Jacek **GNIŁKA**
Tomasz **MACHOCZEK**
Gabriel **MURA**

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE MODELOWANIA WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH ZAWIESZENIA POJAZDU GĄSIENICOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodykę doboru parametrów określających własności dynamiczne zawieszenia pojazdów gąsienicowych. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych narzędzi wspomagania projektowania, możliwe jest określenie optymalnych parametrów, takich jak sztywność i tłumienie elementów zawieszenia, do zadanych warunków pracy pojazdu.

Słowa kluczowe: komputerowe wspomaganie projektowania, zawieszenia pojazdów specjalnych, własności dynamiczne pojazdów specjalnych.

1. WSTĘP

Jednym z kluczowych kryteriów świadczących o jakości pojazdów specjalnych wykorzystywanych przez armie na całym świecie jest bezpieczeństwo załogi. Można je uzyskać poprzez m.in. zwiększenie poziomu osłonności oraz wyposażenie pojazdu w systemy obrony aktywnej. Zabiegi te poprzez dokładanie kolejnych elementów wyposażenia wpływają na wzrost masy pojazdu. Konsekwencją dużej masy pojazdu jest wzrost nacisków jednostkowych elementów jezdnych pojazdu mających bezpośredni kontakt z gruntem. Stąd idea stosowania w pojazdach układów jezdnych wyposażonych w gąsienice, dzięki którym masa pojazdu rozłożona jest na znacznie większej powierzchni, niż w pojazdach kołowych.

Obecnie dzięki wykorzystaniu systemów CAx możliwa jest budowa koncepcji pojazdu, dzięki której można poznać jego własności fizyczne na etapie tworzenia wirtualnego modelu. Zaletą tego rozwiązania jest łatwość wprowadzania zmian, które nie przekładają się na koszty wynikające z rzeczywistej przebudowy prototypu.

mgr inż. Jacek **GNIŁKA**- Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej;
mgr inż. Gabriel **MURA** - Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Urządzeń Mechanicznych „OBRUM" sp. z o.o., Gliwice;
mgr inż. Tomasz **MACHOCZEK**- Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej

Rys. 1. Badania doświadczalne pojazdu gąsienicowego, przejazd po torze przeszkód - Demonstrator technologii Anders - OBRUM Gliwice

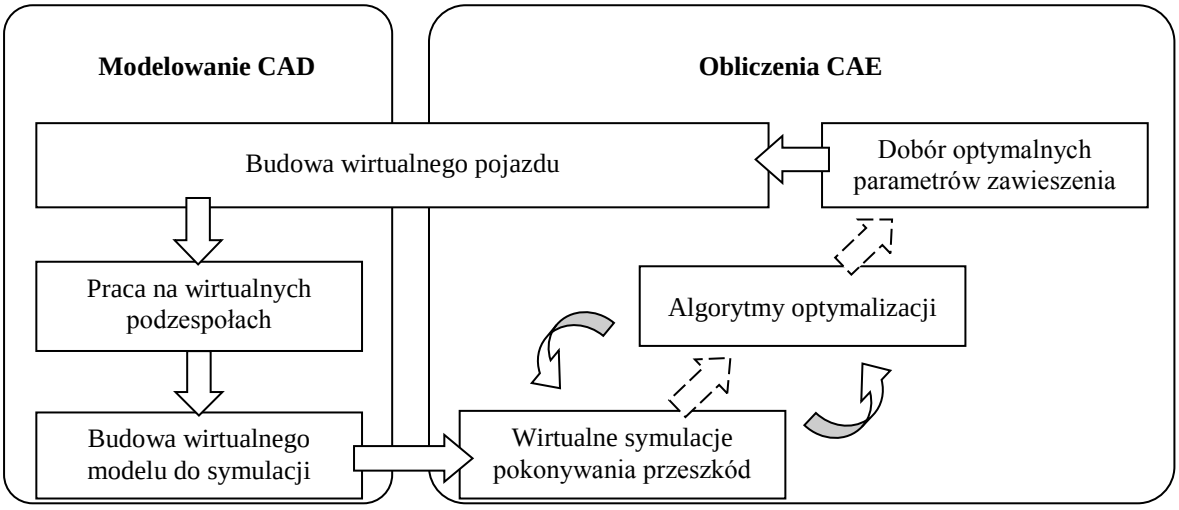
W konsekwencji takie działanie wpływa na redukcję kosztów związanych z wykonaniem licznych badań doświadczalnych mających na celu dobór parametrów zawieszenia. Badania doświadczalne w tym wypadku stanowią weryfikację założeń przyjętych w procesie modelowania, jak i ostateczne próby działania pracy układu zawieszenia (Rys. 1).

2. PROJEKTOWANIE WSPOMAGANE KOMPUTEROWO

Rozwój technik komputerowych wspierających pracę inżynierską pozwala również na przeprowadzenie symulacji zjawisk dynamicznych zachodzących podczas ruchu pojazdu, ze szczególnym uwzględnieniem układu gąsienicowego, który ma istotny wpływ na zachowanie się zawieszenia podczas pracy. Schemat postępowania podczas doboru parametrów zawieszenia jest pokazany na Rys. 2.

Prace koncepcyjne rozpoczynają się na etapie budowy wirtualnego modelu pojazdu, gdzie poprzez rozmieszczenie podzespołów określane są jego parametry masowe.

Do budowy wirtualnego modelu służącego do symulacji ruchu, oprócz parametrów, takich jak masa, położenie środka ciężkości oraz składowe tensora masowego momentu bezwładności niezbędne są wymiary geometryczne elementów stanowiących układ jezdny pojazdu.



Rys. 2. Proces doboru parametrów dynamicznych zawieszenia pojazdu gąsienicowego

Kolejnym etapem jest wykonanie modeli przeszkód terenowych oraz określenie warunków symulacji, takich jak rodzaj modelu gruntu czy też parametry kinematyczne układu. Prowadzenie symulacji odbywa się w powiązaniu z zastosowanymi metodami optymalizacji mającymi na celu wyznaczenie optymalnego rozwiązania do przyjętych założeń. Wynikiem prowadzonych obliczeń jest zmiana własności fizycznych układu zawieszenia, którą można otrzymać poprzez zmianę postaci konstrukcyjnej elementów zawieszenia.

3. PRACA NA WIRTUALNYCH PODZESPOŁACH

Praca na komponentach, jak również zespołach komponentów wykonanych przy zastosowaniu technik komputerowych, w szczególności programów CAD, pozwala na ich szczegółową analizę stereomechaniczną (statyczną, kinematyczną i dynamiczną). Ułatwia ona również proces badania kolizyjności współpracujących elementów, co jest niezwykle istotne na etapie projektowo-konstrukcyjnym. Wpływa korzystnie na czas projektowania, a przy tym minimalizuje możliwość wystąpienia błędów konstrukcyjnych.

Zespoły elementów tworzące mechanizmy, tj. np. układ zawieszenia tytułowego pojazdu gąsienicowego, zamodelowane matematycznie lub zbudowane w oparciu o środowisko Matlab Simulink, pozwalają na symulacje charakterystyk pracy, a w wyniku prowadzonej optymalizacji wielokryterialnej, na identyfikację parametrów modelu oraz minimalizację potencjalnie niekorzystnych oddziaływań powodowanych m.in. wymuszeniami kinematycznymi (wymuszeniami od drogi).

Poprawnie sporządzone modele numeryczne dają możliwość prostych i szybkich modyfikacji parametrów dynamicznych oraz symulację odpowiedzi układu na wprowadzone zmiany. Poniżej przedstawiono przykładowy model komputerowy, podzespołu w postaci tłumika rotacyjnego, typowego pojazdu gąsienicowego, który został wykonany w środowisku Inventor (Rys.3).

Rys. 3. Przykładowe modele komputerowe cieczowego i ciernego tłumika drgań (z lewej widok zewnętrzny, z prawej - po zdjęciu korpusu)

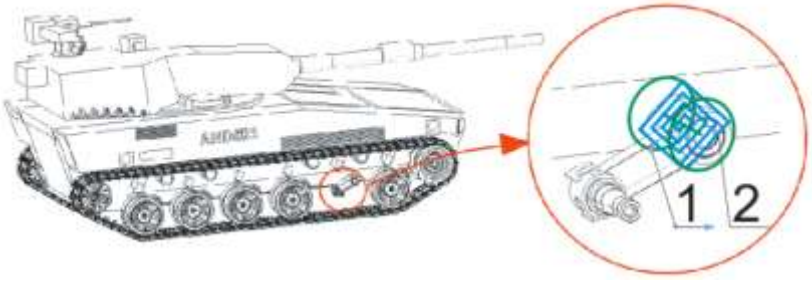
4. BUDOWA WIRTUALNEGO MODELU DO SYMULACJI

W oparciu o zidentyfikowane parametry masowo-geometryczne w procesie modelowania, środowisko LMS Virtual.Lab umożliwia symulacje kinematyczne i dynamiczne urządzeń mechanicznych (w tym pojazdów gąsienicowych), na etapie projektowania przed wykonaniem prototypu. Na rysunku 4 zostało przedstawione złożenie wszystkich elementów podwozia przykładowego pojazdu gąsienicowego, dzięki czemu

można, bazując na podstawie danych geometrycznych jak i własnościach masowych, opracować model numeryczny do analiz dynamicznych.

Rys. 4. Model fizyczny pojazdu gąsienicowego z zawieszeniem

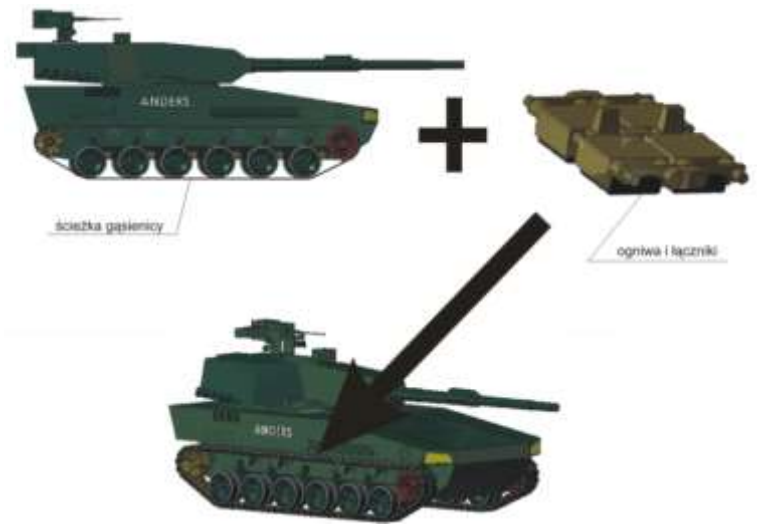
Wałki skrętne powiązano z otworami w korpusie za pomocą par kinematycznych obrotowych. Te same pary kinematyczne występują pomiędzy kołami napędzającymi, mimośrodami napinającymi a korpusem, kołami napinającymi a mimośrodami oraz w pozostałych elementach zawieszenia. Na podstawie par kinematycznych obrotowych zamodelowanych na układach korpus – wałek skrętny, zdefiniowano skrętne elementy sprężysto-tłumiące, którym przypisuje się sztywność skrętną wałków oraz tłumienie amortyzatorów ciernych. Wartość sztywności przypisana każdemu wałkowi, to wartość wyznaczona analitycznie na podstawie równania (2) lub doświadczalnie. Wartość tłumienia wyznaczyć można jedynie doświadczalnie. Schemat rozmieszczenia par kinematycznych i elementów siłowych dla zawieszenia został przedstawiony na rysunku 5.



Rys.5.
1– para kinematyczna obrotowa (Revolute Joint),
2 – skrętny element sprężysto-tłumiący (RSDA)

Przedstawiony model pojazdu w oprogramowaniu LMS Virtual.Lab uwzględnia również gąsienice, które zamodelowano za pomocą narzędzia DiscreteTrack. Narzędzie to wymaga wprowadzenia do układu dwóch ogniw gąsienicy z odpowiednio skonfigurowanymi układami odniesienia oraz zarysu gąsienicy opasującej koła. Siły kontaktowe, siły sprężysto – tłumiące oraz pary kinematyczne zamodelowane dla jednego ogniwa są automatycznie kopiowane na pozostałe ogniwa w momencie generowaniu gąsienicy.

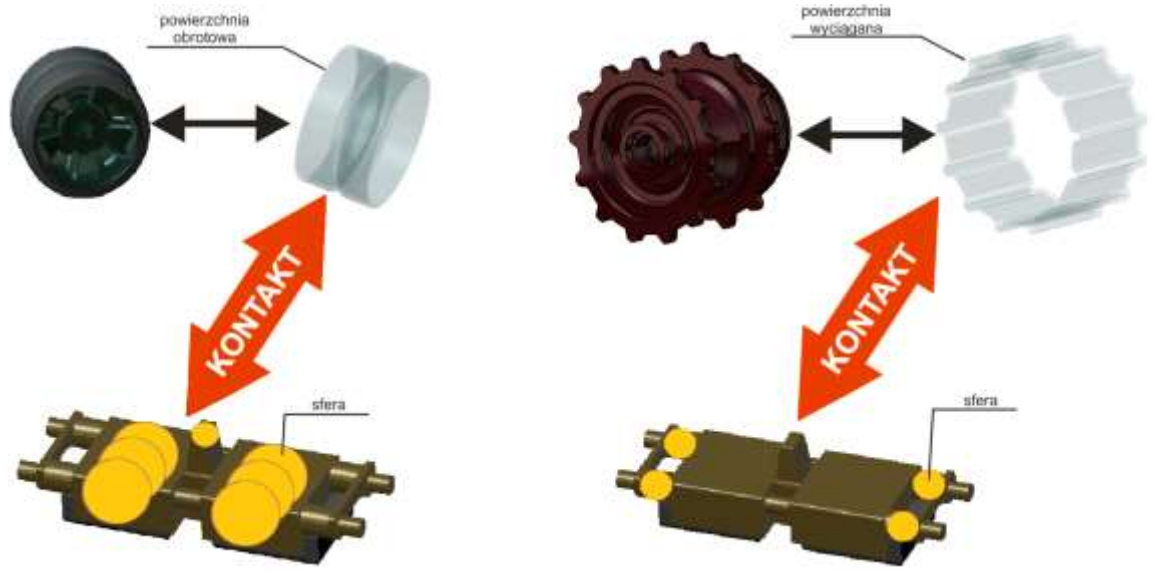
Na rysunku 6 przedstawiono schemat modelowania gąsienicy za pomocą narzędzia DiscreteTrack.



Rys.6. Schemat modelowania gąsienicy za pomocą DiscreteTrack

W modelowaniu dynamiki pojazdów gąsienicowych istotne jest uwzględnienie sił kontaktowych. Kontakt pomiędzy kołami jezdnymi a ogniwami gąsienicy można zamodelować za pomocą funkcji Sphere-to-Revolved-SurfaceContact, gdzie koło to płaszczyzna obrotowa, natomiast ogniwo reprezentuje grupa kilku sfer. Część z nich umieszczono w płaszczyźnie części nośnej ogniwa, natomiast jedną o mniejszym promieniu, w wypuście - "grzebieniu" utrzymującym gąsienicę w płaszczyźnie pionowej kół jezdnych. Parametry tego kontaktu w modelu odpowiadają parametrom kontaktu pomiędzy rzeczywistymi obiektami. Schemat tworzenia kontaktu za pomocą wspomnianego narzędzia przedstawia rysunek 7a. Podobna sytuacja ma miejsce w modelowaniu kontaktu pomiędzy kołem napinającym i rolką a gąsienicą.

Kontakt pomiędzy ogniwami a kołem napędzającym może zostać zamodelowany za pomocą narzędzia Sphere-to-Extruded-SurfaceContact, gdzie ogniwo jest reprezentowane za pomocą kilku sfer umieszczonych w czopach ogniwa, natomiast koło napędzające to płaszczyzna wyciągana. Na rysunku 7b przedstawiono schemat modelowania sił kontaktowych pomiędzy wspomnianymi elementami. Za pomocą tego samego narzędzia zamodelowano kontakt pomiędzy podłożem a gąsienicą oraz pomiędzy wahaczem a ogranicznikiem.



Rys. 7. Schemat modelowania sił kontaktowych za pomocą narzędzi:
a) Sphere-to-Revolved-SurfaceContact, b) Sphere-to-Extruded-SurfaceContact

Po opracowaniu modeli kontaktowych zdefiniowano funkcję, opisującą ruch pojazdu gąsienicowego. Można to wykonać poprzez zdefiniowanie momentu napędzającego lub prędkości obrotowej w parze kinetycznej obrotowej koła napędowego.

Analiza dynamiki modelu pojazdu gąsienicowego jako układu wieloczłonowego polega na rozwiązywaniu układu dynamicznych równań ruchu, które są równaniami różniczkowymi drugiego rzędu, często występującymi wraz z równaniami algebraicznymi. Równania różniczkowe opisują ruch ciał sztywnych lub odkształcalnych, natomiast równania algebraiczne dotyczą równań więzów wyznaczanych w oparciu o konfigurację układu i występujące w nim pary kinematyczne. W układach wieloczłonowych możemy analizować ciała sztywne, posiadające sześć stopni swobody, lub odkształcalne, gdzie należy uwzględnić współrzędne uogólnione potrzebne do pełnego opisu ich deformacji [3].

W zależności od rodzaju modelowanego układu i typu zastosowanych współrzędnych, ich liczba może być większa niż liczba stopni swobody układu wieloczłonowego. Dlatego w tym przypadku wymagane są dodatkowe równania, które określą zależności pomiędzy współrzędnymi.

Ostatecznie równania dla układu wieloczłonowego z więzami w postaci macierzowej przybierają formę:

$$\begin{bmatrix} M & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{h} \\ -\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \\ \gamma^* \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

gdzie:

M - to globalna macierz bezwładności,

$\dot{h}$ - to wektor przyspieszeń,

λ - to mnożniki Lagrange'a,

g - odpowiada wektorowi sił uogólnionych,

γ^* - to zmodyfikowana prawa strona z równań przyspieszeń,

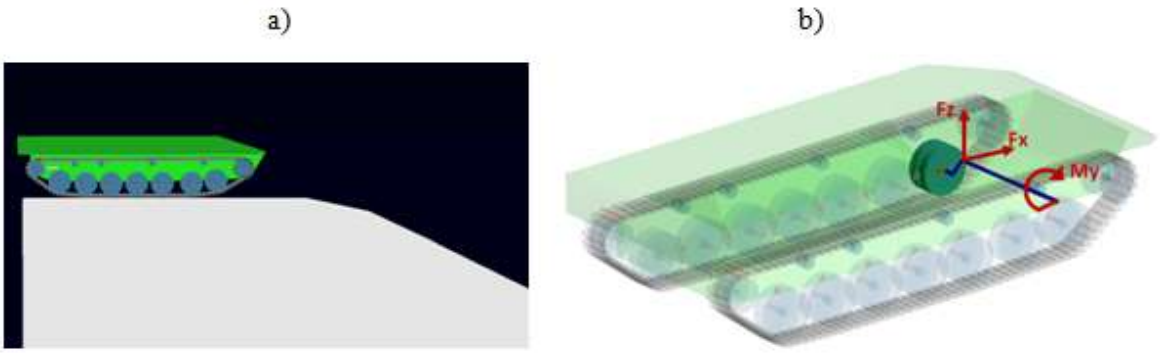
natomiast parametr **B** z równania (1) to zmodyfikowana macierz jakobianu [2].

Podczas opracowywania modelu numerycznego w oprogramowaniach dedykowanych do analizy układów wieloczłonowych (np. MSC.ADAMS lub LMS Virtual.Lab) nie mamy bezpośrednio do czynienia z przedstawionym w równaniu (1) układem dynamicznych równań ruchu. Możemy jedynie wykorzystywać podstawowe elementy, takie jak [4]:

- ciała sztywne lub odkształcalne,
- współrzędne geometryczne,
- pary kinematyczne,
- siły i elementy podatne,
- zdefiniowane przez użytkownika funkcje algebraiczne.

Przeprowadzenie symulacji numerycznej, w analizowanym przypadku analizy zjazdu pojazdu ze wzniesienia o spadku 30° , umożliwia wyznaczenie sił działających na węzły zawieszenia.

Na rysunku 8. b) przedstawione zostały składowe sił występujących w układzie zawieszenia złożonego z koła jezdnego, wahacza oraz wałka skrętnego.

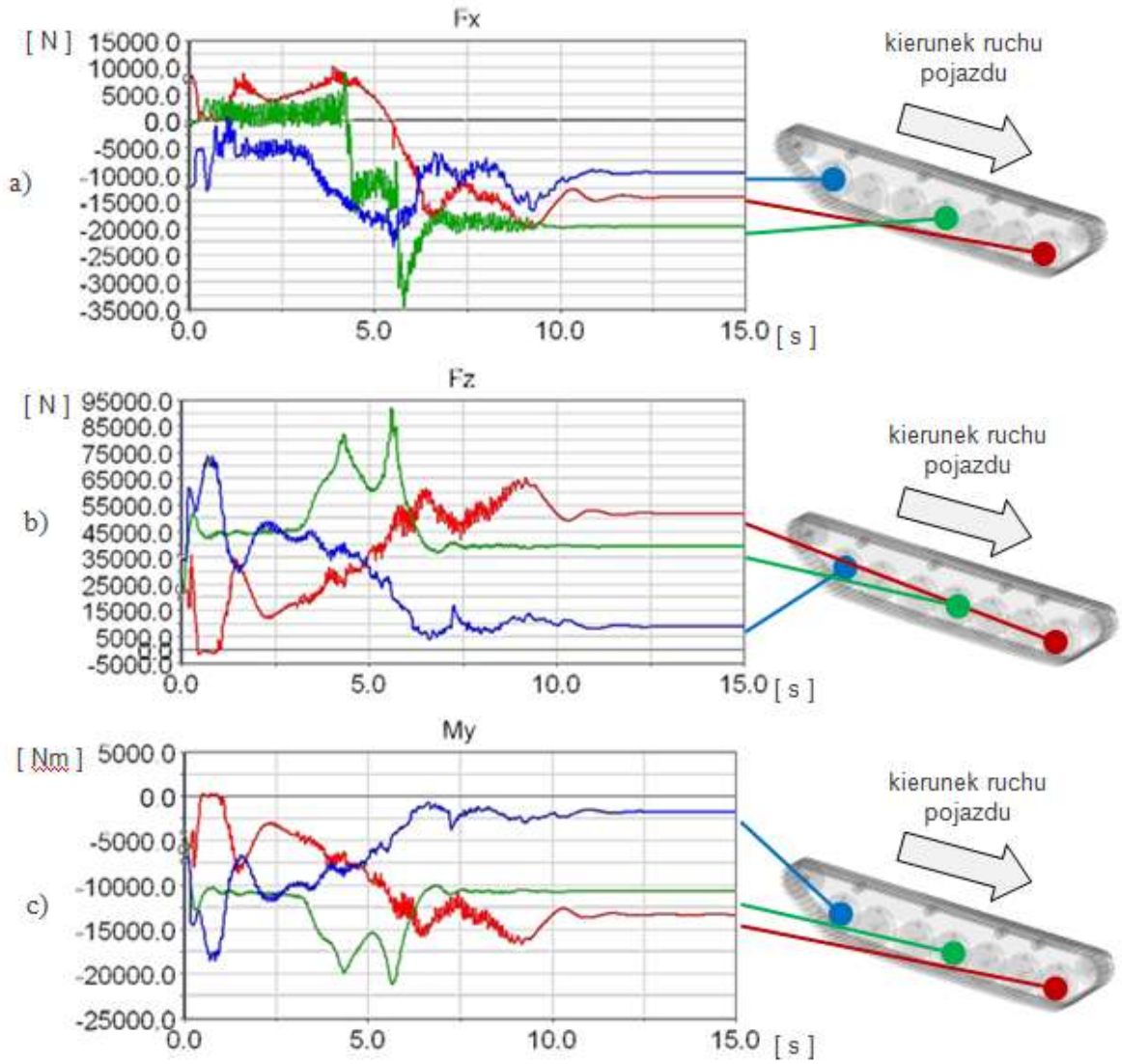


Rys. 8. Symulacja jazdy na wzniesieniu

a) Widok symulacji, b) Siły działające na węzeł zawieszenia

Siły występujące w układzie stanowią warunki brzegowe wykorzystywane w trakcie prowadzenia analiz wytrzymałościowych kadłuba ze szczególnym uwzględnieniem miejsc mocowania elementów zawieszenia.

Wartość momentu skręcającego wałek skrętny pokazana na rysunku 9 c) umożliwia dokonanie doboru grubości wałka skrętnego oraz jego wstępnego naprężenia.



Rys. 9. Siły działające na węzły zawieszenia

a) Składowa siły na oś x; b) Składowa siły na oś z; c) Moment siły My

5. WNIOSKI

Komputerowe wspomaganie doboru własności dynamicznych jest co prawda zadaniem złożonym oraz wymagającym znajomości technik numerycznych, ale umiejętność pracy w środowiskach CAD oraz programach obliczeniowych powoduje skrócenie procesu projektowo-konstrukcyjnego, a przede wszystkim umożliwia dobór optymalnych cech konstrukcyjnych.

Dzięki możliwości prowadzenia symulacji numerycznych możliwe jest szybkie oraz sprawne modyfikowanie parametrów konstrukcyjnych modelu pojazdu, co w przypadku prac fizycznych (modyfikacje struktury pojazdu czy prowadzenia badań eksperymentalnych) niesie ze sobą konieczność ponoszenia dużych nakładów finansowych.

Wiedza na temat budowania numerycznych modeli fenomenologicznych, czyli modeli fizycznych zawierających uproszczenia struktury bez zmian ich funkcjonalności pozwala na zwiększenie wydajności projektowej oraz stanowi kierunek rozwoju prezentowanego podejścia modelowania własności dynamicznych pojazdów gąsienicowych.

6. LITERATURA

[1] Rusiński E.: Zasady projektowania konstrukcji nośnych pojazdów samochodowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.

[2] Nikravesh P.: Computer – Aided Analysis of Mechanical Systems. Prantice_Hall,1988.

[3] Jalón J., Bayo E.: Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems: The Real-Time Challenge, Springer-Verlag, New York, 1994.

[4] Blundell M., Harty D.: Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics, New York, 2004

[5] Kusiak J., Danielewska-Tułecka A.,Oprocha P.: „Optymalizacja - Wybrane metody z przykładami zastosowań", Wydawnictwo PWN, Warszawa 2009.

Praca naukowa realizowana w ramach umowy 2/D/2012 oraz finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2011 – 2013 jako projekt badawczy nr O N501 282840 i nr N N509 562140

COMPUTER AIDED MODELING OF DYNAMIC PROPERTY OF SUSPENSION TRACKED VEHICLE

Abstract. This paper presents an approach to the process of selection of the parameters defining the dynamic properties of the suspension of tracked vehicles. Thanks to modern computer-aided design tools, it is possible to determine the optimal parameters, such as stiffness and damping of the suspension, the vehicle operating conditions.

Keywords: computer aided design, the suspension of special vehicles, dynamic properties of special vehicles.