony średnicą do rzeczywistych kół przyczepy (różnica wynosi 13 mm czyli 2%). Jest to nieliniowy model koła ogumionego opracowany w 2002 r. przez zespół prof. Pacejki. Model ten znany jest powszechnie jako „Magic Formula”. Przyjęty do badań model koła uwzględnia m.in. zjawisko nabiegania kół ogumionych oraz złożone warunki poślizgów (wartości maksymalnych sił bocznych i wzdłużnych wzajemnie się ograniczają) [4, 8, 9].

Chwilowe wartości kątów znoszenia są zdefiniowane w modelu koła i nie wymagają określania podczas budowy nadrzędnego modelu układu dynamicznego. Nie trzeba także definiować chwilowych wartości sił bocznych. Oczywiście model koła udostępnia również pozostałe wielkości charakteryzujące koło ogumione, ale nie są one przedmiotem niniejszej pracy.

Z bazy danych programu MD ADAMS wybrano także model nawierzchni drogowej z losowo określonym profilem nierówności. Przyjęto nawierzchnię „średniej” jakości (w klasie „C”, zgodnie z normą ISO\_8608). Współczynnik korelacji pomiędzy kołem prawym i lewym przyjęto równy 0,6 [4].

## 6. Wyniki badań symulacyjnych

Założono, że prędkość samochodu podczas przejazdu odcinka pomiarowego również powinna wynosić około 20 km/h (5,56 m/s). W tym celu, podczas wstępnych badań wprowadzono do modelu siłę napędową (jednokierunkowy element FORCE) skupioną w środku masy samochodu i skierowaną zgodnie z jego osią wzdłużną.

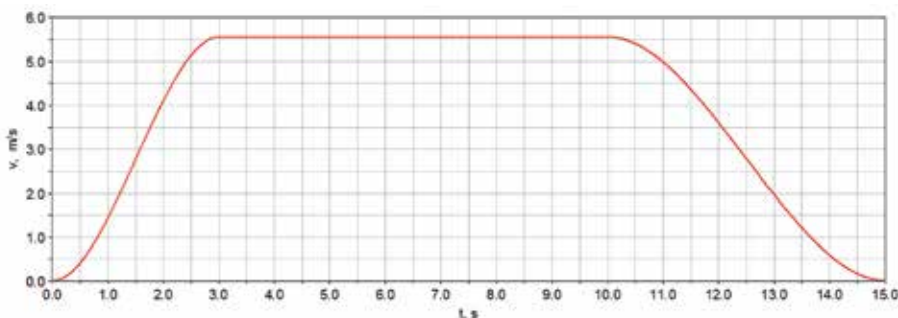
Próbowano następnie określić postać sygnału siły napędowej gwarantującego utrzymanie założonej prędkości na odcinku pomiarowym. Było to możliwe dla pojedynczego pomiaru, ale niestety każdorazowa zmiana kąta skręcenia kół przyczepy wymuszała zmianę („przeprogramowanie”) postaci sygnału siły napędowej. Działo się to na skutek wzrostu lub spadku oporów skrętu przyczepy. Prawidłowe sterowanie modelu samochód – przyczepa z wykorzystaniem siły napędowej wymagałoby więc opracowania i zastosowania złożonego modelu napędu – swoistego „tempomatu”. Zaniechano tego, stosując odmienny, uproszczony sposób sterowania badanym układem.

Wprowadzono do modelu zdeterminowany sygnał prędkości wzdłużnej samochodu. Postać tego sygnału prędkości przedstawiona została na ilustracji rys. 11.

Kinematyczne wymuszenie ruchu zmniejszyło liczbę stopni swobody układu do 7.

Podczas badań symulacyjnych przeprowadzono również 23 próby, jak w eksperymencie drogowym. Obliczano siły boczne znoszenia dla takich samych wartości kąta skręcenia kół przyczepy ( $\alpha = -2^\circ \dots +15^\circ$ ). Oba koła nie były pochylane ( $\gamma = 0$ ). Statyczne obciążenie obu kół było równe ( $F_z = 3990$  N).

Czas każdej symulacji był równy 15 s, przy czym do analizy sygnałów przyjmowany był jedynie fragment prób od 3 do 10 s, czyli czas, w którym prędkość przejazdu była ustalona (rys. 11).



Rys. 11. Sygnał prędkości wzdłużnej samochodu

Na rysunku 12 przedstawione zostały obliczone sygnały kąta znoszenia (z prób dla  $\alpha$  od  $-2^\circ$  do  $+8^\circ$ ). Z postaci tych charakterystyk widać, że podczas czasu obserwacji (od 3 do 10 s) wartość kąta znoszenia pozostaje stała i jest równa zadanej wartości kąta skręcenia kół przyczepy. Jedynie podczas próby z kołami skręconymi o  $+8^\circ$  w końcowym odcinku obserwacji widać nieznaczny spadek wartości kąta znoszenia.

Na rysunku 13 przedstawiono sygnały siły bocznej obliczone podczas tych prób. W programie MD ADAMS siły boczne mają przeciwny znak od kąta znoszenia. Wszystkie sygnały siły bocznej obliczone w czasie obserwacji mają postać pozwalającą przyjąć założenie, że wartość pojedynczego punktu charakterystyki można obliczyć jako średnią arytmetyczną.

Sygnały siły wyznaczone z pomiarów dla kątów skręcenia  $+6^\circ$ ,  $+7^\circ$  i  $+8^\circ$  mają zbliżone wartości (około 4000 N), ich różnica nie przekracza 250 N. Oznacza to wejście charakterystyki siły bocznej w obszar saturacji to znaczy, że dla tych kątów w charakterystyce znoszenia zaczynają przeważać zjawiska poślizgów rzeczywistych w przeciwieństwie do pomiarów dla kątów skręcenia od  $-2^\circ$ , do  $+5^\circ$ , gdzie dominują poślizgi odkształceniowe.

Na rysunku 14 przedstawione zostały sygnały kąta znoszenia (z prób dla  $\alpha$  od  $+9^\circ$  do  $+15^\circ$ ). Z postaci tych charakterystyk widać, że w założonym czasie obserwacji wartość kąta znoszenia zmienia się i nie jest równa kątowi skręcenia, czyli ruch przyczepy nie jest prostoliniowy (co potwierdziła obserwacja innych sygnałów modelu). Jednak, pokazane na rysunku 15 wszystkie sygnały siły bocznej, które zostały zarejestrowane podczas tych prób różnią się nieznacznie. Różnica ich wartości nie przekracza 150 N na początku okresu obserwacji i 300 N na końcu obserwacji. Oznacza to niewielki wpływ zmiany kąta znoszenia na zmianę wartości siły bocznej, czyli można wnioskować, że dla kątów od  $+9^\circ$  do  $+15^\circ$  w charakterystyce znoszenia występują wyłącznie zjawiska rzeczywistych poślizgów.

Dlatego również w tym przypadku przyjęto założenie, że wartość punktu charakterystyki znoszenia można obliczyć jako średnią arytmetyczną sygnału siły bocznej w czasie obserwacji.

Podczas wszystkich symulacji (rys. 12, rys. 13, rys. 14 i rys. 15) zauważono, że pomimo każdorazowego osiągnięcia przez kąt znoszenia wartości zero stopni w 15 s próby, wartość siły bocznej nie osiąga wartości zero. Powodem tego jest użyty model koła, który uwzględnia zjawisko nabiegania. Na końcu każdej próby koła przyczepy zatrzymują się, ale pozostają sprężyste odkształcone, generując układ dwóch sił bocznych wzajemnie się równoważących. Zjawisko niezerowania siły bocznej, mimo zatrzymania przyczepy, obserwowano także podczas badań drogowych (rys. 8).

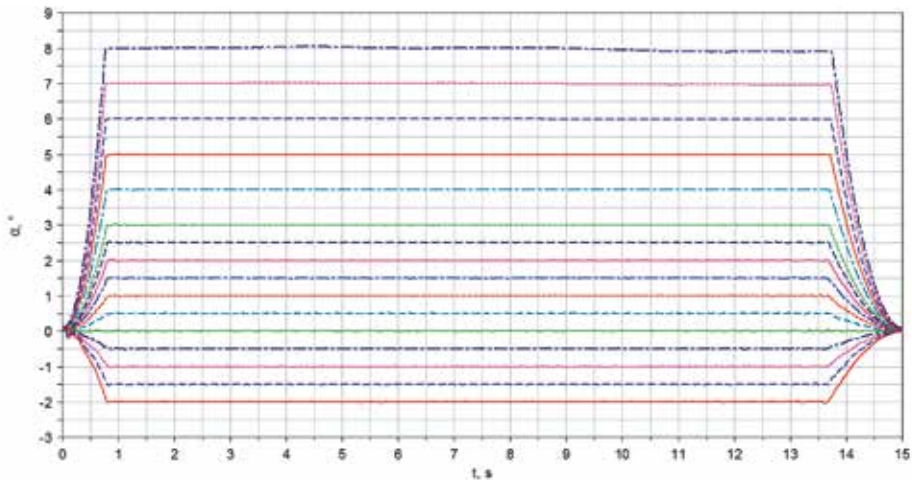
W wyniku działań wykonanych podczas badań symulacyjnych uzyskano charakterystykę znoszenia bocznego lewego koła modelu ( $F_y = f(\alpha)$ ).

Wartość wszystkich punktów charakterystyki dla określonych argumentów kąta znoszenia  $\alpha$ , obliczono jako średnią arytmetyczną z danego sygnału siły bocznej w analizowanym przedziale czasu.

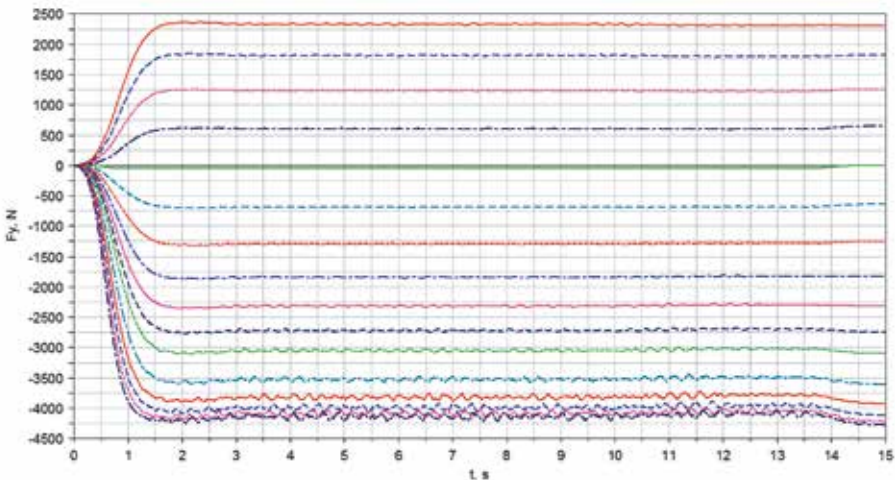
Wyniki badań symulacyjnych w postaci 23 punktów charakterystyki bocznego znoszenia koła przyczepy, przedstawiono w tabeli 3 i na ilustracji rys. 16.

Na rysunku 16 przedstawiono jednocześnie charakterystykę będącą wynikiem opisanych badań symulacyjnych w postaci dyskretnej i jako wzorcową, oznaczoną czerwoną linią, charakterystykę użytego modelu koła „pac2002\_235\_60R16”. Charakterystyka wzorcowa, została wyliczona dla ustalonych uprzednio parametrów koła ( $\gamma = 0$ ,  $F_z = 3990$  N).

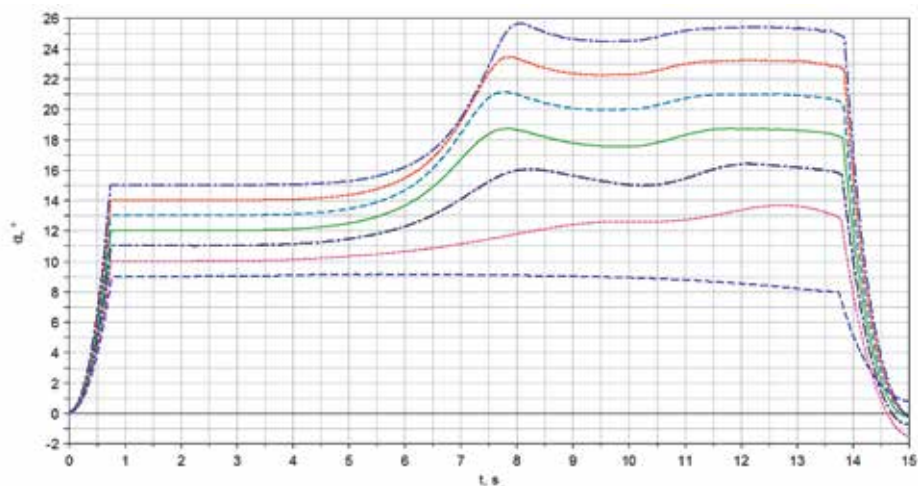
Na rysunku 16 widać, że jedynie 5 ostatnich ( $\alpha$  od  $+11^\circ$  do  $+15^\circ$ ) punktów wyznaczonej charakterystyki nieznacznie odbiega od wzorca. Są to różnice około 50 N przy wartości rzędu 4000 N. () Przyczyną tego może być niewłaściwie dobrany czas obserwacji zjawiska, gdyż wówczas przyczepa zmieniała kierunek i kąt znoszenia znacznie różnił się od kąta skręcenia kół.



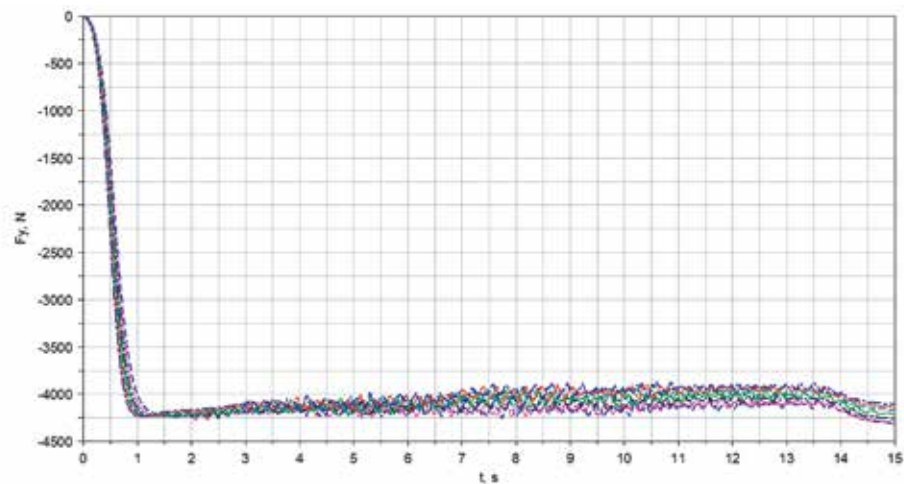
Rys. 12. Sygnały kąta znoszenia (dla  $\alpha$  od  $-2^\circ$  do  $+8^\circ$ )



Rys. 13. Sygnały siły bocznej (dla  $\alpha$  od  $-2^\circ$  do  $+8^\circ$ )



Rys. 14. Sygnały kąta znoszenia (dla  $\alpha$  od  $+9^\circ$  do  $+15^\circ$ )



Rys. 15. Sygnały siły bocznej (dla  $\alpha$  od  $+9^\circ$  do  $+15^\circ$ )

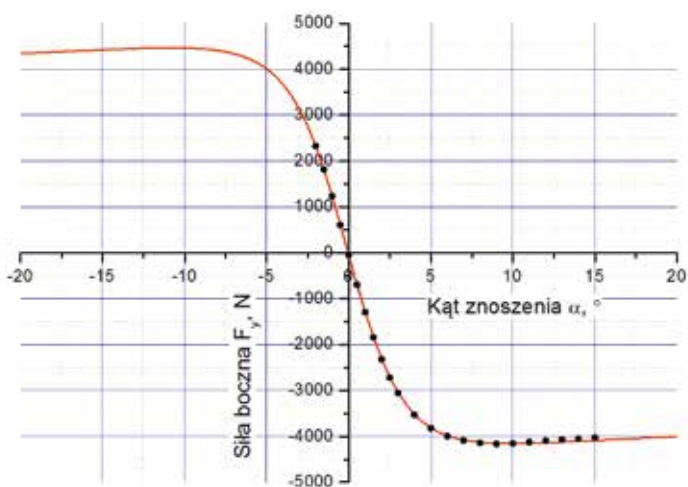
Tabela 3. Punkty charakterystyki znoszenia boczno, lewego koła modelu przyczepy

Kąt znoszenia $\alpha$ , °	Siła boczna $F_y$ , N
-2	2327
-1,5	1813
-1	1232
-0,5	603
0	-48



Tabela 3. cd.

0,5	-690
1	-1295
1,5	-1842
2	-2319
2,5	-2721
3	-3052
4	-3529
5	-3822
6	-3994
7	-4090
8	-4141
9	-4162
10	-4157
11	-4125
12	-4096
13	-4070
14	-4050
15	-4031



Rys. 16. Charakterystyka znośnienia boczno, lewego koła modelu przycyepy

## 7. Podsumowanie

Ze względu na różnicę profilu opony użytej podczas symulacji w odniesieniu do opony z badań drogowych, nie przeprowadzono szczegółowego ilościowego i jakościowego porównania wyników symulacji i eksperymentu drogowego.

Przeprowadzone analizy potwierdziły natomiast słuszność przyjętej metodologii wyznaczania charakterystyk kół ogumionych za pomocą przyczepy dynamometrycznej zbudowanej wg projektu autorów.

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych uzyskano charakterystykę bocznego znoszenia zadawalająco zgodną z wzorcową charakterystyką użytego podczas symulacji modelu koła. **Daje to podstawy do przyjęcia występowania identycznych relacji w przypadku badań drogowych.**

Warunkiem poprawności wykonywanych pomiarów jest zachowanie prostoliniowego ruchu przyczepy tak, aby wartość kąta znoszenia pozostawała niezmienna i była równa zadanej wartości kąta skręcenia kół przyczepy.

W przypadku małych kątów znoszenia, zależy to wyłącznie od stateczności układu samochodu – przyczepa, którą zapewniają poprawnie dobrane parametry konstrukcyjne urządzenia.

W przypadku dużych kątów znoszenia należałoby wspomóc system pomiarowy urządzeniem stabilizującym przyczepę. Najprościej wprowadzając mechanizm blokujący możliwość skręcania przyczepy.

Podczas pomiarów dla dużych kątów znoszenia należy także ściśle kontrolować wartość tego kąta i zawęzać czas obserwacji wyłącznie do okresu, kiedy kąt znoszenia jest równy kątowi skręcenia.

Planowane jest prowadzenie kolejnych badań symulacyjnych dla różnych modeli kół i nawierzchni. Przeprowadzone zostaną także symulacje z różnymi prędkościami jazdy i z użyciem dodatkowych systemów stabilizujących.

Niniejszą pracę wykonano w ramach projektu:

*„INWENCJA – Potencjał młodych naukowców oraz transfer wiedzy i innowacji wsparciem dla kluczowych dziedzin świętokrzyskiej gospodarki”* współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Program MD ADAMS zakupiono w ramach projektu:

*„LABIN – Wsparcie aparaturowe innowacyjnych laboratoriów naukowo-badawczych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach”* współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego

## LITERATURA

- [1] FUNDOWICZ P.: *Wyznaczanie charakterystyk bocznego znoszenia pojazdu*, Politechnika Warszawska, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów nr 3(33)/99, Warszawa 1999.
- [2] GIDLEWSKI M., LUTY W.: *Badanie ogumienia samochodu ciężarowego w warunkach dynamicznego hamowania podczas toczenia ze znoszeniem bocznym*, Politechnika Świętokrzyska, Zeszyty Naukowe seria Mechanika nr 79, Kielce 2004.
- [3] HAKANEN J., KÄHÄRÄ T.: *Tyre Characterisation on Ice and Snow with a Measurement Vehicle*, 2nd International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction „FRICTION POTENTIAL AND SAFETY: PREDICTION OF HANDLING BEHAVIOR” – Florence February 23rd 2001, BRITE EURAM PROJECT BRPR – CT97 – 0461
- [4] *Learning Adams/Tire, Using the PAC2002Tire Model*, MD Adams 2011@
- [5] LUTY W., PROCHOWSKI L.: *Analiza prędkości kątowej koła samochodu ciężarowego podczas hamowania z udziałem siły bocznej i układu ABS*, Politechnika Świętokrzyska, Zeszyty Naukowe seria Nauki Techniczne – Budowa i Eksploatacja Maszyn nr 8, Kielce 2008.
- [6] LUTY W., PROCHOWSKI L.: *Analiza procesu narastania siły hamowania koła samochodu ciężarowego*, Politechnika Warszawska, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów nr 1(40)/2001, Warszawa 2001.
- [7] NORDSTRÖM O., ÅSTRÖM H.: *Upgrading of VTI friction test vehicle BV12 for combined braking and steering tests under aquaplaning and winter conditions*, 2nd International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction „FRICTION POTENTIAL AND SAFETY: PREDICTION OF HANDLING BEHAVIOR” – Florence February 23rd 2001, BRITE EURAM PROJECT BRPR – CT97 – 0461
- [8] PACEJKA H.B.: *Tyre and Vehicle Dynamics*, Elsevier Butterworth–Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 200 Wheeler Road, Burlington, MA 01803, First published 2002, Reprinted 2004.
- [9] PACEJKA H.B., BESSELINK I.J.M.: *Magic Formula Tyre Model with Transient Properties*, Vehicle System Dynamics Supplement 27 (1997), © Swets & Zeitlinger, s. 234–249
- [10] REŃSKI A., SAR H.: *Wyznaczanie dynamicznych charakterystyk bocznego znoszenia opon na podstawie badań drogowych*, Politechnika Warszawska, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów nr 4(67)/2007, Warszawa 2007.
- [11] SCHMEITZ A.J.C., JANSEN S.T.H., TEZUKA Y., HASEGAWA M., MIYAGISHI S.: *Application of the rigid ring model for simulating the dynamics of motorcycle tyres on uneven roads*, Proceedings, Bicycle and Motorcycle Dynamics 2010 Symposium on the Dynamics and Control of Single Track Vehicles, 20 – 22 October 2010, Delft, The Netherlands
- [12] STAŃCZYK T.L., STRACHOWSKI P.: *Analiza dynamiki i budowa przyczepy pomiarowej dla identyfikacji parametrów kół ogumionych w rzeczywistych warunkach ruchu*, Sprawozdanie z projektu badawczego własnego nr: 4 T12C 016 30, Kielce 2010 – praca niepublikowana
- [13] STRACHOWSKI P.: *Badania stateczności modelu przyczepy pomiarowej*, Politechnika Świętokrzyska, Zeszyty Naukowe seria Mechanika nr 84, Kielce 2006.
- [14] STRACHOWSKI P.: *Wykorzystanie oprogramowania MSC.Software MD Adams w projektowaniu przyczepy dynamometrycznej*, Konferencja Użytkowników Oprogramowania MSC.Software oraz Simufact, Kraków 2012 – prezentacja multimedialna
- [15] WOHANKA U.: *Ermittlung von Reifenkennfeldern auf definiert angenässten Fahrbahnen*, Expert Verlag, 2002.

