MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
5-M/2012
ZESZYT 10
ROK 109
ISSUE 10
YEAR 109

TOMASZ NABAGŁO*, STANISŁAW WALCZAK**, ANDRZEJ JURKIEWICZ***

MODELOWANIE DYNAMIKI POJAZDU WIELOOSIOWEGO W PROGRAMIE ADAMS/CAR

MODELING OF MULTI-AXLE VEHICLE DYNAMICS IN THE ADAMS/CAR PROGRAM

Streszczenie

W artykule przedstawiono przebieg budowy modelu pojazdu wieloosiowego w programie ADAMS/Car. Opisano sposób budowy modeli podzespołów pojazdu wieloosiowego oraz ich współpracę w pełnym modelu pojazdu. Zaprezentowano sposoby implementacji parametrów rzeczywistego pojazdu w wirtualnym modelu. Przedstawiono również wyniki symulacji w wybranych warunkach jazdy, a na podstawie tych wyników zaprezentowano wnioski dotyczące wpływu wybranych parametrów na dynamikę pojazdu.

Słowa kluczowe: model pojazd wieloosiowy ADAMS/Car

Abstract

In the paper the building process of multi-axle vehicle is put forward. This model is built in ADAMS/Car program. The authors described a way of multi-axle vehicle subsystems building and their cooperation in full vehicle model. Ways of real vehicle parameters implementation in a virtual model are presented here. Also results of simulation in chosen ride conditions are presented. Based on these results, the authors present conclusions associated with influence of chosen parameters on the full vehicle dynamics.

Keywords: multi-axle vehicle model ADAMS/Car

* Dr inż. Tomasz Nabagło, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

** Dr inż. Stanisław Walczak, Instytut Inżynierii Cieplnej i Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

*** Dr inż. Andrzej Jurkiewicz, Katedra Automatyzacji Procesów, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza.

1. Wstęp

Rozpoczynając proces modelowania pojazdu wieloosiowego, należy powziąć wiele założeń. Można by powiedzieć, że liczba założeń jest wprost proporcjonalna do stopnia prostoty modelu. Modelując zatem obiekt wieloczłonowy, jakim jest ww. pojazd najlepiej byłoby wygenerować złożony model jak najbliższy obiektowi rzeczywistemu. Odpowiedzią na takie wyzwanie może być program MSC.ADAMS, a konkretnie jego moduł o nazwie ADAMS/Car [1]. Autorzy artykułu zdecydowali się na wybór pojazdu czteroosiowego o dwóch przednich osiach kierowanych i napędzie na wszystkie osie.

2. Analiza literatury pod kątem wyboru struktury modelu

W przypadku pojazdów czteroosiowych rozpatruje się wiele rozwiązań układu kierowania pojazdem. Do najpopularniejszych należą układy kół kierowanych w dwu pierwszych osiach oraz kół kierowanych na wszystkich czterech osiach. W pracy [2] autorzy przytaczają takie rozwiązania. Przedstawiają oni również charakterystyki skrętu przy różnych kątach znoszenia i współczynnikach tarcia statycznego między oponą a nawierzchnią drogi. Po analizie powyższych rozwiązań autorzy niniejszego artykułu zdecydowali się na zastosowanie układu kierowania z kołami kierowanymi dwóch przednich osi.

W pojazdach wieloosiowych dosyć często stosuje się popularne zawieszenie z podwójnym wahaczem poprzecznym [3]. Dobrym rozwiązaniem jest również zastosowanie zawieszenia z kolumną McPhersona, ze względu na jego prostą budowę i częste zastosowanie w samochodach osobowych. W przypadku pojazdów gąsienicowych, które również wchodzą w skład grupy pojazdów wieloosiowych stosuje się tzw. zawieszenie oparte na wałkach skrętnych z tłumikami teleskopowymi na skrajnych osiach przednich i tylnych [4].

Z powodu popularności w kołowych pojazdach wojskowych zawieszenia z podwójnym wahaczem poprzecznym, autorzy artykułu zdecydowali się na zastosowanie w modelu właśnie tego typu zawieszenia. W swoim wyborze kierowali się też jego niezawodnością.

W rozwiązaniach napędów pojazdów wieloosiowych stosowany jest napęd na wszystkie osie kół jezdnych, jak to się dzieje w pojazdach wojskowych, bądź napęd na ostatnią oś w przypadku cywilnych pojazdów ciężarowych. Ze względu na bardziej uniwersalny napęd stosowany w pojazdach wojskowych, autorzy zdecydowali się na zastosowanie w modelu napędu na wszystkie osie.

3. Budowa modelu pojazdu wieloosiowego

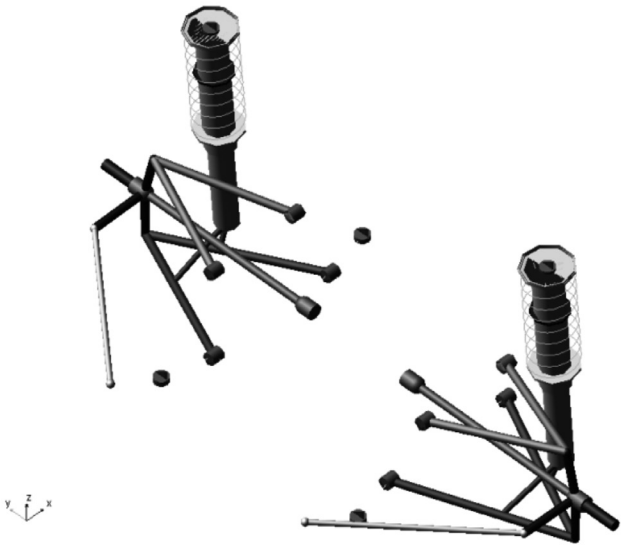
Program ADAMS/Car umożliwia budowę modelu złożonego z podzespołów analogicznych jak w przypadku pojazdu rzeczywistego. Modułowość budowanego modelu sprawia, iż pełny model pojazdu składa się z tzw. podsystemów. Podsystemy te są z punktu widzenia programu ADAMS klasycznymi układami wieloczłonowymi, powiązanymi ze sobą więzami kinematycznymi bądź elementami elastokinematycznymi [5]. Powyższe podsystemy mają swoje odpowiedniki w rzeczywistym pojeździe i należą do nich układy zawieszenia kół dla każdej osi pojazdu, nadwozie, układ kierowniczy, układ napędowy, hamulce oraz koła jezdne z oponami współpracującymi z podłożem. W końcowym złożeniu tworzą one

pełny model pojazdu. Na podstawie geometrii elementów poszczególnych podzespołów, ich mas i momentów bezwładności, które wynikają z zadanej gęstości i geometrii elementu oraz na podstawie ich właściwości elastokinematycznych, tworzone są przez program ADAMS układy równań różniczkowych dynamiki pojazdu. Układy tych równań są następnie przez program rozwiązywane. Proces tworzenia i rozwiązywania układów równań różniczkowych jest przeprowadzany przez tzw. Solver ADAMS i nie jest omawiany w niniejszym artykule.

Parametry opracowanego modelu zostały zaczerpnięte z istniejącego rozwiązania wielo-osiowego pojazdu kołowego będącego na wyposażeniu polskiej armii, dlatego też większość kluczowych parametrów pojazdu nie mogła zostać ujawniona w niniejszym artykule.

3.1. Podsystemy modelu pojazdu

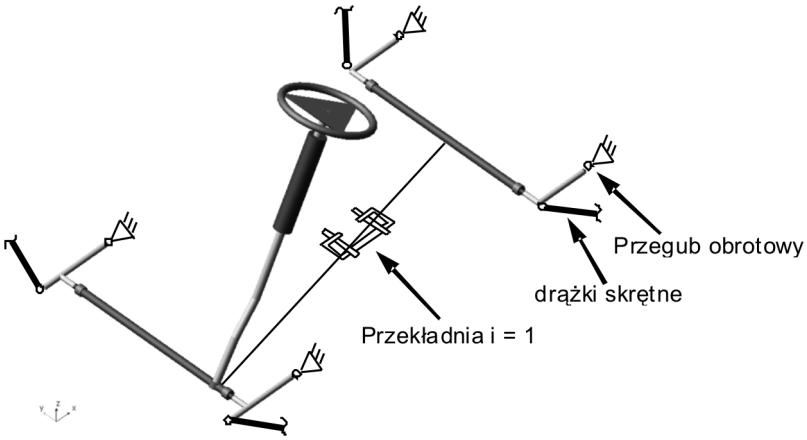
Pierwszym podsystemem modelu jest zawieszenie kół jezdnych względem nadwozia. W tym konkretnym przypadku autorzy wybrali zawieszenie z podwójnym wahaczem poprzecznym (rys 1). Parametry układu, takie jak sztywności i tłumienie kolumny hydro-pneumatycznej, spełniającej rolę sprężyny gazowej i hydraulicznego amortyzatora oraz właściwości elastokinematyczne elementów podatnych zawieszenia przyjęto na podstawie danych ww. pojazdu. Do wstępnych symulacji przyjęto współczynnik sztywności sprężyny wynoszący $k = 56{,}6$ N/mm oraz współczynnik tłumienia amortyzatora wynoszący $c = 251$ N/mm/s.



Rys. 1. Zawieszenie nadwozia względem kół jezdnych

Fig. 1. Vehicle suspension system

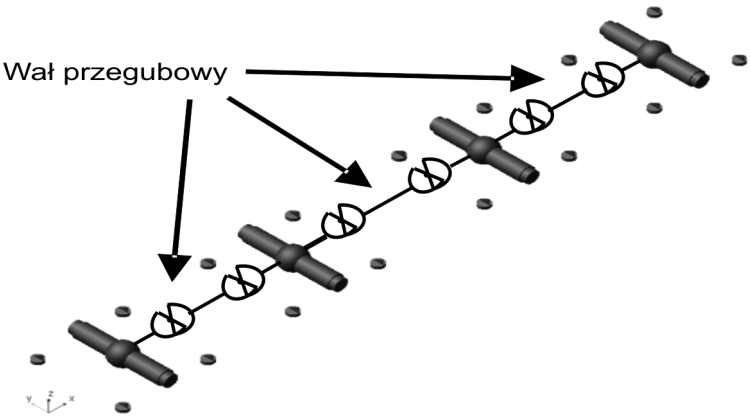
Kolejnym podsystemem jest układ kierowniczy (rys. 2). Jak powiedziano we wstępie, w układzie tym kierowane są koła dwóch pierwszych osi pojazdu. Jest on uproszczonym modelem rzeczywistego układu kierowniczego pojazdu, o którym mowa na wstępie rozdziału. Przełożenia pomiędzy kołem kierowniczym a kołami jezdnymi zostały dobrane na podstawie badań układu kierowniczego rzeczywistego pojazdu.



Rys. 2. Układ kierowniczy pojazdu

Fig. 2. Steering system of the vehicle

Kolejnym podsystemem pojazdu jest układ napędowy. Układ ten napędza wszystkie cztery osie pojazdu (patrz rys. 3). Jak napisano na wstępie możliwe jest również zastosowanie napędu jedynie na ostatniej osi pojazdu, jednakże w pojazdach czteroosiowych dosyć często stosuje się napęd na jego wszystkie osie. W układzie tym całkowity moment napędowy przekazywany jest z silnika poprzez sprzęgło hydrokinetyczne, automatyczną skrzynkę przekładniową na skrzynię rozdzielczą przekładnie główne z mechanizmami różnicowymi równomiernie na wszystkie cztery osie napędowe. Charakterystyka zewnętrzna silnika opisująca zależność pomiędzy momentem napędowym a prędkością obrotową i stopniem naciśnięcia na pedał przyspiesznika została dobrana na podstawie rzeczywistych danych silnika zastosowanego w rzeczywistym pojeździe.



Rys. 3. Układ napędowy

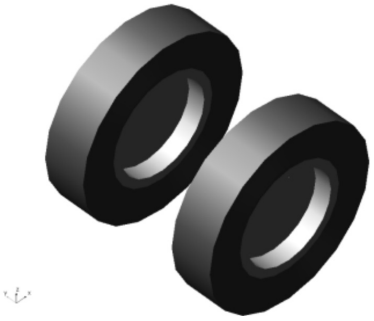
Fig. 3. Powertrain system

Bardzo istotnym ze względu na sterowanie prędkością pojazdu jest podsystem zawierający układ hamulcowy. Tarcze hamulcowe rozmieszczone są na wszystkich ośmiu kołach pojazdu (rys. 4) . Układ ten jest istotny w przypadku symulacji w zamkniętej pętli sterowania, przy wykonywaniu zadanych manewrów przez tzw. wirtualnego kierowcę. W programie Adams/Car wirtualny kierowca zarówno przyspiesza, jak i hamuje pojazd w celu uzyskania zadanego toru jazdy z zadaną prędkością.

Rys. 4. Układ hamulcowy (a) i pojedynczy podsystem hamulca (b)

Fig. 4. Brake system (a) and single brake subsystem (b)

Ostatnim z wymienionych elementów pojazdu są modele koła ogumionego (rys. 5). W tym konkretnym modelu, do wstępnych symulacji przyjęto model opony Fiala [6]. Pomimo ograniczonych możliwości model ten posiada zalety w postaci ograniczonej do dziesięciu liczby parametrów wejściowych. Są one bezpośrednio związane z fizycznymi właściwościami opony. Należą do nich: promień opony nieobciążonej (R_1), promień obręczy koła (R_2), sztywność promieniowa opony (k_z), sztywność poprzeczna opony związana z kątem znoszenia koła (C_α), sztywność poprzeczna związana z kątem pochylenia koła (C_γ), sztywność podłużna opony (C_s), tłumienie promieniowe opony (ζ), współczynnik momentu oporu toczenia (C_r), współczynnik tarcia statycznego (μ_0) oraz współczynnik tarcia dynamicznego (μ_1). Dodatkowym elementem jest szerokość opony (d).



Zastosowane parametry modelu opony	
$R_1 = 630$ mm $R_2 = 390$ mm $k_z = 933{,}7$ N/mm $C_\alpha = 3200$ N/° $C_\gamma = 320$ N/° $C_s = 343{,}9$ N/mm $\zeta = 3{,}73$ N/mm/s	$C_r = 10^{-3}$ mm $\mu_0 = 0{,}9$ $\mu_1 = 0{,}6$ $d = 300$ mm

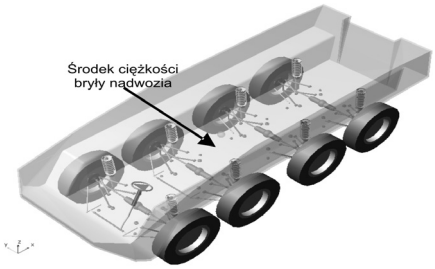
Rys. 5. Model koła ogumionego

Fig. 5. Road wheel model

Wadami tego modelu jest ograniczenie polegające na tym, że nie może być stosowany w warunkach jednoczesnego skrętu i hamowania lub skrętu i przyspieszania. Nie jest w nim również uwzględniona poprzeczna siła powodująca moment wynikający z kąta nachylenia koła. W modelu nie uwzględnione są również bardziej złożone zjawiska związane z odkształcaniem się bieżnika opony w trakcie bocznego jej znoszenia. W programie ADAMS są również dostępne również bardziej złożone modele opony, jednakże ich zastosowanie wymaga zdecydowanie więcej parametrów wejściowych opisujących oponę.

3.2. Pełny model pojazdu

Pełny model pojazdu czteroosiowego przedstawiony jest na rysunku 6. Nadwozie zamodelowano jako bryłę sztywną, opisaną poprzez jej masę, położenie środka ciężkości oraz momenty bezwładności względem osi podłużnej, poprzecznej i pionowej pojazdu.



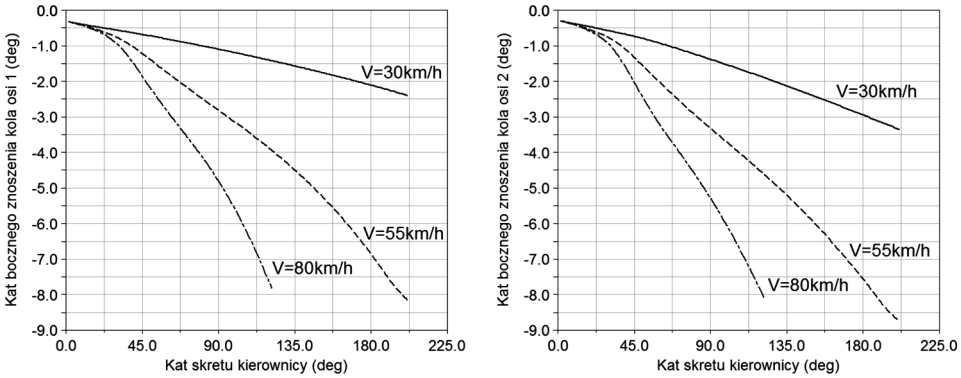
Rys. 6. Pełny model pojazdu wieloosiowego

Fig. 6. The full model of multi-axle vehicle

Dzięki parametryzacji punktów konstrukcyjnych pojazdu możliwa jest jego modyfikacja w bardzo szerokim zakresie. Program ADAMS/Car pozwala na przesuwanie zarówno punktów konstrukcyjnych jak i całych podzespołów, bądź też zmianę ich właściwości elestokinematycznych. Modyfikowane mogą być również parametry związane z rodzajem układu napędowego takie jak charakterystyka zewnętrzna silnika, czy przełożenia skrzyni biegów i przekładni głównej. W układzie kierowniczym może zostać zastosowany dodatkowo model układu wspomagania użytego w rzeczywistym pojeździe. Przy zastosowaniu wydajnego komputera można w stosunkowo krótkim czasie przebadać nowe rozwiązania konstrukcyjne pojazdu bądź zweryfikować wpływ zmian wprowadzonych w już istniejącym pojeździe na dynamikę pojazdu.

4. Symulacja i analiza wyników symulacji dynamiki pojazdu

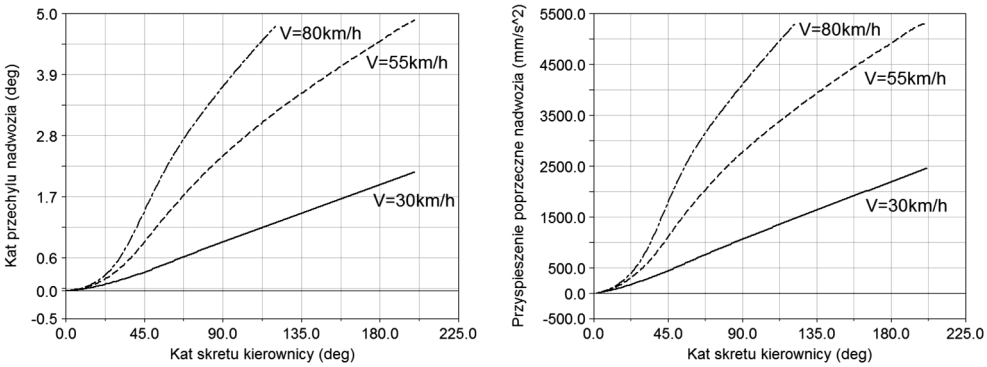
Wstępne symulacje przeprowadzone zostały pod kątem badania dynamiki pojazdu w warunkach jazdy krzywoliniowej. Symulacje przeprowadzono w warunkach liniowego zwiększania kąta obrotu kierownicy od 0° do 200° przy trzech arbitralnie wybranych prędkościach jazdy: 30 km/h, 55 km/h oraz 80 km/h. Przyrost kąta obrotu kierownicy wynosił 10°/s. W warunkach tych obserwowano takie parametry jak kąt bocznego znoszenia prawych kół pierwszej oraz drugiej osi pojazdu (rys. 7). Obserwowano również kąt poprzecznego przechyłu nadwozia oraz przyspieszenie poprzeczne nadwozia (rys. 8).



Rys. 7. Kąt znoszenia kół prawych osi pierwszej i drugiej przy zmiennym kącie skrętu kierownicy

Fig. 7. Tire slip angle for right wheels in first and second axle for various steering wheel angle

Analizując wyniki symulacji dla pierwszej i drugiej osi pojazdu przedstawione na rysunku 7, można zauważyć niemalże liniowy przyrost kąta bocznego znoszenia w funkcji prędkości jazdy w prawie całym zakresie wartości kąta obrotu kierownicy.



Rys. 8. Kąt przechyłu i przyspieszenie poprzeczne nadwozia przy zmiennym kącie skrętu kierownicy

Fig. 8. Body roll angle and its lateral acceleration for various steering wheel angle

W przypadku kąta poprzecznego przechyłu nadwozia w funkcji prędkości jazdy można zauważyć silną nieliniowość, którą jednakże można by potwierdzić dopiero po zwiększeniu liczby symulacji dla prędkości pośrednich pomiędzy 30 km/h a 80 km/h.

5. Wnioski

Na podstawie przebiegu procesu konstrukcji modelu jak i przeprowadzonych symulacji stwierdzano, iż model pojazdu w programie ADAMS/Car może znacznie usprawnić weryfikację badań doświadczalnych na rzeczywistym obiekcie. Na podstawie wyników symulacji

można uniknąć zadania parametrów mogących uszkodzić obiekt badań jak również można wstępnie zweryfikować zmiany konstrukcyjne obiektu badań.

Model przedstawiony przez autorów artykułu może służyć do badania parametrów układu kierowania, jak i do badania dynamiki układu zawieszenia kół jezdnych względem nadwozia. Ze względu na uproszczoną budowę modelu układu napędowego, możliwość optymalizacji jego budowy w powyższym modelu pojazdu jest ograniczona. W kolejnym etapie pracy autorzy planują zaimplementować w modelu wszystkie możliwe do uzyskania parametry rzeczywistego pojazdu, miedzy innymi w celu porównania wyników symulacji z wynikami badań poligonowych tegoż pojazdu.

Literatura

[1] ADAMS ver. 2010, Help Documentation (ADAMS/Car), MSC.Software 2010.

[2] Watanabe K., Yamakawa J., Tanaka M., Sasaki. T., *Turning characteristics of multi-axle vehicles*, Journal of Terramechanics, 44, 2007, 81–87.

[3] Praca zbiorowa, *Integration of Tools and Processes for Affordable Vehicles*, RTO-TR--AVT-094, 2004 (http://natorto.cbw.pl).

[4] Nabagło T., Jurkiewicz A., Apostoł M., Micek P., *Construction and simulation of a 2S1 tracked vehicle model and its verification using vertical forces on the road wheels while overcoming a single obstacle*, Solid State Phenomena, 177, 2011, 168-176.

[5] Wojtyra M., Frączek J., *Metoda układów wieloczłonowych w dynamice mechanizmów*, OWPW, Warszawa 2007.

[6] Blundell M., Harty D., *The multibody system approach to vehicle dynamics*, Elsevier Buttherworth-Heinemann, New York 2004.