

KOMPUTEROWY PROGRAM DO SYMULACJI DYNAMIKI POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono opis autorskiego programu komputerowego do symulacji numerycznych, a w szczególności obliczeń dynamiki ruchu pojazdów samochodowych o różnym stopniu złożoności. Program posiada wsparcie dla fazy projektowej (poprzez weryfikację pliku wejściowego), umożliwia obliczenia oraz wizualizację wyników obliczeń w postaci tabelarycznej, wykresów jak i animacji trójwymiarowych. Przedstawiono podstawy matematyczne wykorzystane do generowania równań ruchu, elementy składowe programu, a także przykładowe wyniki obliczeń koncentrując się na manewrach potencjalnie niebezpiecznych i trudnych do realizacji w trakcie badań doświadczalnych.

WSTĘP

Wirtualne modele oraz symulacje numeryczne w pierwszym etapie prac projektowych pozwalają zmniejszyć koszty oraz dokonać wstępnej oceny zachodzących zjawisk. Niejednokrotnie symulacje komputerowe są jedynym sposobem otrzymania rozwiązania. Sytuacja taka zachodzi na przykład przy rekonstrukcji przebiegu kolizji lub w symulacjach sytuacji niebezpiecznych i krytycznych. Tworzone w tym zakresie modele powinny odzwierciedlać rzeczywistość lecz czas obliczeń z ich wykorzystaniem powinien być stosunkowo krótki, aby możliwe było prowadzenie analiz wariantowych. Obecnie na rynku istnieje wiele pakietów komercyjnych umożliwiających modelowanie i symulację układów wielomasowych. Za przykład mogą posłużyć projekty: MSC.ADAMS, Universal Mechanism, Cyborg Idea V-SIM, CarSim/TruckSim i HVE [1, 2, 3]. Pakiety te pozwalają między innymi na prowadzenie analiz z zakresu dynamiki ruchu pojazdów osobowych i wielocłonowych, rekonstrukcji wypadków drogowych, kolizji, symulacji zachowania kierowcy i pasażerów w czasie wypadku. Przeszkodą w korzystaniu z nich może być ich wysoka cena, jak również wynikająca z uniwersalności długi czas wdrożenia i konfiguracji systemu. Do modelowania układów wielocłonowych można także wykorzystać środowiska takie jak MATLAB, GNU Octave lub Scilab, które posiadają bogate biblioteki numeryczne oraz oferują skryptowe języki wysokiego poziomu [4]. Nadal jednak istnieje potrzeba tworzenia dedykowanego oprogramowania np. do symulacji ruchu pojazdów samochodowych umożliwiającego przetwarzanie wsadowe, w którym czas przygotowania modelu jest stosunkowo krótki. Programy tego rodzaju posiadają gotową bibliotekę komponentów i algorytmów z których można przygotować model obliczeniowy [5].

W niniejszej pracy przedstawiono opis autorskiego programu komputerowego do obliczeń dynamiki ruchu pojazdów samochodowych o różnym stopniu złożoności. Zaprezentowano podstawy matematyczne wykorzystane w procesie generowania równań ruchu, elementy składowe programu, a także przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych koncentrując się na manewrach niebezpiecznych i trudnych do realizacji w trakcie badań eksperymentalnych.

1. FORMALIZM MATEMATYCZNY

W aparacie matematycznym wykorzystano przekształcenia jednorodne i współrzędne złączone [6, 7], które prowadzą do opisu ruchu ciała z minimalną liczbą współrzędnych uogólnionych (rys. 1):

$$\mathbf{q}^{(p)} = (q_i^{(p)})_{i=1, \dots, n^{(p)}} \quad (1)$$

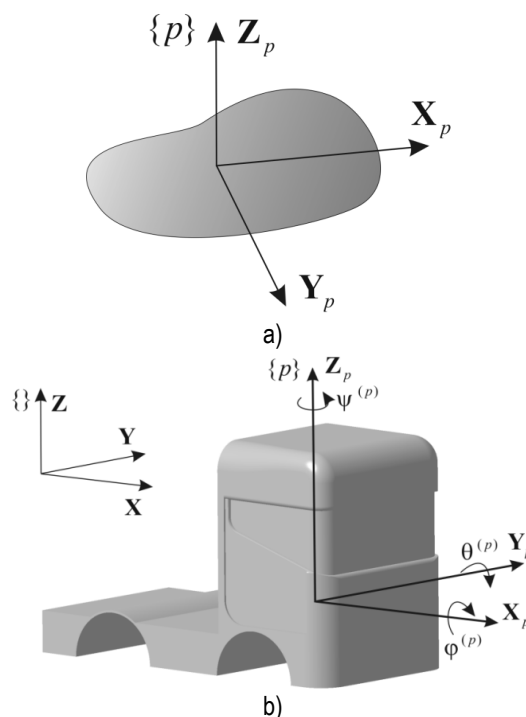
gdzie:

$$q_i^{(p)} \in \{x^{(p)}, y^{(p)}, z^{(p)}, \psi^{(p)}, \theta^{(p)}, \varphi^{(p)}\},$$

$x^{(p)}, y^{(p)}, z^{(p)}$ - współrzędne pozycji ciała w ortokartezjańskim układzie współrzędnych,

$\psi^{(p)}, \theta^{(p)}, \varphi^{(p)}$ - kąty ZYX Eulera (odchylenia, pochylenia, przechylenia),

$n^{(p)}$ - liczba współrzędnych uogólnionych ciała p .



Rys. 1. Modelowanie członów sztywnych: a) schemat ogólny, b) przykład wykorzystania w pojazdach samochodowych

Postępowanie prowadzące do uzyskania równań ruchu uogólniono tak, aby możliwe było modelowanie otwartych i zamkniętych łańcuchów kinematycznych o strukturze drzewa [7]. Równania ruchu sprowadzono do postaci macierzowej, która jest dogodna przy tworzeniu programów komputerowych [1, 2]. Ostatecznie równania ruchu układu ciał sztywnych przyjmują postać:

$$\begin{cases} \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{DR} = \mathbf{f} \\ \mathbf{D}^T \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{W} \end{cases} \quad (2)$$

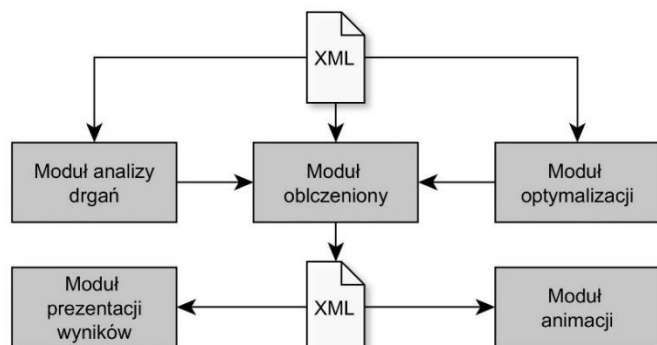
gdzie:

- t - czas,
- \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$, $\ddot{\mathbf{q}}$ - wektory przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń ciał w układzie,
- \mathbf{A} - macierz mas układu,
- \mathbf{D} - macierz współczynników reakcji więzów,
- \mathbf{R} - wektor niewiadomych reakcji więzów,
- \mathbf{f} - wektor uwzględniający składowe pochodzące od energii kinetycznej i energii potencjalnej oraz siły i momenty uogólnione,
- \mathbf{W} - wektor prawych stron równań więzów.

W modelowaniu pojazdów samochodowych wektor \mathbf{f} zawiera również siły oddziaływania jezdni na koła (uwzględniając model opony), siły oporu aerodynamicznego i inne.

2. OPIS PROGRAMU KOMPUTEROWEGO

Sformułowanie ogólnego algorytmu tworzenia struktury układu i generowania równań ruchu umożliwiło wykonanie programu komputerowego do przeprowadzania symulacji numerycznych. Implementację algorytmów wykonano za pomocą obiektowych języków programowania C++ i C#. Omawiany program został podzielony na kilka współpracujących ze sobą modułów pokazanych na rys. 2.



Rys. 2. Główne moduły programu

Moduł obliczeniowy stanowi główną część programu. Wykonywane są w nim obliczenia na podstawie danych wejściowych w formacie XML. Zdefiniowany zestaw intuicyjnych znaczników pozwala na budowę układów fizycznych o różnym stopniu złożoności. Współpraca między modułami i komponentami programu następuje według określonej kolejności. Pierwszym krokiem każdej analizy jest utworzenie struktury układu ciał. Następnie wykonywane są obliczenia w zależności od wybranego typu analizy i zapis danych wynikowych. W kolejnym kroku następuje uruchomienie postprocesora i modułu animacji. Wyniki symulacji komputerowych są również zapisywane w formacie XML. Zastosowanie tego formatu sprawia, że poszczególne moduły są niezależne, a zastosowanie technologii XSLT pozwala na generowanie raportów (np. w formacie HTML) z danych wejściowych i wyjściowych modułu obliczeniowego. Elementami składowymi raportów są dane liczbowe w formie tabela-

rycznej, wykresy i diagramy struktury układu. Do rysowania wykresów wykorzystano narzędzie gnuplot, a do rysowania diagramów bibliotekę graphviz. W module animacji do tworzenia grafiki trójwymiarowej wykorzystano bibliotekę OpenGL firmy Silicon Graphics. Udostępniono pięć metod stało i zmiennokrokowych do całkowania równań ruchu: Rungego-Kutty IV i VI rzędu, schemat niejawni Eulera, Bulrish-Stoera-Deuflharda, Rungego-Kutty-Fehlberga. Zaimplementowano również szereg metod optymalizacji m.in.: Powella, Nelder-Meada, zmiennej metryki, Hooke-Jeeves, algorytmy genetyczne, które umożliwiają prowadzenie badań symulacyjnych z zakresu sterowania.

3. MODELE POJAZDÓW

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładowe modele samochodów, a w dalszej części artykułu przeprowadzono odpowiadające im symulacje komputerowe.

3.1. Samochód osobowy

Nadwozie samochodu posiada sześć stopni swobody (rys. 3). Koła kierowane są połączone z nadwoziem za pomocą zawiesznień niezależnych, a koła tylne za pomocą zawieszenia zależnego. Dodatkowo, ruch każdego z kół opisany jest jedną współzrędną uogólnioną będącą kątem obrotu własnego. Ostatecznie przyjmuje się, że ruch pojazdu jest znany, gdy znane są składowe wektora:

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_n^T \quad \mathbf{q}_{s,1}^T \quad \mathbf{q}_{s,2}^T \quad \mathbf{q}_{s,3}^T \quad \mathbf{q}_w^T]^T \quad (3)$$

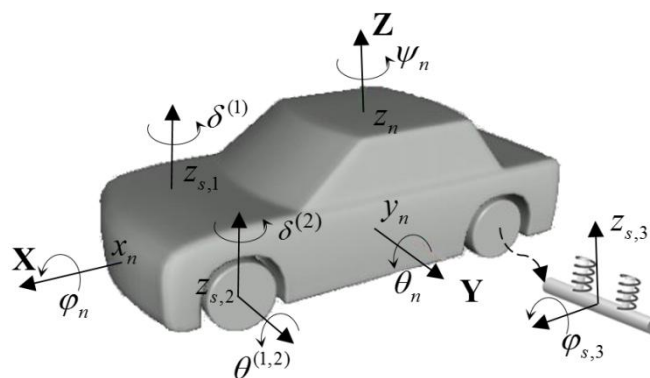
gdzie:

$\mathbf{q}_n = [x_n \quad y_n \quad z_n \quad \psi_n \quad \theta_n \quad \varphi_n]^T$ - współzrędną uogólnioną nadwozia pojazdu,

$\mathbf{q}_{s,i} = [z_{s,i} \quad \delta^{(i)}]^T$ dla $i=1, 2$ - współzrędną uogólnioną zawiesznień niezależnych (przednich),

$\mathbf{q}_{s,3} = [z_{s,3} \quad \varphi_{s,3}]^T$ - współzrędną uogólnioną zawieszenia zależnego (tylnego),

$\mathbf{q}_w = [\theta_{w,1} \quad \theta_{w,2} \quad \theta_{w,3} \quad \theta_{w,4}]^T$ - kąty obrotu własnego kół pojazdu.



Rys. 3. Model pojazdu osobowego

Zastosowano model Dugoffa-Uffelmanna [6] aby określić siły oddziaływania nawierzchni na koła pojazdu. Przyjęto również kinematyczne wymuszenie skrętu kół przednich.

3.2. Pojazd członowy

Przestrzenny model pojazdu wielocłonowego składającego się z ciągnika, siodła i naczepy przedstawiono na rys. 4. Zakłada się, że nadwozie ciągnika pojazdu wielocłonowego jest bryłą sztywną o sześciu stopniach swobody. Jest ono połączone z podłożem poprzez koła, których kąt obrotu własnego wprowadza do układu dodatkowe niewiadome. Siodło w ruchu względem ciągnika posiada jeden stopień swobody. Naczepa, podobnie jak siodło, posiada w ruchu względnym jeden stopień swobody będący kątem odchylenia. Kontakt z podłożem zapewniony jest przez sześć kół. Wektor współrzędnych uogólnionych układu można przedstawić w postaci:

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_n^T \quad \mathbf{q}_{s,1}^T \quad \mathbf{q}_{s,2}^T \quad \mathbf{q}_{s,3}^T \quad \mathbf{q}_w^T]^T \quad (4)$$

gdzie:

$$\mathbf{q}_n^{(1)} = [x^{(1)} \quad y^{(1)} \quad z^{(1)} \quad \psi^{(1)} \quad \theta^{(1)} \quad \varphi^{(1)}]^T$$

współrzędne uogólnione nadwozia,

$$\mathbf{q}_s^{(1)} = [\delta^{(1,1)} \quad \delta^{(1,2)}]^T$$

ka,

$$\mathbf{q}_w^{(1)} = [\varphi^{(1,1)} \quad \varphi^{(1,2)} \quad \varphi^{(1,3)} \quad \varphi^{(1,4)}]^T$$

- kąty obrotu własnego kół ciągnika,

$$\mathbf{q}_n^{(2)} = [\theta^{(2)}]$$

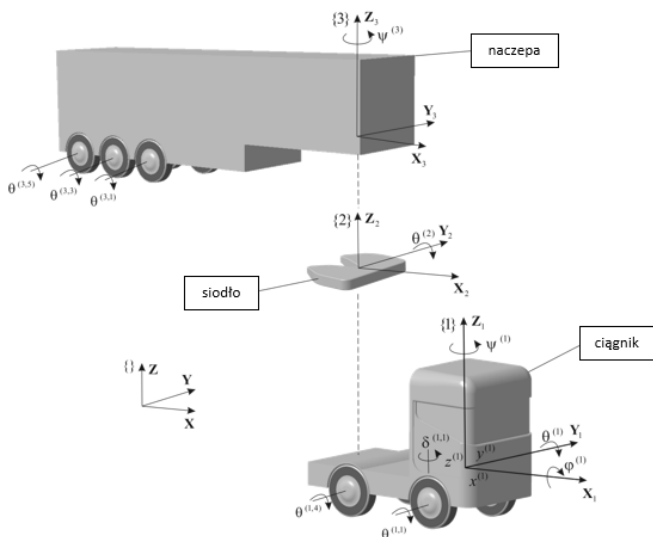
- współrzędna uogólniona siodła (kąt pochylenia siodła względem ciągnika),

$$\mathbf{q}_n^{(3)} = [\psi^{(3)}]$$

- współrzędna uogólniona naczepy (kąt odchylenia naczepy względem siodła),

$$\mathbf{q}_w^{(3)} = [\theta^{(3,1)} \quad \theta^{(3,2)} \quad \theta^{(3,3)} \quad \theta^{(3,4)} \quad \theta^{(3,5)} \quad \theta^{(3,6)}]^T$$

- współrzędne uogólnione kół naczepy.

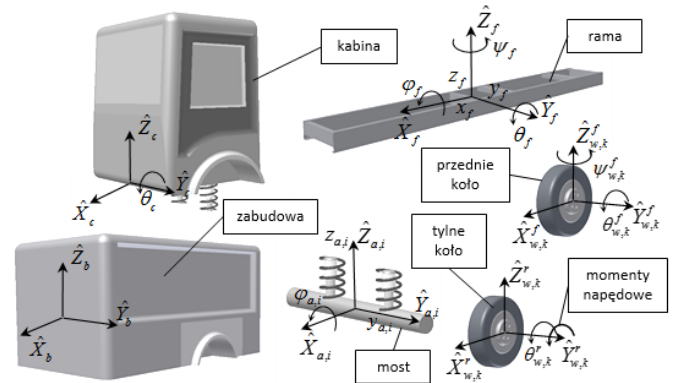


Rys. 4. Model pojazdu wielocłonowego

Podobnie jak w przypadku modelu samochodu osobowego zastosowano model opony wg. Dugoffa-Uffelmanna oraz przyjęto kinematyczne wymuszenie skrętu kół przednich.

3.3. Pojazd specjalny o wysoko położonym środku ciężkości

Przykładem pojazdu specjalnego o wysoko położonym środku ciężkości jest samochód ratowniczo-gaśniczy straży pożarnej. W analizowanym modelu samochodu wyróżniono 9 podzespołów (rama, kabina, zabudowa, przedni i tylny most oraz koła) modelowanych jako ciała sztywne połączone odpowiednimi elementami sprężysto-tłumiacymi (rys. 5).



Rys. 5. Modele podzespołów pojazdu specjalnego

Współrzędne uogólnione dla całego pojazdu można przedstawić w postaci wektora o 17 elementach (stopniach swobody):

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_f, \mathbf{q}_c, \mathbf{q}_{a,1}, \mathbf{q}_{a,2}, \mathbf{q}_{w,1}^f, \mathbf{q}_{w,2}^f, \mathbf{q}_{w,1}^r, \mathbf{q}_{w,2}^r]^T \quad (5)$$

gdzie współrzędne uogólnione podzespołów pojazdu przedstawiają się następująco:

$$\mathbf{q}_f = [x_f, y_f, z_f, \psi_f, \theta_f, \varphi_f]^T$$

- rama o sześciu stopniach swobody,
 $\mathbf{q}_c = [\theta_c]^T$ - kabina posiadająca możliwość obrotu względem osi \hat{Y} ,

$$\mathbf{q}_{a,i} = [y_{a,i}, z_{a,i}, \varphi_{a,i}]^T$$

- mosty ($i = 1$ przedni, $i = 2$ tylny), każdy z nich może wykonywać ruch pionowy i poprzeczny oraz obracać się względem osi \hat{X} ,
 $\mathbf{q}_{w,k}^f = [\psi_{w,k}^f, \theta_{w,k}^f]^T$, $\mathbf{q}_{w,k}^r = [\theta_{w,k}^r]^T$ - koła f - przednie, r - tylne ($k = 1$ strona prawa, $k = 2$ strona lewa).

Analizowany model wyposażono w tylny układ napędowy. Jego działanie odwzorowano momentami napędowymi przyłożonymi na tylne koła pojazdu zgodnie z zasadą działania otwartego, symetrycznego układu różnicowego [1]. Do wyznaczenia sił oddziaływania jezdni na koła samochodu wykorzystano model opony Fiala Handling Force Model [3].

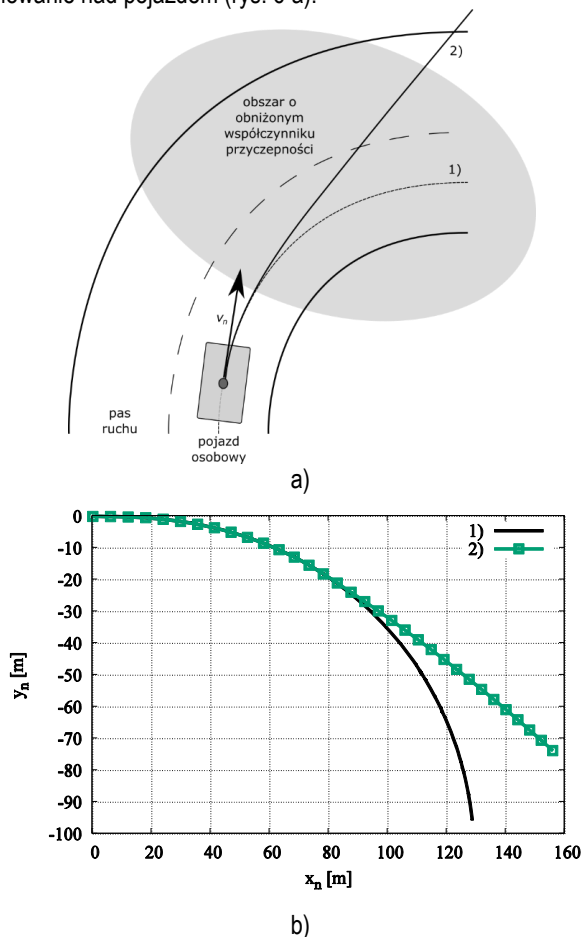
4. PRZYKŁADOWE SYMULACJE

Przedstawiony program obliczeniowy umożliwia prowadzenie badań symulacyjnych w różnych obszarach: analiza statyczna, drgań liniowych, dynamiki i sterowania. Istotną i wartą podkreślenia zaletą symulacji komputerowych jest możliwość analizy ruchu w sytuacjach niebezpiecznych lub krytycznych w których wyniki trudno uzyskać na drodze doświadczalnej. Wyznaczone w czasie analiz komputerowych informacje mogą być istotne dla projektantów samochodów, którzy są w stanie przewidzieć zachowanie pojazdu w warunkach potencjalnego zagrożenia, a w konsekwencji dokonać nieodzownych zmian w konstrukcji samochodu bądź w jego podze-

społach. W tym rozdziale przedstawiono kilka przykładowych symulacji sytuacji niebezpiecznych.

4.1. Przejazd pojazdu osobowego po obszarze o obniżonym współczynniku przyczepności

Utrzymanie kontroli nad samochodem w trakcie ruchu jest możliwe, gdy zapewniona jest odpowiednia przyczepność do podłoża. Przy gwałtownej zmianie przyczepności, np. w sytuacji, gdy koło samochodu wjeżdża na lód bądź w kałużę, kierowca może stracić panowanie nad pojazdem (rys. 6 a).



Rys. 6. Przejazd pojazdu osobowego po obszarze o obniżonym współczynniku przyczepności, a) schemat poglądowy, b) przykładowe wyniki obliczeń, trajektoria pojazdu: 1) przy niezmiennym współczynniku przyczepności, 2) trajektoria pojazdu ze zmiennym współczynnikiem przyczepności

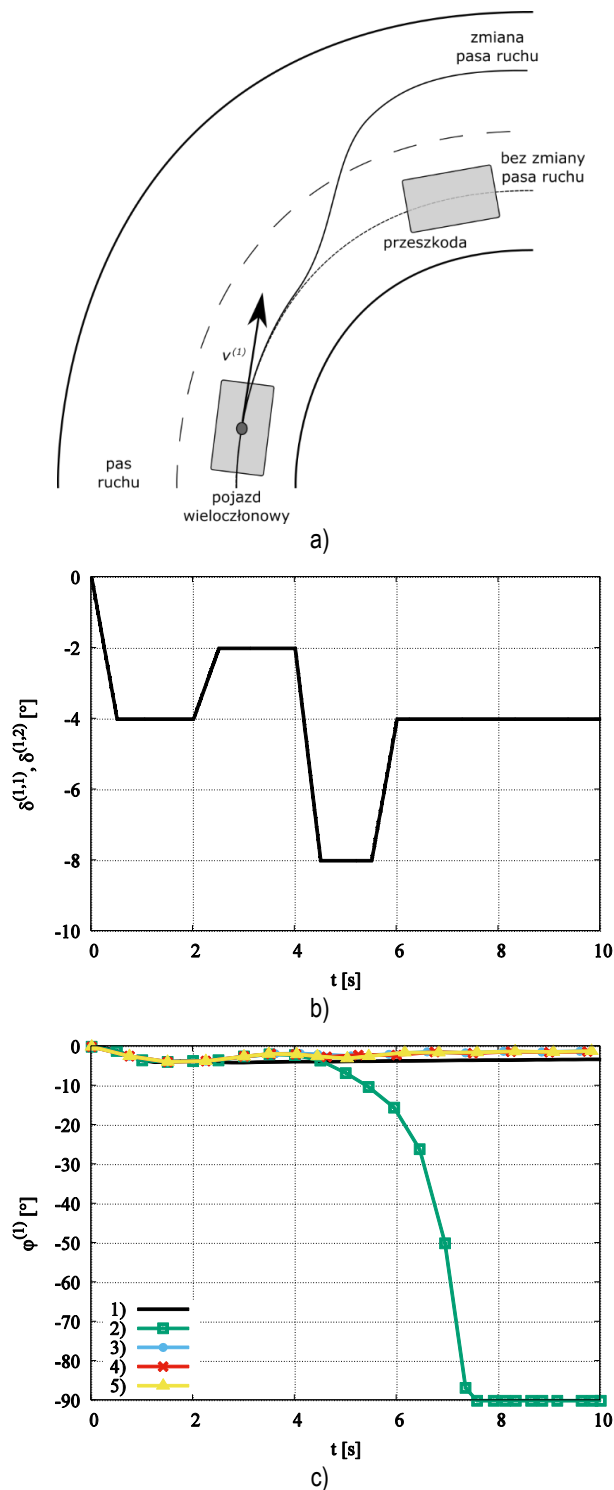
Wykonano obliczenia symulacyjne w których przyjęto parametry geometryczne i fizyczne z pracy [6]. Pojazd w trakcie pokonywania zakrętu z prędkością początkową $v_0=100$ [km/h] z obszaru o współczynniku przyczepności $\mu=0,9$ wjeżdża na obszar o niższej wartości współczynnika przyczepności ($\mu=0,15$). Można zauważyć, że nagle zmiana współczynnika przyczepności ma duży wpływ na ruch pojazdu, a przedstawione badania symulacyjne stanowią podstawę do dalszych prac związanych z zagadnieniami sterowania lub modelem kierowcy. W tym przypadku analiza może dotyczyć weryfikacji istniejących układów wspomagających, działających niezależnie od woli kierowcy lub projektowania nowych systemów sterowania z wykorzystaniem np. sztucznych sieci neuronowych [2].

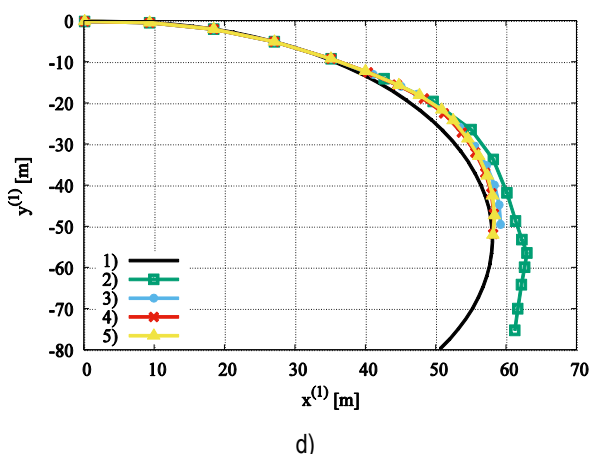
4.2. Wywracanie się pojazdu wieloczołowego (roolover)

Jednym z najbardziej niebezpiecznych manewrów dla pojazdów wieloczołowych jest zmiana pasa ruchu podczas pokonywania

zakrętu (rys. 7 a). W czasie tego manewru może dojść do niekontrolowanego wywrócenia się zestawu wieloczołowego.

Przeprowadzono obliczenia dynamiki ruchu pojazdu wieloczołowego dla omawianego manewru zakładając wymuszenie kinematyczne przedstawione na rys. 7 b oraz przyjmując parametry geometryczne i fizyczne przedstawione w pracy [8]. Podjęto również próbę przywrócenia stabilności pojazdu w czasie wykonywania manewru rozwiązując zadanie sterowania układem hamulcowym. Obliczenia prowadzono różnymi metodami optymalizacji. Analiza rys. 7 b i c wskazuje iż właściwie dobrane momenty hamujące mogą znacząco przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa.

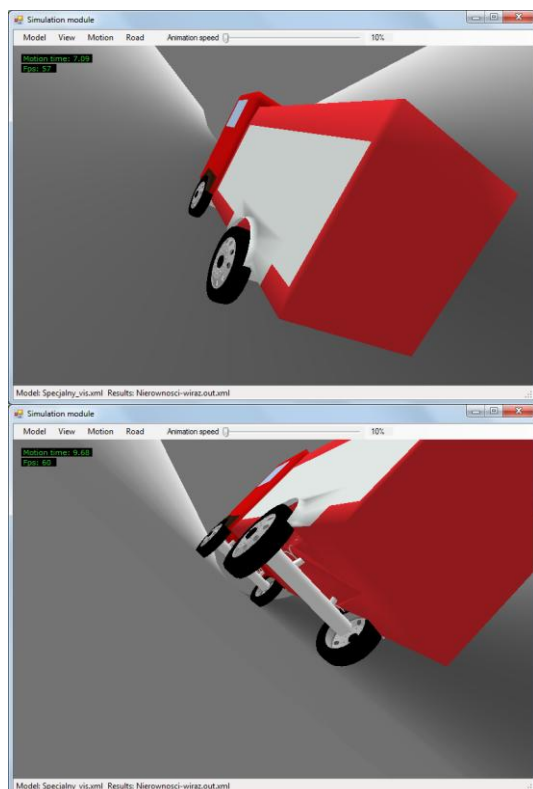




Rys. 7. Wywracanie się pojazdu wieloczęłowego, a) schemat poglądowy, b) wymuszenie kinematyczne działające na przednie koła pojazdu, c) przebieg kąta przechylenia pojazdu, d) trajektoria pojazdu, 1) bez zmiany pasa ruchu podczas pokonywania zakrętu, ze zmianą pasa ruchu w czasie pokonywania zakrętu: 2) bez odpowiednio dobranych momentów hamujących, z momentami hamującymi uzyskanymi z optymalizacji metodami: 3) Powell'a, 4) Nelder'a-Mead'a, 5) zmiennej metryki

4.3. Badanie stateczności pojazdu o wysoko położonym środku ciężkości

Wyniki symulacji numerycznych (w postaci animacji trójwymiarowej) dla przykładowej analizy dynamiki ruchu samochodu specjalnego pokazano na rys. 8. Parametry geometryczne i fizyczne samochodu zostały przedstawione w pracach [1]. Pojazd poruszał się ze stałą prędkością i z zadaniem kątem skrętu kół po nawierzchni drogi modelowej w postaci fragmentu powierzchni walcowej (rynny) [9]. Stała prędkość pojazdu w czasie wykonywania manewru została zapewniona przez regulator PID. Przedstawiony model nawierzchni wykonano stosując interpolację Bicubic [10].



Rys. 8. Zrzuty ekranu modułu animacji po nawierzchni drogi w kształcie rynny

Przeprowadzone symulacje pozwoliły wyznaczyć graniczną wartość kąta nachylenia nawierzchni drogi, powyżej której jazda staje się niebezpieczna z uwagi na zagrożenie utratą stateczności samochodu.

WNIOSKI

Przedstawiony w artykule program komputerowy umożliwia rozwiązanie szeregu zadań cząstkowych: zadania początkowego (statyka), dynamiki ruchu układów ciał, wyznaczenie częstości i postaci drgań własnych, a dodatkowo rozwiązanie zadania sterowania poprzez optymalizację.

Program można z powodzeniem wykorzystywać w obliczeniowej praktyce inżynierskiej w małych i średnich przedsiębiorstwach, które nie mogą sobie pozwolić na zakup drogiego komercyjnego oprogramowania. Stanowi również doskonale uzupełnienie procesu dydaktycznego pokazując trzy najważniejsze etapy w modelowaniu komputerowym: przygotowanie modelu, wykonywanie obliczeń i generowanie raportów wynikowych. Dodatkowo z uwagi na modułowość każdy użytkownik może dodać nowe elementy i metody np. modele opon, metody całkowania równań ruchu, itp.

W przyszłości planowane jest wykonanie usługi sieciowej, umożliwiającej wykorzystanie chmury obliczeniowej oraz aplikacji internetowej pozwalającej na utworzenie pliku wsadowego oraz dodanie go do kolejki obliczeniowej. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość korzystania z programu w różnych systemach operacyjnych, a nawet wykorzystanie urządzeń mobilnych.

BIBLIOGRAFIA

1. Tengler S., *Analiza dynamiki samochodów specjalnych o wysoko położonym środku ciężkości*. PhD Thesis, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, University of Bielsko-Biala, 2012.
2. Warwas K., *Analysis and control of motion of articulated vehicles with flexible elements*, PhD Thesis, University of Bielsko-Biala, Bielsko-Biala, 2008.
3. MSC.ADAMS Documentation, Using Handling Force Models.
4. Brewster M., Gobbert M., *A Comparative Evaluation of Matlab, Octave, FreeMat, and Scilab on Tara*, Technical Report HPCF-2011-10, 2011.
5. Andreasson J., *On Generic Road Vehicle Motion Modelling and Control Stockholm* : KTH, Aeronautics and Vehicle Engineering, 2006.
6. Grzeżożek W., Adamiec-Wójcik I., Wojciech S., *Komputerowe Modelowanie Dynamiki Pojazdów Samochodowych*, Kraków Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2003.
7. Adamiec-Wójcik I., *Modelling dynamics of multibody systems using homogenous transformations* Bielsko-Biala : Wydawnictwo Akademii TechnicznoHumanistycznej, 2003.
8. Warwas K., Augustynek K., *Dynamic Optimisation of Articulated Vehicle Motion for Control of Stability in Critical Situation*, Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2015), Warsaw, Poland, Vol. 1, pp. 232-237, 2015.
9. Tengler S., Harlecki A., *Analysis of dynamics of special vehicles with high gravity centre - the case of stability loss*, Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, Vol. 17, No. 3, 2012.
10. Keys R., *Cubic convolution interpolation for digital image processing*. Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 29, pp. 1153 – 1160, 1981.

COMPUTER PROGRAM FOR VEHICLE DYNAMIC ANALYSIS

Abstract

In this paper the description of computer program for numerical simulations in particular the calculations of dynamics of vehicles of varying complexity was presented. The program has support for the design phase (by verifying the input file), allows the calculation and visualization of calculation results in tabular form, charts and three-dimensional animation. Mathematical background used to generate the equations of motion, the components of the program, and examples of the results of calculations focused on maneuvers potentially dangerous and difficult to conduct by experimental testing were presented.

Autorzy:

dr inż. **Kornel Warwas** – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Informatyki i Automatyki, 43-300 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2.

dr inż. **Szymon Tengler** – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Zakład Mechaniki, 43-300 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2