

BADANIA SYMULACYJNE WŁASNOŚCI JEZDNYCH NIEOBCIĄŻONEGO SAMOCHODU CIĘŻAROWEGO ŚREDNIEJ ŁADOWNOŚCI

W ramach Projektu badawczego własnego N N509 568439 wykonano rozległe prace naukowo badawcze dotyczące problematyki automatycznego kierowania samochodem w sytuacjach zagrażających wypadkiem drogowym z powodu nagle pojawiającej się przeszkody. W badaniach symulacyjnych jako wirtualny obiekt sterowania wykorzystano autorski, rozbudowany (wielomasowy, 3D, nieliniowy) model samochodu ciężarowego średniej ładowności, gruntownie zweryfikowany w badaniach drogowych i stanowiskowych. Opracowanie sterownika aktywnego układu kierowniczego wymagało przeprowadzenia szeregu badań obiektu sterowania w układzie otwartym w różnych warunkach drogowych i eksploatacyjnych. Badania te pozwoliły ustalić scenariusze utraty stateczności oraz określić wartości krytyczne parametrów ruchu, przy których występowała niestateczność pojazdu. Artykuł przedstawia część wyników badań dotyczących samochodu nieobciążonego. Wyniki badań zwracają uwagę na złożone własności jezdne obiektu badań.

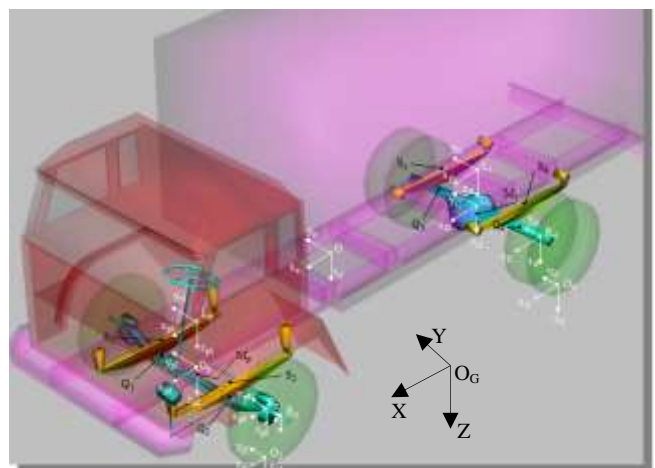
WSTĘP

W ramach Projektu badawczego własnego N N509 568439 pt.: „Analiza możliwości wykorzystania elektrycznego układu kierowniczego do poprawy własności jezdnych samochodu ciężarowego w krytycznych sytuacjach drogowych” wykonano rozległe prace analityczne nad zastosowaniem aktywnego układu kierowniczego EPS (Electrically Powered Steering) w automatycznym kierowaniu samochodem (dwuosioowy samochód ciężarowy średniej ładowności wyposażony w typowe elementy systemu ESC - Electronic Stability Control oraz detektory przeszkód i układy monitorujące drogę) podczas nagle pojawiającej się przeszkody. Prace te były częściowo relacjonowane we wcześniejszych publikacjach [2-6]. Opracowanie koncepcji sterowania i projektowanie regulatorów poprzedzono badaniami symulacyjnymi w układzie otwartym własności jezdnych obiektu sterowania w krytycznych sytuacjach drogowych. W badaniach wykorzystano rozbudowany (wielomasowy, przestrzenny i nieliniowy) model samochodu ciężarowego. Badania pozwoliły na ustalenie scenariuszy utraty stateczności oraz wyznaczenie wartości krytycznych parametrów ruchu, przy których występowała niestateczność ruchu pojazdu w różnych warunkach drogowych i eksploatacyjnych. Wyniki badań symulacyjnych uznano za wiarygodne i możliwe do wykorzystania w czasie automatycznego kierowania samochodem, gdyż badany model pojazdu został wcześniej gruntownie zweryfikowany eksperymentalnie w badaniach stanowiskowych i drogowych.

W artykule opisano obiekt i warunki badań oraz przedstawiono wyniki badań pokazujących własności jezdne samochodu nieobciążonego. Tak obciążony samochód okazał się najbardziej wrażliwy na utratę stateczności kierunkowej w czasie wykonywania różnych manewrów jezdnych w warunkach granicznych. Wyniki badań samochodu nieobciążonego nakazywały zastosowanie, w takim przypadku, szczególnych zabezpieczeń w trakcie przygotowywania i realizacji manewru automatycznej zmiany pasa ruchu w warunkach granicznych z wykorzystaniem „elektrycznej” kierownicy.

1. OBIEKT I WARUNKI BADAŃ

W badaniach modelowych własności jezdnych samochodu nieobciążonego w układzie otwartym wykorzystano własny, opracowany wcześniej i dostosowany do aktualnych potrzeb, model samochodu ciężarowego [1,2,5]. Jest to wielomasowy, przestrzenny i nieliniowy, posiadający dwadzieścia stopni swobody model dwuosioowego samochodu ciężarowego średniej ładowności, zbudowany na podstawie badań i obserwacji obiektu rzeczywistego (STAR 1142). Model pojazdu uwzględnia: mechanikę układu kierowniczego, mechanikę układu hamulcowego, mechanikę zawiesznień oraz mechanikę współpracy kół ogumionych z nawierzchnią jezdni (rys. 1). Do opisu współpracy kół pojazdu z nawierzchnią jezdni wykorzystano model koła ogumionego zaproponowany przez Dugoffa, Fenchera, Segela, uzupełniony o wytyczne wynikające z prac prowadzonych w Brunshwiku pod kierunkiem profesora M. Mitschke. Istotną zaletą zastosowanego modelu opony jest to, że mimo stosunkowo prostego zapisu matematycznego, pozwala na łatwe wprowadzanie różnych wartości parametrów drogowych i eksploatacyjnych samochodu (współczynnik przyczepności, prędkość ruchu, obciążenia promieniowe) oraz umożliwia symulację ruchu pojazdu w stanie pełnego poślizgu.



Rys. 1. Idea modelu samochodu ciężarowego

Znamienną cechą opracowanego modelu pojazdu jest fakt, że przeszedł on bardzo szeroką i gruntowną weryfikację eksperymentalną w czasie badań drogowych i stanowiskowych. Badania drogowe prowadzono w stanach ustalonych (jazda po okręgu) i nieustalonych (szybki obrót kołem kierownicy w czasie jazdy na wprost, hamowanie w czasie jazdy na wprost lub po łuku wybranych lub wszystkich kątów jezdnych). W czasie badań mierzono przebiegi kilkudziesięciu wielkości opisujących parametry ruchu poszczególnych mas pojazdu. W celu wyznaczenia wartości parametrów modelu koła ogumionego przeprowadzono gruntowne badania eksperymentalne charakterystyk dynamicznych opon samochodu wykorzystujące stanowisko bębnowe i przyczepkę dynamometryczną. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i wyników, przeprowadzonych w tych samych warunkach ruchu, badań modelowych pozwoliło na uściślenie wartości niepewnych parametrów modelu samochodu. Uzyskana w rezultacie bardzo dobra zgodność wyników obliczeń z wynikami badań eksperymentalnych [1] pozwoliła stwierdzić, że opracowany model pojazdu dobrze opisuje własności samochodu w ustalonych i nieustalonych warunkach ruchu. Może być więc wykorzystywany do symulacji ruchu pojazdu w różnych warunkach drogowych i eksploatacyjnych przy wykonywaniu złożonych manewrów jezdnych, także z automatycznym sterowaniem.

Badania symulacyjne własności jezdnych pojazdu w układzie otwartym prowadzono dla (testy zalecane przez ISO):

- ustalonej jazdy po okręgu o stałym promieniu,
- szybkiego obrotu kołem kierownicy w czasie jazdy na wprost o zadany kąt i przytrzymania go w tej pozycji,
- dwustronnego szarpnięcia koła kierownicy o zadany kąt i zadany czas przytrzymania.

Doprowadzając pojazd do utraty stateczności (pełny poślizg boczny „z zarzucaniem” lub przewrócenie pojazdu), w badaniach prowadzonych warunkach ustalonych, zwiększano prędkość ruchu samochodu w czasie jednej próby, natomiast w badaniach prowadzonych w warunkach nieustalonych w kolejnych próbach zwiększano wartość kąta obrotu koła kierownicy przy zachowaniu stałej prędkości ruchu samochodu.

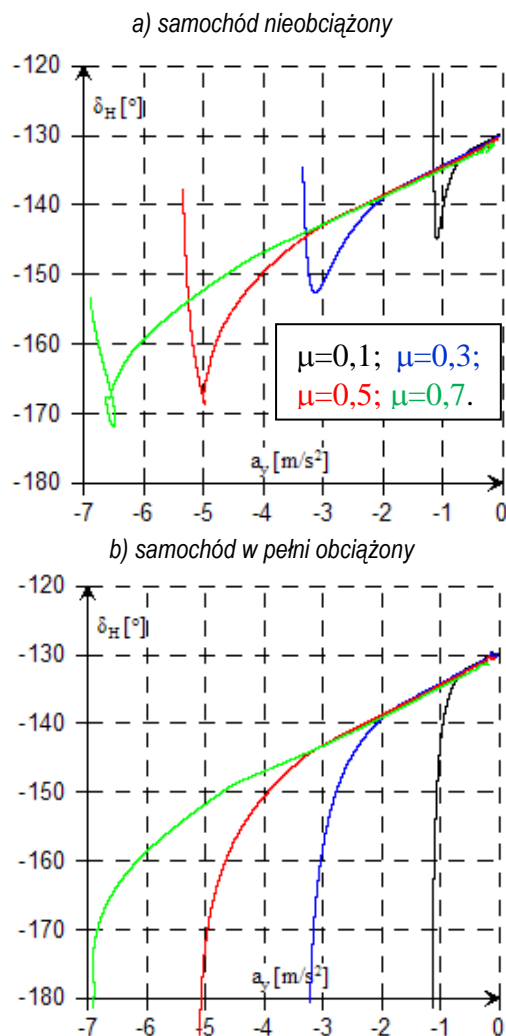
W badaniach uwzględniono siedem rodzajów nawierzchni (współczynnik przyczepności poślizgowej $\mu=0,1 \div 0,7$) oraz różne prędkości jazdy samochodu.

2. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

2.1. Ustalona jazda po okręgu o stałym promieniu

Na rys. 2 pokazano charakterystyki sterowności samochodu ciężarowego dla dwóch wariantów obciążenia pojazdu i dla czterech rodzajów nawierzchni ($\mu=0,1; 0,3; 0,5$ i $0,7$) uzyskane w czasie jazdy po okręgu o stałym promieniu. Z wykresów wynika, że niezależnie od stanu obciążenia pojazdu i rodzaju nawierzchni we wszystkich przypadkach dla małych przyspieszeń bocznych samochód ciężarowy wykazywał własności podsterowne. Wraz ze wzrostem przyspieszenia bocznego, przy zbliżaniu się do wartości granicznej dla danej nawierzchni jezdni, samochód nieobciążony gwałtownie zmieniał charakterystykę na nadsterowną. Samochód w pełni obciążony zachowywał natomiast charakterystykę podsterowną w całym zakresie przyspieszeń bocznych, przy czym jego podsterowność gwałtownie rosła wraz ze zbliżaniem do granicznej wartości przyspieszenia bocznego dla danej nawierzchni.

W samochodzie nieobciążonym utrata stateczności kierunkowej występowała w wyniku utraty przyczepności kół osi tylnej na każdym rodzaju nawierzchni. Fakt ten prognozuje trudności w automatycznym kierowaniu samochodem nieobciążonym w warunkach granicznych.

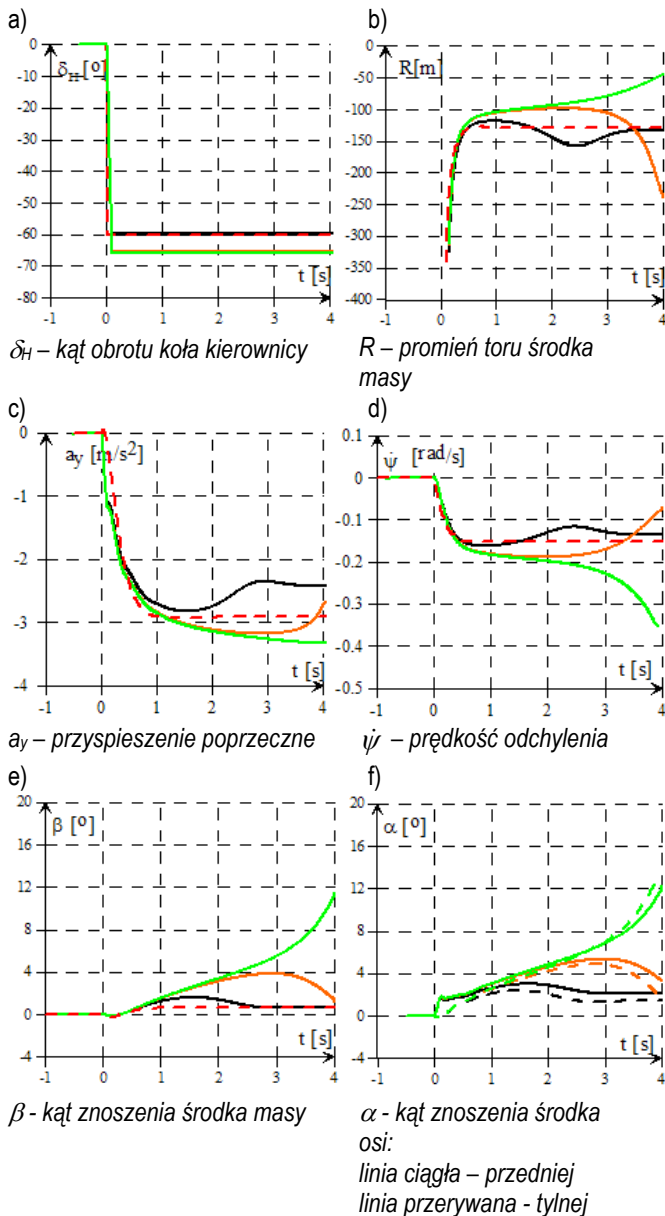


Rys. 2. Ustalona jazda w lewo po okręgu o stałym promieniu. Charakterystyka sterowności samochodu ciężarowego na nawierzchniach drogowych różniących się wartością współczynnika przyczepności poślizgowej μ (δ_H – kąt obrotu koła kierownicy, a_y – przyspieszenie poprzeczne)

2.2. Szybki obrót kołem kierownicy w czasie jazdy na wprost

Badania polegały na rozpędzeniu samochodu do zadanej prędkości w czasie jazdy na wprost, wyłączeniu napędu, szybkim obrocie koła kierownicy ($600^\circ/s$) o kąt δ_{H0} i przytrzymaniu kierownicy w tej pozycji. Wartość kąta obrotu koła kierownicy δ_{H0} wyznaczano wykorzystując model „rowerowy” samochodu zakładając, że ruch modelu w warunkach ustalonych po takim wymuszeniu będzie odbywał się z granicznym przyspieszeniem bocznym. Uwzględniano przy tym rodzaj nawierzchni drogi oraz prędkość jazdy pojazdu. W kolejnych próbach zwiększano kąt obrotu koła kierownicy nie zmieniając innych danych wejściowych, w celu doprowadzenia do utraty stateczności samochodu.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych samochodu nieobciążonego poruszającego się z prędkością $V=70\text{km/h}$ na mokrej drodze ($\mu=0,3$). Na wykresach linie przerywane koloru czerwonego pokazują odpowiedzi modelu „rowerowego”, a linie koloru czarnego odpowiedzi samochodu na szybki obrót koła kierownicy o kąt δ_{H0} . Linie koloru pomarańczowego to odpowiedzi samochodu na szybki obrót koła kierownicy kąt $\delta_H = 1,08\delta_{H0}$ opisujące ruch pojazdu w warunkach granicznych. Linie zielone opisują ruch niestateczny ruch samochodu wywołany skrętem koła kierownicy o kąt $\delta_H = 1,1\delta_{H0}$.



Rys. 3. Szybki obrót kołem kierownicy w lewo w czasie jazdy na wprost; prędkość jazdy $V=70\text{km/h}$; $\mu=0,3$

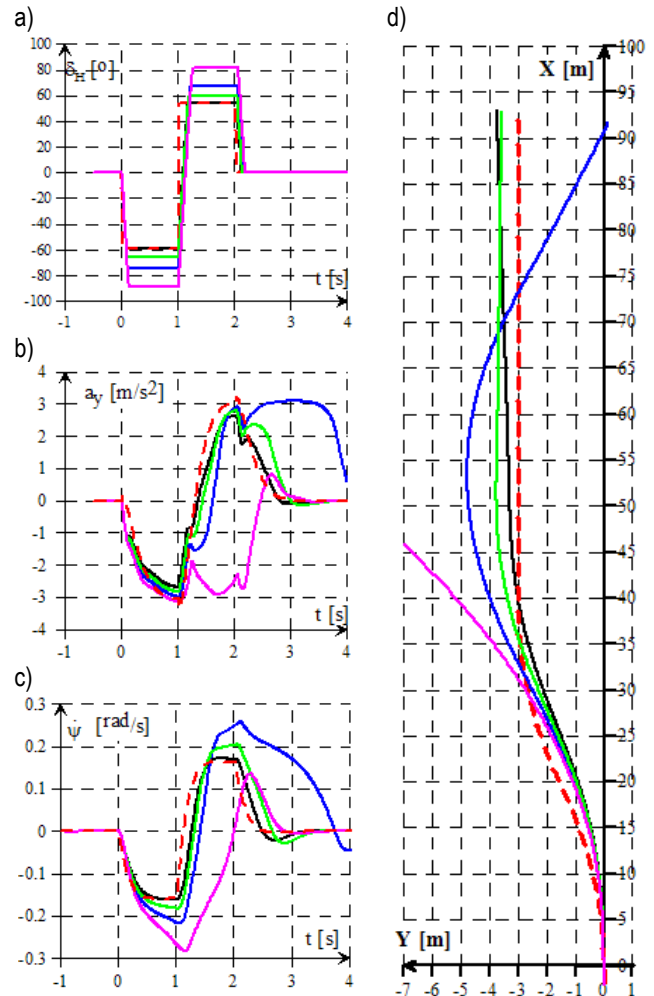
Przedstawione na rys. 3 przebiegi kilku wielkości charakteryzujących ruch samochodu po szybkim obrocie koła kierownicy w czasie jazdy na wprost pokazują bardzo dużą wrażliwość samochodu nieobciążonego na zwiększanie wartości kąta obrotu koła kierownicy, skutkujące utratą stateczności kierunkowej.

2.3. Dwustronny szybki obrót kołem kierownicy w czasie jazdy na wprost

Badania dla dwustronnego szybkiego obrotu kołem kierownicy w czasie jazdy na wprost przebiegały wg następującej procedury:

- rozpędzenie samochodu do zadanej prędkości jazdy V w czasie jazdy na wprost, a następnie wyłączeniu napędu,
- szybki obrót koła kierownicy ($600^\circ/\text{s}$) o kąt δ_{H0} w lewą stronę, przytrzymaniu kierownicy w tej pozycji do czasu $t_1=T$,
- szybki obrót koła kierownicy ($600^\circ/\text{s}$) o kąt $2\delta_{H0}$ w prawą stronę, przytrzymaniu go w tej pozycji do czasu $t_2=2T$,
- szybki obrót koła kierownicy ($600^\circ/\text{s}$) o kąt δ_{H0} w lewą stronę i przytrzymanie go w tej pozycji, co było równoznaczne z ustaniem kół kierowanych do jazdy na wprost.

Wartość kąta obrotu koła kierownicy δ_{H0} wyznaczano w taki sam sposób jak poprzedniej próbie, natomiast długość czasu T obliczano wykorzystując model „rowerowy” samochodu i zakładając, że w wyniku środek masy modelu „rowerowego” pojazdu przemieści się poprzecznie o 3m , czyli model pojazdu zmieni pas ruchu. Uwzględniano przy tym rodzaj nawierzchni drogi oraz prędkość jazdy. W kolejnych próbach zwiększano kąt obrotu koła kierownicy nie zmieniając długości czasu T i innych danych wejściowych, w celu doprowadzenia do utraty stateczności przez samochód.

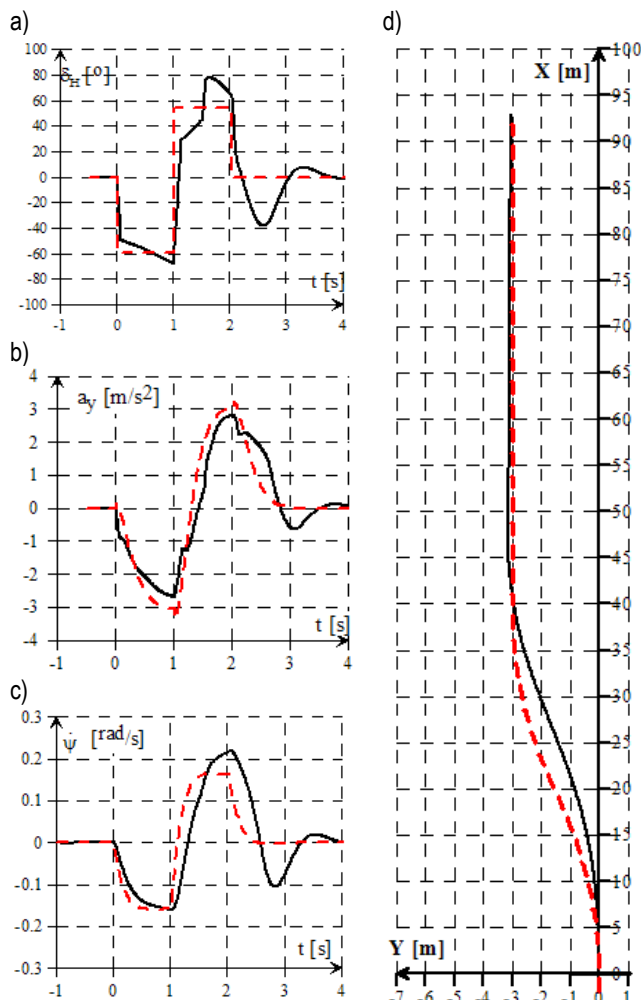


Rys. 4. Dwustronny szybki obrót koła kierownicy w czasie jazdy na wprost; $V=70\text{km/h}$; $\mu=0,3$

Na rys. 4 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych samochodu nieobciążonego poruszającego się z prędkością $V=70\text{km/h}$ na mokrej drodze ($\mu=0,3$). Na wykresach linie przerywane koloru czerwonego pokazują odpowiedzi modelu „rowerowego”, a linie koloru czarnego odpowiedzi samochodu na dwustronny szybki obrót koła kierownicy o amplitudzie δ_{H0} . Linie koloru zielonego odpowiadają skręceniu koła kierownicy o kąt $\delta_H = 1,1\delta_{H0}$, które w przypadku wcześniejszego opisywanego manewru powodował utratę stateczności kierunkowej przez samochód. Linie koloru niebieskiego odpowiadają skręceniu koła kierownicy o kąt $\delta_H = 1,25\delta_{H0}$ powodujący utratę stateczności kierunkowej samochodu, ale dopiero w czasie obrotu koła kierownicy w prawo. Linie koloru fioletowego odpowiadają skręceniu koła kierownicy o kąt $\delta_H = 1,5\delta_{H0}$ powodujący utratę stateczności kierunkowej samochodu już w czasie obrotu koła kierownicy w lewo.

Wyniki badań w tym teście potwierdzają wyraźną skłonność do utraty stateczności kierunkowej samochodu nieobciążonego na skutek zbyt dużej amplitudy kąta obrotu koła kierownicy.

Duża wrażliwość na utratę stateczności kierunkowej przez samochód nieobciążony wymusza bardzo precyzyjne kierowanie takim pojazdem, które może być zrealizowane przez zastosowanie automatycznego kierowania w czasie zmiany pasa ruchu wymuszonego nagle pojawiającą się przeszkodą. Przykładowe wyniki symulacji zmiany pasa ruchu z zastosowaniem aktywnego układu kierowniczego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Dwustronny szybki obrót koła kierownicy w czasie jazdy na wprost z aktywnym regulatorem kąta obrotu koła kierownicy; $V=70\text{km/h}$; $\mu=0,3$

PODSUMOWANIE

Sterowanie nieobciążonym samochodem ciężarowym w warunkach granicznych wymaga od kierowcy szczególnie dużej precyzji. Przekroczenie dopuszczalnej wartości kąta obrotu koła kierownicy wynikającej z granicznej siły przyczepności opon do nawierzchni jezdni i prędkości jazdy nawet o kilka stopni może powodować utratę stateczności kierunkowej. W sytuacjach wymagających omińnięcia nagle pojawiającej się na drodze przeszkody nawet najbardziej doświadczony kierowca nie jest w stanie w pełni kontrolować ruchów kołem kierownicy. W takim przypadku logicznym rozwiązaniem jest wykorzystywanie aktywnego układu kierowniczego.

BIBLIOGRAFIA

1. Gidlewski M.: *Model of a dual axis heavy truck for handling studies in complex road situations*, 11th European Automotive Congress, Budapest 2007
2. Gidlewski M.: *Opportunities to Investigate the Steering System to Improvement of Truck Driving Properties under Critical Road Conditions*. Archives of Transport nr 3/2011
3. Gidlewski M., Żardecki D.: *Automatic Control of Steering System During Lane Change*, Proceedings of ESV'2015 Conference in Gothenburg, Sweden, available on the Internet: www.nhtsa.gov/ESV.
4. Gidlewski M., Żardecki D.: *Influence of Nonlinearity Simplifications in a Reference Model of a Motor Vehicle on the Automatic Control of the Vehicle Steering System During a Lane-change Manoeuvre*, materiały konferencyjne Dynamical Systems, Control and Stability 13th International Conference Dynamical Systems - Theory and Applications DSTA2015, Lodz, Poland 2015.
5. Gidlewski M., Jemioł L., Żardecki D.: *Dynamika procesu nagłego omijania przeszkody przez samochód*, materiały konferencyjne X International Science-Technical Conference Automotive Safety Kielce 2016.
6. Gidlewski M., Żardecki D.: *Simulation-Based Sensitivity Studies of a Vehicle Motion Model*, materiały konferencyjne 20th International Scientific Conference TRANSPORT MEANS 2016 Kowno (Litwa)

Simulation tests of driving properties of a non-loaded medium-duty truck

An extensive research and development work related to the problem of automatic vehicle steering control in traffic emergency situations caused by a suddenly emerging obstacle has been done within the research project N N509 568439. Simulation tests were carried out using as the virtual steering object an original, thoroughly and completely verified in road and bench tests and complex (multi-mass, 3D, nonlinear) model of a medium-duty truck. Development of a controller of the active steering system required carrying out many tests of the steering object in the open-loop system, in various road and operating conditions. These tests enabled to establish scenarios of the loss of motion stability and to determine critical values of parameters at which the vehicle instability occurs. The paper presents only a part of the obtained test results which relate to the non-loaded vehicle. The results point at the complexity of driving properties of the tested object.

Autorzy:

dr inż. **Mirosław Gidlewski** – Przemysłowy Instytut Motoryzacji, Centrum Rzecznictwa Samochodowego i Szkoleń, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn e-mail: miroslaw.gidlewski@uthrad.pl
mgr inż. **Leszek Jemioł** – Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, leszek.jemiol@uthrad.pl