

Jarosław SEŃKO¹
Radosław NOWAK²

SYMULACYJNE BADANIA POJAZDU TYPU FORMUŁA STUDENT

W pracy opisano symulacyjne badania pojazdu typu Formula Student. Numeryczny model pojazdu opracowano przy użyciu metody układów wielocłonowych w programie MSC.ADAMS/Car. Wykonano symulacyjne badania kinematyki zawieszenia oraz dynamiki ruchu samochodu po torze w kształcie cyfry osiem. Wykonane symulacje jazdy umożliwiły określenie sił i przyspieszeń działających na pojazd w trakcie pokonywania łuków toru, oraz siły i przemieszczeń występujących w zaprojektowanym zawieszeniu pojazdu.

SIMULATION INVESTIGATIONS OF FORMULA STUDENT RACE CAR

Simulation investigation of Formula Student race car has been described. Numerical model of car has been elaborated using Multi Body Systems method, and investigated in MSC.ADAMS software. There have been made kinematics and dynamics simulations of vehicle on race track shaped like eight number. Simulation which have been made let quantify forces and accelerations acting to car driving along race track, moreover forces and displacements of suspension has been recognized.

1. WSTĘP

Kinematyka i dynamika zawiesznień pojazdów jest zagadnieniem nieliniowym, dlatego też trudno jest uwzględnić ich charakter w przypadku obliczeń analitycznych.

Przedstawione badania symulacyjne pokazują możliwości sprawdzenia zachowania się pojazdu sportowego podczas ruchu, oraz uwzględnienia nieliniowego charakteru zawieszenia. Badania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami regulaminu zawodów na torze o kształcie cyfry osiem.

Otrzymane wyniki umożliwiły sprawdzenie zgodności pojazdu z regulaminem zawodów. Ponadto siły wyznaczone podczas badań wykorzystane zostały do obciążenia ramy w obliczeniach metodą elementów skończonych.

¹Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, POLSKA;
Warszawa 02-524; Narbutta 84. Telefon: 22 234 8478 E-mail: jsenko@simr.pw.edu.pl

²Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, POLSKA;
Warszawa 02-524; Narbutta 84. Telefon: E-mail: rnowak@simr.pw.edu.pl

2. MODELE POJAZDU

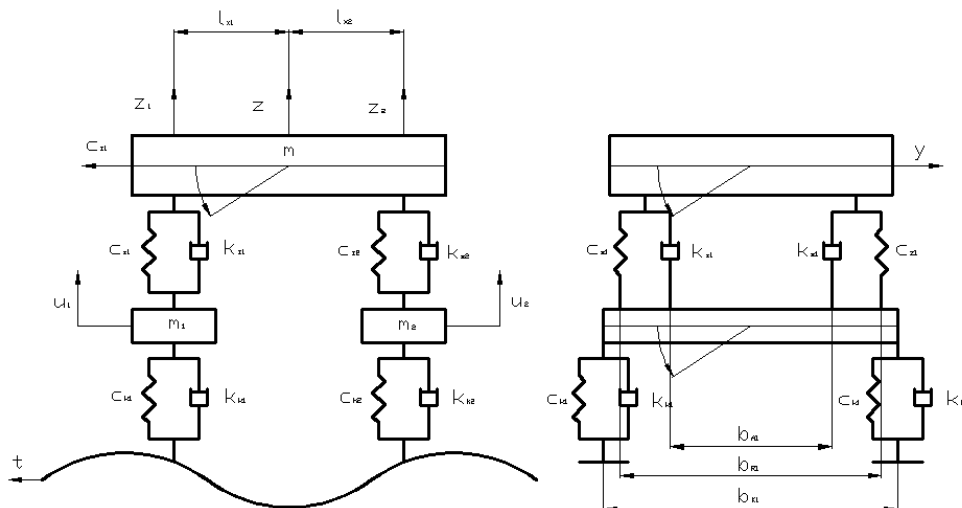
2.1. Model reologiczny i matematyczny

Każdy obiekt rzeczywisty musi być zamodelowany, tak aby możliwe były jego obliczenia analityczne, jak również numeryczne.

Użyty model reologiczny pojazdu pozwolił analitycznie wyznaczyć sztywność sprężyny przy zadanej częstotliwości drgań własnych pojazdu, jednak był to prosty model tzw. „ćwiartki pojazdu”, który sprowadza się do jednego równania ruchu, gdyż posiada tylko jeden stopień swobody.

Oszacowanie częstości drgań własnych pojazdu o zadanych właściwościach zostało wykonane również w programie ADAMS/View, okazało się ono dużo mniej pracochłonne, a co najważniejsze wykazuje dużą łatwość modyfikacji modelu i ponownych obliczeń.

Przedstawiony na rys.2.1. model reologiczny o wielu stopniach swobody, nazywany modelem płytowym pojazdu, jest bardzo trudny w zapisie matematycznym, jak również w późniejszych obliczeniach analitycznych, głównie ze względu na kilka, bądź kilkanaście stopni swobody i tyleż zapisanych równań ruchu.



Rys.2.1. Model reologiczny pojazdu[2]

Model matematyczny pojazdu pokazanego na rysunku 2.1. opisany jest równaniami ruchu (2.1), wyznaczonymi za pomocą metody Lagrange'a bądź z II zasady Newtona.

$$\begin{cases}
 M_1 \ddot{z}_1 + 2k_{A1} \dot{z}_1 + 2c_{Z1} z_1 + M_3 \ddot{z}_2 - 2k_{A1} \dot{u}_1 - 2c_{Z1} \xi_1 = 0 \\
 M_2 \ddot{z}_2 + 2k_{A2} \dot{z}_2 + 2c_{Z2} z_2 + M_3 \ddot{z}_1 - 2k_{A2} \dot{u}_2 - 2c_{Z2} \xi_2 = 0 \\
 -2k_{A1} \dot{z}_1 - 2c_{Z1} z_1 + m_1 \dot{u}_1 + 2(k_{A1} + k_{K1})u_1 + 2(c_{Z1} + c_{K1})u_1 = \\
 \quad 2k_{K1} \dot{q}_{11} + 2c_{K1} q_{11} \\
 -2k_{A2} \dot{z}_2 - 2c_{Z2} z_2 + m_2 \dot{u}_2 + 2(k_{A2} + k_{K2})\dot{u}_2 + 2(c_{Z2} + c_{K2})u_2 = \\
 \quad 2k_{K2} \dot{q}_{12} + 2c_{K2} q_{12} \\
 m_1 \rho_{\dot{x}_1}^2 \dot{\beta}_1 + 2 \left[k_{A1} \left(\frac{b_{A1}}{2} \right)^2 + k_{K1} \left(\frac{b_{K1}}{2} \right)^2 \right] \dot{\beta}_1 + 2 \left[c_{Z1} \left(\frac{b_{R1}}{2} \right)^2 + c_{K1} \left(\frac{b_{K1}}{2} \right)^2 \right] \beta_1 + \\
 -2k_{A1} \left(\frac{b_{A1}}{2} \right)^2 \dot{\theta} - 2k_{Z1} \left(\frac{b_{R1}}{2} \right)^2 \theta = 2k_{K1} \frac{b_{K1} \dot{q}_{L1} - \dot{q}_{P1}}{2} + 2c_{K1} \frac{b_{K1} q_{L1} - q_{P1}}{2} \\
 m_2 \rho_{\dot{x}_2}^2 \dot{\beta}_2 + 2 \left[k_{A2} \left(\frac{b_{A2}}{2} \right)^2 + k_{K2} \left(\frac{b_{K2}}{2} \right)^2 \right] \dot{\beta}_2 + 2 \left[c_{Z2} \left(\frac{b_{R2}}{2} \right)^2 + c_{K2} \left(\frac{b_{K2}}{2} \right)^2 \right] \beta_2 + \\
 -2k_{A2} \left(\frac{b_{A2}}{2} \right)^2 \dot{\theta} - 2k_{A2} \left(\frac{b_{A2}}{2} \right)^2 \theta = 2k_{K2} \frac{b_{K2} \dot{q}_{L2} - \dot{q}_{r2}}{2} + 2c_{K2} \frac{b_{K2} q_{L2} - q_{r2}}{2} \\
 M \rho_{\dot{x}}^2 \ddot{\theta} + 2 \left[k_{A1} \left(\frac{b_{A1}}{2} \right)^2 + k_{A2} \left(\frac{b_{A2}}{2} \right)^2 \right] \dot{\theta} + 2 \left[c_{Z1} \left(\frac{b_{R1}}{2} \right)^2 + c_{Z2} \left(\frac{b_{R2}}{2} \right)^2 \right] \theta + \\
 -2k_{A1} \left(\frac{b_{A1}}{2} \right)^2 \dot{\beta}_1 - 2c_{Z1} \left(\frac{b_{R1}}{2} \right)^2 \beta_1 - 2k_{A2} \left(\frac{b_{A2}}{2} \right)^2 \dot{\beta}_2 - 2c_{Z2} \left(\frac{b_{R2}}{2} \right)^2 \beta_2 = 0
 \end{cases} \quad (2.1)$$

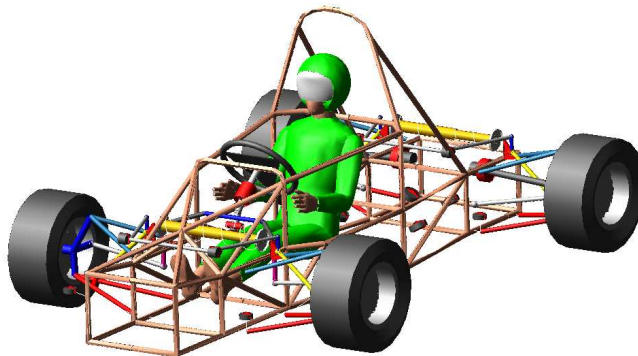
W powyższych równaniach ruchu oznaczenia kolejno:

m, M	masy kół i nadwozia
c_z	współczynniki sztywności sprężyn zawieszenia
c_k	współczynniki sztywności opon
k_z	współczynniki tłumienia tłumików zawieszenia
k_k	współczynniki tłumienia opon
θ, ϑ, β	przemieszczenia katowe nadwozia i kół pojazdu
x, y, z, u	przesunięcia liniowe nadwozia i kół pojazdu
a, b, l	odległości zamocowania zawieszenia względem środka masy
q	wymuszenia

2.2. Model metody układów wieloczłonowych

Modele tworzone w środowisku programu MSC.ADAMS składają się z idealnie sztywnych członów posiadających właściwości badanych obiektów, takie jak masa czy moment bezwładności, a połączone są parami kinematycznymi.

Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie nieliniowej charakterystyki zawieszonych pojazdów. Przebadanie samochodu przy zadanych warunkach początkowych i brzegowych, czyli w konkretnie odzwierciedlonych realnych warunkach jazdy.

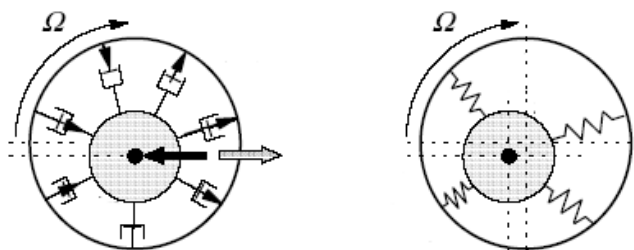


Rys.2.2. Model pojazdu w środowisku programu MSC.ADAMS[2]

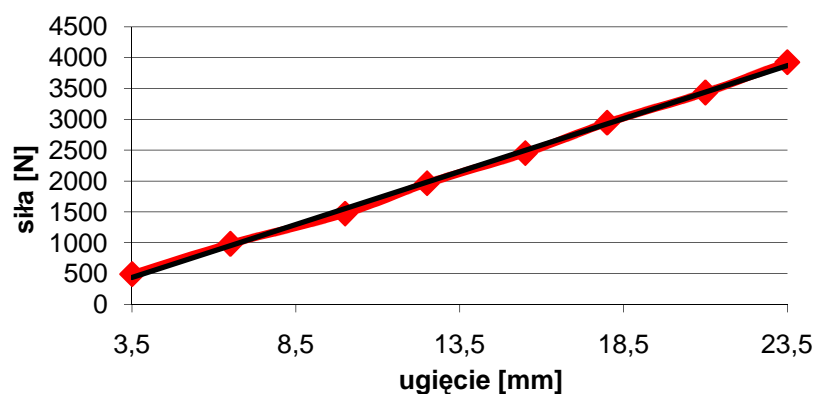
2.3. Model opony

Zaproponowany model opony posiada wymiary oraz właściwości elementu rzeczywistego, czyli opony Dunlop SP Sport o wymiarach 185/50/R13.

Sztywność pionowa opony została zmierzona laboratoryjnie na stanowisku Instytutu Pojazdów na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. W aspekcie pozostałych właściwości opon samochodów sportowych powołano się na źródła literaturowe [3]. Mianowicie sztywność poprzeczna, opór toczenia, tłumienie pionowe, kąt znoszenia bocznego, zostały odpowiednio dobrane dla opony stosowanej w sportach samochodowych. Wykorzystany model nazywany jest Pcejka89.



Rys.2.3. Model opony jako podatnego elementu o zadanej sztywności i tłumieniu[3]



Rys.2.4. Charakterystyka ugięcia sprężyny zawieszenia w zakresie 3,5-23,5mm[2]

3.FORMUŁA STUDENT

3.1.Zawody Formuła Student

Formuła Student to zawody skierowane do studentów mających na celu zaprojektowanie otwartego jednoosobowego pojazdu sportowego typu formuła. Studenci mają szansę sprawdzić swoją wiedzę inżynierską zdobytą podczas studiów w praktyce. Specyfikacja każdego z pojazdów określona jest przez regulamin, w skład którego wchodzi rozdziały dotyczące konstrukcji pojazdu, wykorzystanych materiałów, dokumentacji, jak również sposobu przeprowadzania poszczególnych etapów rozgrywanych zawodów.

3.2.Wykorzystywane zawieszenie

Dla badanego obiektu jakim jest zawieszenie Formuły Student, ważne są następujące wymagania regulaminu:

- Zawieszenie w pełni niezależne,
- Maksymalny skok zawieszenia wynosi 50,4mm,
- Rozstaw kół obu osi może różnić się maksymalnie o 25%,
- Elementy zawieszenia powinny być widoczne dla sędziów podczas badań technicznych zawodów.

W przypadku badanego pojazdu zawieszenie składa się z podwójnych wahaczy poprzecznych, tłumika ze sprężyną i stabilizatora dla każdej z osi pojazdu.



Rys.3.1. Samochód Formuła Student zbudowany na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej

Ciekawym zagadnieniem w konstrukcji wykorzystanego zawieszenia jest zastosowanie pojedynczej sprężyny i tłumika na każdą z osi pojazdu. Zauważmy przy tym, że elementy przedniego i tylnego zawieszenia są jednakowe, a przez co wymienne. Daje to możliwość zmniejszenia kosztów ewentualnych elementów naprawczych, oraz pełną zamienność części, zunifikowanie ich.

Konsekwencją stosowania wybranej konstrukcji jest konieczność zastosowania stabilizatora dla każdej z osi pojazdu. Stabilizator pełni funkcję nie tylko redukującą przechyły nadwozia przy jeździe po łuku, ale przede wszystkim zapewnia stateczność układu zawieszenia. Konstrukcja ta widoczna jest na rysunku 3.2.



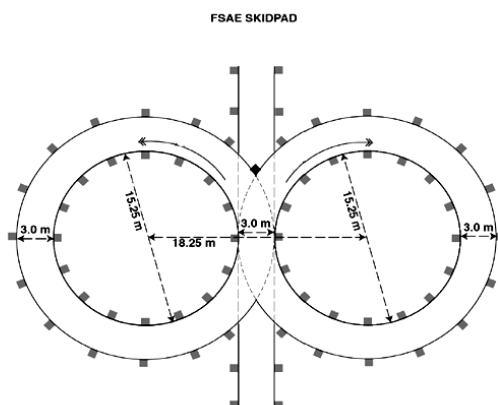
Rys.3.2. Zawieszenie badanego pojazdu

3.3. Tor badawczy

Zawody Formuły Student rozgrywane są między innymi na torze zwanym z angielskiego „skidpad”. Wymiary toru i ułożenie jest zgodne z rysunkiem 3.3. Pojazd przejeżdża dwa razy każdy z okręgów „ósemki”. Dookoła każdego z okręgów ułożonych jest po 16 słupków, między którymi musi zmieścić się samochód, w razie potrącenia

któregokolwiek ze słupków drużyna dostaje karne 0,25 sekundy do ostatecznego czasu przejazdu. Można wykonać po dwa przejazdy przez dwóch kierowców. Mierzone jest przyspieszenie boczne i czas przejazdu. Minimalne przyspieszenie boczne powinno wynosić 0,9 przyspieszenia ziemskiego, co koresponduje z czasem 6,184 sekundy na każde z okrążeń. Jeżeli czas okrążenia jednego okręgu będzie niższy to drużyna uzyskuje dodatkowe 2,5 punktu do ostatecznego wyniku.

Tor z rysunku 3.3. został opisany za pomocą współrzędnej linii środkowej toru w programie MSC.ADAMS. Środek masy pojazdu porusza się po opisanej linii środkowej toru, chyba, że działają na pojazd zbyt duże siły, wtedy opuszcza zadaną trajektorię i stara się do niej powrócić gdy siły ulegną zmniejszeniu. Wybrano właśnie tą konkurencję zawodów, gdyż jest ona wymagająca dla zawieszenia pojazdu.



Rys.3.3. Tor badawczy o kształcie cyfry osiem[4]

4.Badania symulacyjne

Badania zostały przeprowadzone w programie MSC.ADAMS/Car, posłużono się modelem samochodu przedstawionym w rozdziale 2.2. Symulacje przeprowadzono na torze opisanym w rozdziale 3.3.

Regulamin zawodów określa przyspieszenie boczne osiągnięte przez pojazd i czas przejazdu okrążenia toru, znane też są wymiary toru, dzięki czemu możliwe jest obliczenie teoretycznej prędkości, która zapewni spełnienie regulaminu.

Obliczenia przedstawiono poniżej:

$$\text{Średnica toru:} \quad (4.1)$$

$$\text{Promień toru:} \quad - \quad (4.2)$$

$$\text{Przyspieszenie boczne narzucone:} \quad - \quad (4.3)$$

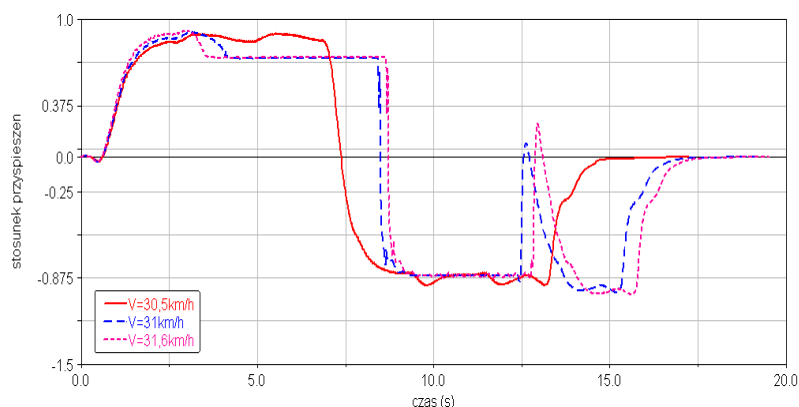
$$\text{Wzór na przyspieszenie boczne:} \quad - \quad (4.4)$$

$$\text{Wzór na prędkość pojazdu:} \quad - \quad (4.5)$$

$$\text{Prędkość ostatecznie wynosi:} \quad - \quad - \quad (4.6)$$

Prędkość obliczona wzorami 4.1 – 4.6 stała się podstawową prędkością jazdy pojazdu w czasie badań symulacyjnych. Przeprowadzono serię symulacji przejazdu toru z różnymi prędkościami, tak aby osiągnąć jak najmniejsze poślizgi boczne, oraz spełnić regulamin zawodów, czyli osiągnąć zadane przyspieszenie boczne.

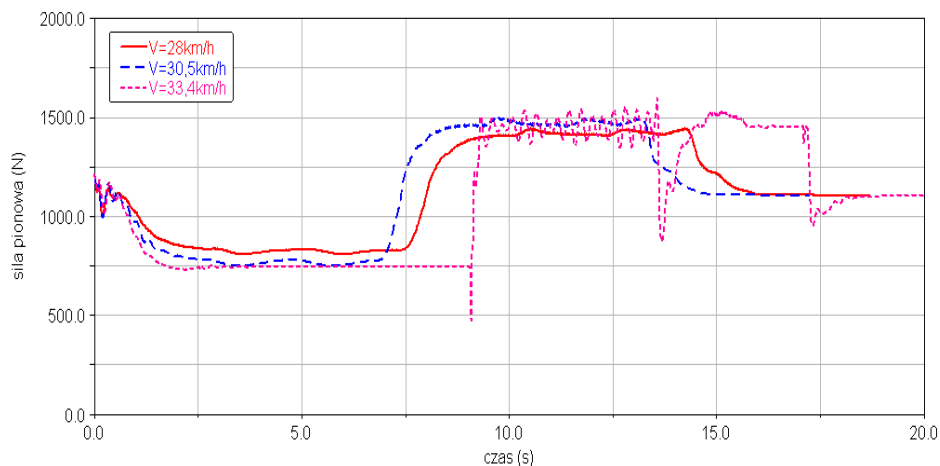
Na wykresach porównano przejazdy z prędkością obliczoną z danych regulaminowych i najodpowiedniejszą prędkością przejazdu wyznaczoną po serii badań.



Rys.4.1. Przyspieszenia boczne działające na pojazd podczas przejazdu z prędkościami 30,5; 31 oraz 31,6 km/h[2]

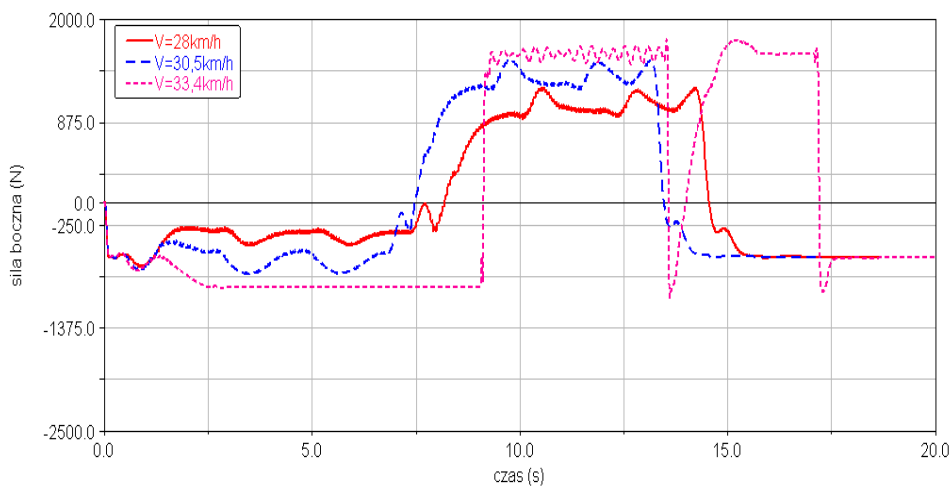
Przyspieszenia boczne osiągnane przez pojazd dla każdej z przedstawionych prędkości są zgodne z wymaganiami regulaminu zawodów. Jednak dla prędkości 31 i 31,6 km/h widoczne są duże zmiany przyspieszeń wynikające z konieczności korekty obranego toru jazdy. Prędkością optymalną dla przejazdu toru jest 30,5 km/h.

Aby unaocznić różnice w oddziaływaniu sił na pojazd przy przejazdach z różnymi prędkościami, zdecydowano się na analizę wyników przejazdów kolejno z prędkościami: 28; 30,5 oraz 33,4 km/h.

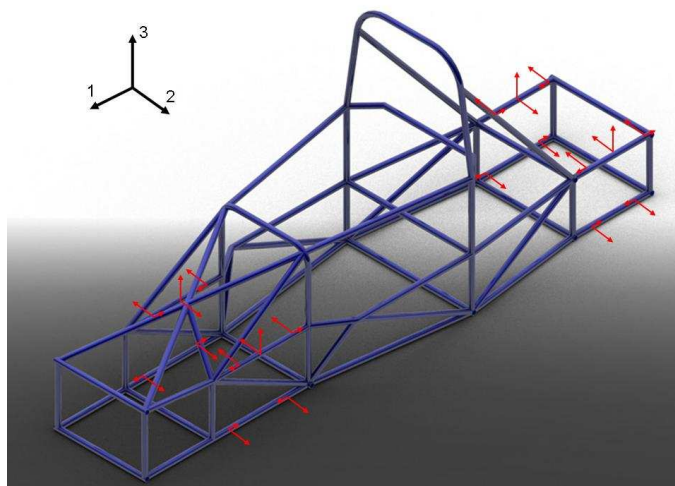


Rys.4.2. Siły pionowe działające w miejscu mocowania dolnego wahacza do zwrotnicy podczas przejazdów z zadanymi prędkościami[2]

Widoczne są duże zmiany sił podczas przejazdu z największą prędkością, wynika to z dużych poślizgów kół i konieczności korekcy toru jazdy przez kierowcę. Natomiast w przypadku prędkości optymalnej, jaką jest 30,5km/h oraz niższych prędkości wykres sił prezentują się gładszą charakterystyką. Podobnie jest w przypadku sił poprzecznych przedstawionych na rysunku 4.3.



Rys.4.3. Siły poprzeczne, boczne działające w punkcie mocowania wahacza dolnego[2]



Rys.4.4. Siły obciążające ramę, pochodzące od zawieszenia, wyznaczone podczas jazdy po łuku toru zgodnego z regulaminem zawodów[1]

Przedstawiony na rysunku 4.4. model obciążenia ramy pojazdu Formula Student wynika z przeliczenia sił działających w miejscu mocowania dolnego wahacza do zwrotnicy, na siły działające w miejscu mocowania wahaczy do ramy. Było to możliwe, gdyż wymiary geometryczne zawieszenia są znane, podobnie jak miejsca geometryczne mocowań wahaczy.

5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania symulacyjne pojazdu typu Formula Student umożliwiły znalezienie odpowiedniej prędkości przejazdu toru zawodów przy spełnieniu wymagań regulaminu.

Badania z wykorzystaniem programu MSC.ADAMS uwzględniają nieliniowy charakter zawieszonych pojazdów. Pozwalają na pełną powtarzalność wyników i łatwość modyfikacji parametrów brzegowych i początkowych.

Wyznaczone siły podczas badań dynamiki pojazdu poruszającego się po torze zostały wykorzystane do obciążenia ramy pojazdu przy okazji obliczeń metodą elementów skończonych.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Hoffman, G.: Praca magisterska. Politechnika Warszawska 2009.
- [2] Nowak, R.: Praca magisterska. Politechnika Warszawska 2009.
- [3] Pacejka, H.: Tire and Vehicle Dynamics. Delf University of Technology.
- [4] 2009 Formula SAE Rules [online]. SAE International, 2008. [dostęp: 2009-05-15].
Dostępny w Internecie:
<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2009fsaerules.pdf>.