

Bartłomiej LOREK, Rafał BERNAT, Mariusz KOSOBUDZKI*

DOI: https://doi.org/10.37190/JoT2022_04

ANALIZA BUDOWY I DZIAŁANIA UKŁADU ZAWIESZENIA ŁAZIKA SCORPIO X

Słowa kluczowe: *łazik, Mars, pojazd off-road, zawieszenie, Scorpio, Rover Challenge, URC*

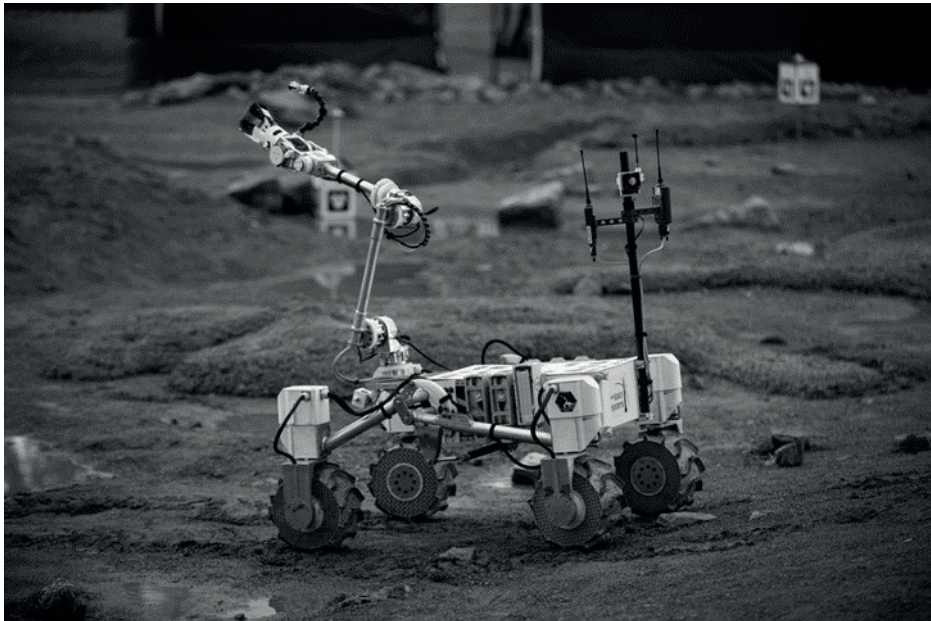
W artykule przedstawiono charakterystykę konstrukcji układu zawieszenia zależnego pojazdu wysokiej mobilności Scorpio X, skonstruowanego na potrzeby uczestniczenia w zawodach łazików marsjańskich serii Rover Challenge. Przedstawiono i omówiono podstawowe wymagania regulaminowe zawodów oraz koncepcję zawieszenia pojazdu. Analizy ograniczono do wybranych warunków ruchu pojazdu, tj. pokonywania pojedynczej przeszkody terenowej. Wyznaczono przełożenie kinematyczne w przyjętym układzie zawieszenia oraz poddano analizie wartości sił, jakie oddziałują na elementy zawieszenia. Obliczono wartości odkształceń elementów zawieszenia i ramy pojazdu. Przedstawiono również wnioski z użytkowania pojazdu i wymagane zmiany jakie należy wprowadzić do kolejnej wersji pojazdu.

1. WSTĘP

Scorpio X jest pojazdem off-road, skonstruowanym przez studentów zrzeszonych w Kole Naukowym Pojazdów Niekonwencjonalnych Off-Road, działającym przy Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn i Układów Mechatronicznych Politechniki Wrocławskiej. Podstawowym celem prac studentów nad łazikiem była chęć brania udziału w rywalizacji z innymi drużynami studenckimi w zawodach serii Rover Challenge. Najbardziej prestiżowymi zawodami serii RC są zawody University Rover Challenge organizowane przez Mars Society. W zawodach tych łaziki marsjańskie wykonują misje w warunkach zbliżonych do tych panujących na Księżycu i na Marsie. Miejscem organizacji zawodów są często tereny pustyń kamienistych lub specjalnie przygotowane poligony o podobnym rodzaju powierzchni i ukształtowania. Wymaga to od pojazdów posiadania cech funkcjonalnych pozwalających na jazdę po podłożu szutrowym, poprzecinanym koleinami, wąwozami, czy wyschniętymi korytami rzek, na którym losowo znajdują się odłamki skał i rozpadlin. Od pojazdu wymaga się, żeby zachował zdolność jazdy w tych warunkach oraz wykonywania zadań ustalonych przez organizatorów zawodów. Przykład takiego pojazdu przedstawiono na rysunku 1.

* Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Układów Mechatronicznych, Politechnika Wrocławska

Zbudowanie pojazdu, który jest w stanie poruszać się po niesprzyjającym terenie oraz rywalizować z innymi konstrukcjami jest dużym osiągnięciem. Natomiast chęć rozwoju i poprawienia konstrukcji jest tym czym na co dzień zajmują się studenci. Przed przystąpieniem do projektowania następcy Scorpio X należy zbadać aktualny pojazd i na podstawie tych analiz wyciągnąć wnioski, które pozwolą zbudować lepszy pojazd. Celem analiz opisanych w tym artykule jest sprawdzenie zachowania się zawieszenia pod obciążeniem oraz oddziaływanie na ramę pojazdu. Poznania jego limitów, słabych oraz mocnych stron, jak również wyznaczenie elementów do poprawy.



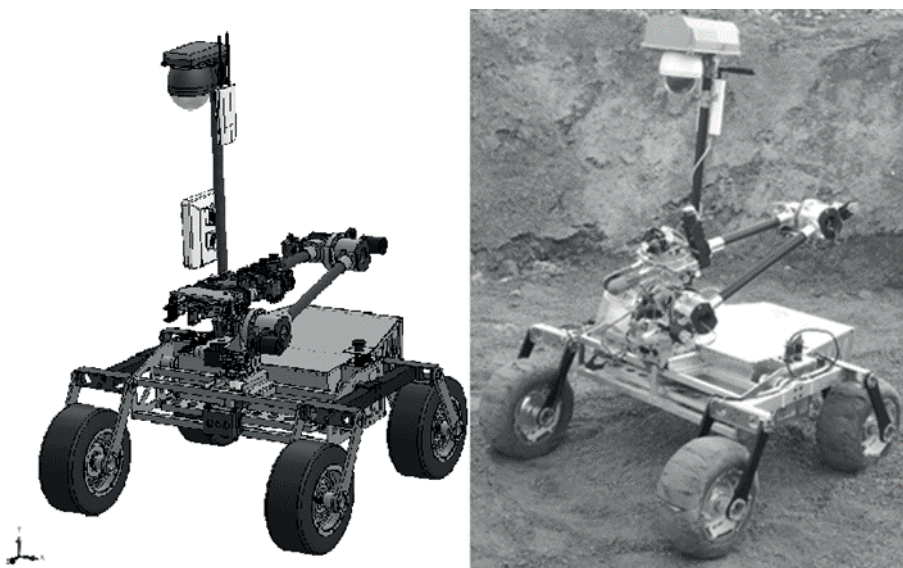
Rys. 1. Pojazd skonstruowany przez drużynę AGH Space System biorący udział w zawodach European Rover Challenge w roku 2022

Fig. 1. Vehicle constructed by the AGH Space System team taking part in the European Rover Challenge in 2022

2. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE POJAZDU SCORPIO XLUSTRACJE

Konstruowany pojazd musi spełniać ograniczenia narzucone przez regulaminy zawodów. Podstawowymi ograniczeniami są wymiary zewnętrzne i masa łazika. Gotowa konstrukcja musi zmieścić się w sześciacie o krawędzi 1200 mm oraz nie przekraczać masy 50 kg [1]. W praktyce konstrukcja pojazdu wymaga wykorzystania podwozia kołowego pojazdu z układem jezdny z czterema lub sześcioma kołami, napędu wszystkich kół, układu zawieszenia pozwalającego na pokonywanie przeszkód o wysokości ok. 300 mm, realizacji wjazdu i zjazdu na wzniesienia o kącie nachylenia do 30 stopni

[2] oraz możliwości realizacji skrętów na małej przestrzeni, często ograniczonej obecnością kamieni i skał. W celu wykonania zadań wyznaczonych przez organizatorów zawodów, łazik musi być wyposażony w manipulator, który umożliwia podnoszenie narzędzi, pobranie próbek i wiele innych. Moduł ten w istotny sposób podnosi położenie środka ciężkości pojazdu, co pogarsza własności terenowe pojazdu. Pojazdem, który posiada wymagane funkcjonalności jest również Scorpio X, przygotowany przez studentów koła Off-Road do zawodów w latach 2019 – 2022, który został przedstawiony na rysunku 2.



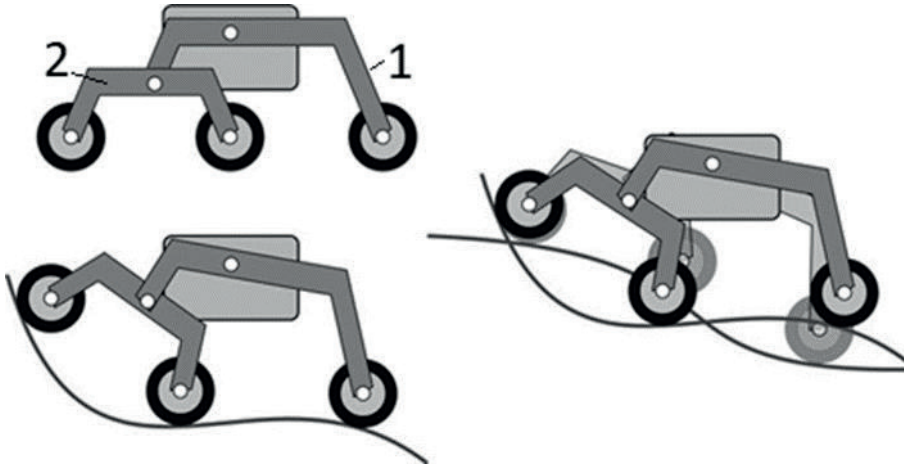
Rys. 2. Pojazd Scorpio X skonstruowany przez studentów KN Off-Road biorący udział w zawodach European Rover Challenge w roku 2019 (po lewej stronie – model wirtualny, po prawej stronie – zdjęcie pojazdu)

Fig. 2. Scorpio X vehicle constructed by KN Off-Road students, taking part in the European Rover Challenge in 2019 (left - virtual model, right - photo of the vehicle)

3. BUDOWA UKŁADU ZAWIESZENIA SCORPIO X

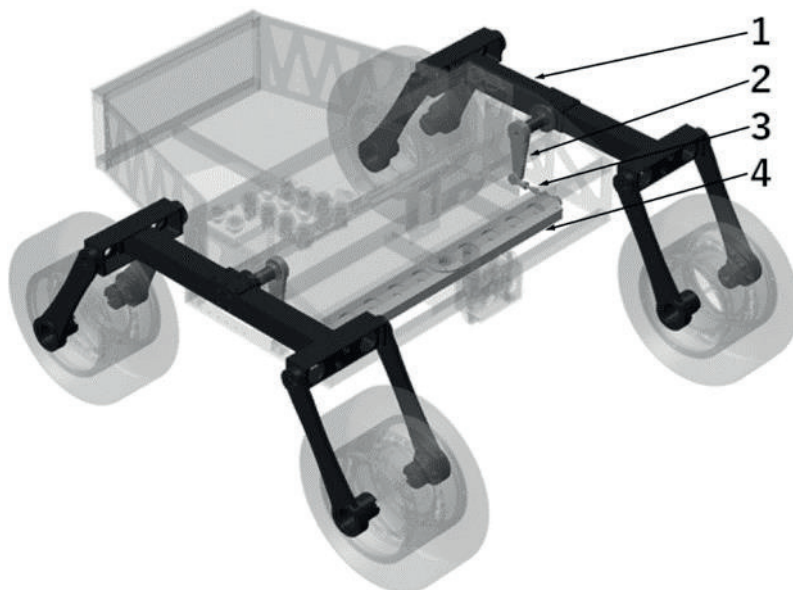
Koncepcja układu zawieszenia, razem z koncepcją układu napędowego i skrętu decyduje w największym stopniu o cechach użytkowych pojazdu. W Scorpio X zdecydowano się na układ zawieszenia, nazywany rocker – boogie, który jest wykorzystywany przez Amerykańską Agencję Kosmiczną NASA w swoich konstrukcjach Curiosity czy Perseverance. W podstawowej wersji jest to układ 6 kołowy (rysunek 3), w tym przypadku zastąpiono tylny wózek kołem. Co w znaczącym stopniu wpływa na uproszczenie konstrukcji oraz redukcję masy. W przypadku wolno poruszającej się konstrukcji jaką

jest łązik Scorpio X, prędkość maksymalna na poziomie 1.6 m/s, niezalecane jest stosowanie elementów podatnych w układzie zawieszenia [3].



Rys. 3. Schemat układu zawieszenia rocker - boogie. 1 - rocker (wahacz), 2 - boogie (wózek)
 Fig. 3. Diagram of the rocker - boogie suspension system. 1 - rocker, 2 - boogie

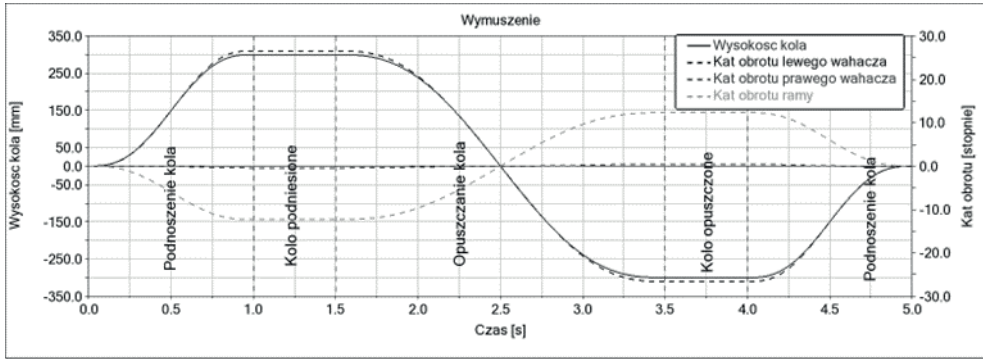
Podstawowymi elementami składowymi układu są: zespoły zawieszenia, na które składają się wahacze kół połączone sztywną belką, która zamocowana jest obrotowo w ramie pojazdu oraz belki dyferencyjnej, której działanie polega na przeniesieniu obrotu jednego zespołu zawieszenia na drugie. Jest to przykład zawieszenia zależnego, tzn. przemieszczenia kół po jednej stronie powodują ruch kół po drugiej stronie oraz wymuszają ruch całego pojazdu. Dopuszczalny obrót każdego zespołu zawieszenia, a pośrednio belki dyferencyjnej zależny jest od przyjętych przełożeń kinematycznych pomiędzy tymi podzespołami i wynika z przyjętych założeń dotyczących zakładanych wysokości pokonywanych przeszkód terenowych oraz ograniczeń wynikających m.in. z wymiarów ramy pojazdu i dostępnych przestrzeni do ruchu elementów pośredniczących. Rozmieszczenie elementów układu zawieszenia Scorpio X zostało przedstawione na rysunku 4. Masa wskazanych elementów zawieszenia wynosi 4,5 kg co stanowi 10 % masy całego pojazdu.



Rys. 4 Elementy układu zawieszenia Scorpio X (1 - lewy zespół zawieszenia z wahaczami, 2 - dźwignia, 3 - popychacz, 4 - belka dyferencyjna)
 Fig. 4 Scorpio X suspension system components (1 - left suspension unit with rockers, 2 - lever, 3 - pusher, 4 - differential beam)

4. ANALIZA DZIAŁANIA UKŁADU ZAWIESZENIA SCORPIO X

Koncepcja zawieszenia zaimplementowana do pojazdu Scorpio X jest efektywna w działaniu, lekka, trwała i niezawodna. Zawieszenie to posiada jeszcze jedną ważną cechę, tzn. zapewnia stałe obciążenie każdego koła podczas jazdy po podłożu oraz w czasie pokonywania przeszkód terenowych. Ryzyko utraty kontaktu koła z podłożem zostało wyeliminowane, co zapewnia stateczność położenia i minimalizację ryzyka wywrócenia się pojazdu. Przełożenie kinematyczne pomiędzy układem zawieszenia a ramą pojazdu wynosi $i=1/2$, tzn. wjazd jednym kołem na pojedynczą przeszkodę o wysokości $h=300$ [mm] powoduje obrót lewego zespołu zawieszenia względem podłoża o kąt $\varphi_L=26$ [°], obrót belki dyferencyjnej względem ramy pojazdu o kąt $\varphi_D=4,5$ [°], obrót ramy pojazdu względem podłoża o kąt $\varphi_{RW}=\varphi_L/2$ [°] oraz obrót prawego zespołu zawieszenia względem lewego o kąt $\varphi_P=-\varphi_L$ (czyli zespół prawy nie obraca się względem podłoża). Dodatkowo podczas pokonywania przeszkody rama pojazdu obraca się (przechyla) w płaszczyźnie poprzecznej o kąt $\varphi_{RP}=12$ [°], co jest zjawiskiem niekorzystnym. Wartość kąta przechyłu zmniejsza się wraz ze wzrostem rozstawu kół i osi pojazdu, ale te wymiary są ograniczone regulaminami zawodów i dla omawianego pojazdu osiągają wartości minimalne. Przebieg przemieszczeń względnych elementów układu zawieszenia oraz ramy przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przemieszczenia elementów układu zawieszenia podczas przejazdu przez przeszkodę terenową o wysokości $h = 300$ mm

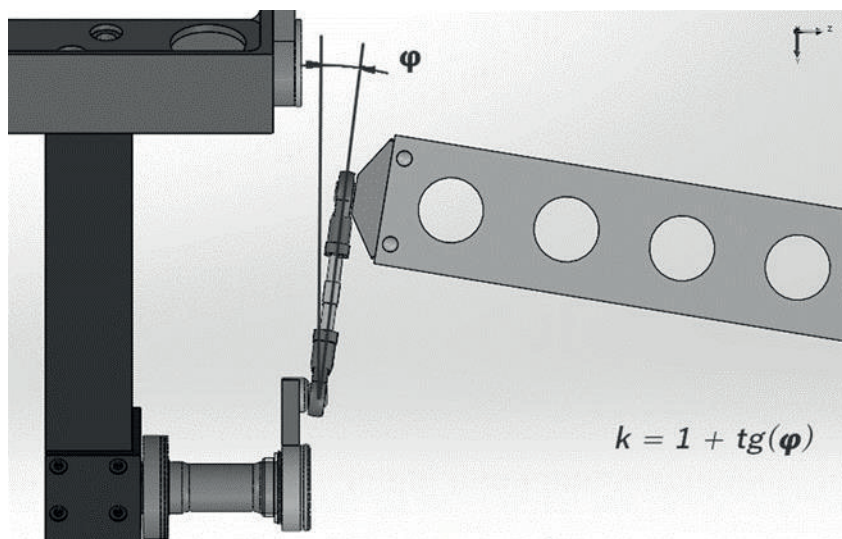
Fig. 5. The displacements of the suspension system components while driving over a terrain obstacle with a height of $h = 300$ mm

5. ANALIZA OBCIĄŻEŃ W UKŁADZIE ZAWIESZENIA

Lokalne przełożenia kinematyczne pomiędzy elementami układu zawieszenia modyfikują wartości sił przekazywanych przez te elementy, a w efekcie prowadzą do ich chwilowego odkształcenia. Powstające odkształcenia wpływają na chwilowe wartości przełożeń kinematycznych i w niektórych przypadkach mogą doprowadzać do pozornej zmiany przełożenia w całym układzie zawieszenia. Analizę odkształceń w układzie przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania do symulacji dynamiki wieloczołnowej [4]. W tym celu został stworzony model układu zawieszenia w programie MSC Adams. Została przeprowadzona symulacja wjazdu jednym kołem na przeszkodę wysokości 300 mm, a następnie wjazd w zagłębienie o głębokości również 300 mm.

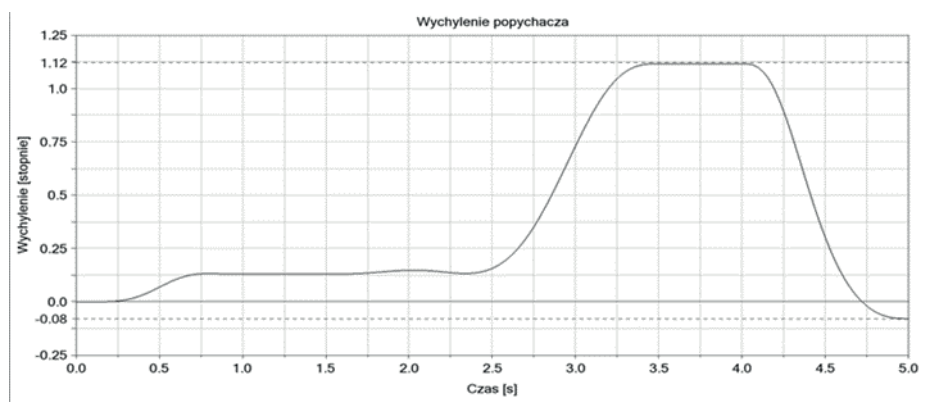
W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano wartości sił działających na belkę dyferencyjną poprzez popychacze oraz sił działających na ramę w miejscu węzła łożyskowego mocującego belkę dyferencyjną.

Podczas przejazdu przez przeszkodę i w efekcie obrotu belki dyferencyjnej popychacz, wyjściowo pracujący w płaszczyźnie wzdłużnej pojazdu, odchyła się o kąt φ , co zostało przedstawione na rysunku 6.



Rys. 6. Warunki współpracy popychacza i belki dyferencyjnej
 Fig. 6. Conditions of cooperation between a pusher and a differential beam

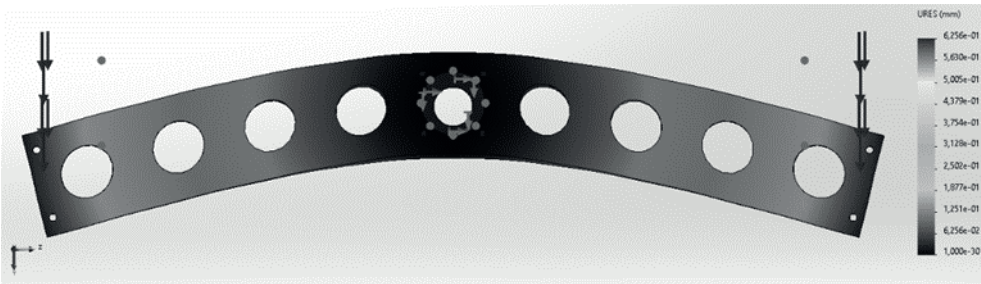
Powoduje to zwiększenie siły działającej na belkę. Powstające zwiększenie siły zależy od wartości współczynnika wzmocnienia $k=1+\operatorname{tg}\varphi$. Uwzględniając rzeczywiste wymiary elementów układu zawieszenia w pojeździe Scorpio X, wartość współczynnika wzmocnienia wynosi $k=1,021$ dla maksymalnej dopuszczalnej wartości kąta $\varphi=1,2$ [°]. Przebieg zmian wartości kąta φ został przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Przebieg zmian wartości kąta φ podczas przejazdu przez przeszkodę o wysokości $h = 300$ mm

Fig. 7. The course of changes in the value of the angle φ while driving through an obstacle with a height of $h = 300$ mm

Podobny co do skutków efekt wprowadza odkształcenie belki dyferencyjnej. Element ten o przekroju 60x20x2 mm był wykonany z aluminium 6061. W celu redukcji masy wykonano w nim 8 przelotowych otworów o średnicy 30 mm. Na rysunku 8 przedstawiono odkształcenie belki obciążonej siłą wynikającą z przejazdu pojazdu przez przeszkodę. Analizę MES przeprowadzono w programie SolidWorks. Na badany element nałożona została siatka TETRA 10 o krawędzi 2mm [5]. Warunki brzegowe ustalone zostały na podstawie analizy SDW w wyniku czego belka została utwierdzona w centralnej jej części, w miejscu łożyskowania. Siły działające na jej końcach o wartości 200 N, przyłożone zostały w miejscu oddziaływania popychaczy zgodnie z poniższym rysunkiem.



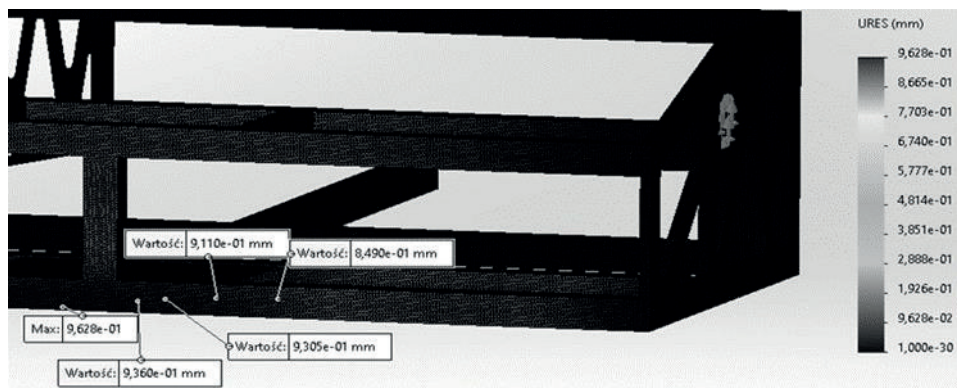
Rys. 8. Reakcja belki dyferencyjnej podczas przejazdu przez nierówność o wysokości $h = 300$ mm
 Fig. 8. The reaction of the differential beam when driving through an unevenness with a height of $h = 300$ mm

Maksymalne ugięcie belki, które wyniosło 0,63 mm powoduje, że układ zawieszenia może nie zareagować na najechanie dynamiczne na przeszkodę o wysokości 3,72 mm. Wtedy ruch ramy i nadwozia pojazdu nie zostanie wywołany pracą układu zawieszenia.

Obciążenia działające na belkę dyferencyjną przekazywane są poprzez jej ułożyskowanie na ramę pojazdu. Wymaga się, aby ten podzespół był lekki oraz odpowiednio sztywny. Ramę pojazdu Scorpio X, której masa wynosi 3 kg, zbudowano z profili o przekroju 20x20x1,5 mm oraz blach o grubości 5 mm. Materiał, z którego wykonano konstrukcję to aluminium 6061. Przy konstruowaniu ramy, poza zabiegami mającymi na celu minimalizację jej masy, kierowano się również ograniczeniem jej deformacji wywołanych przez zmienne siły pochodzące od układu zawieszenia pojazdu. W celu określenia sił działających na konstrukcję nośną wykorzystano analizę SDW przeprowadzoną w programie MSC Adams. Siły te zostały następnie wykorzystane w modelu obliczeniowym MES wykonanym w programie SolidWorks. Jako warunki brzegowe przyjęto:

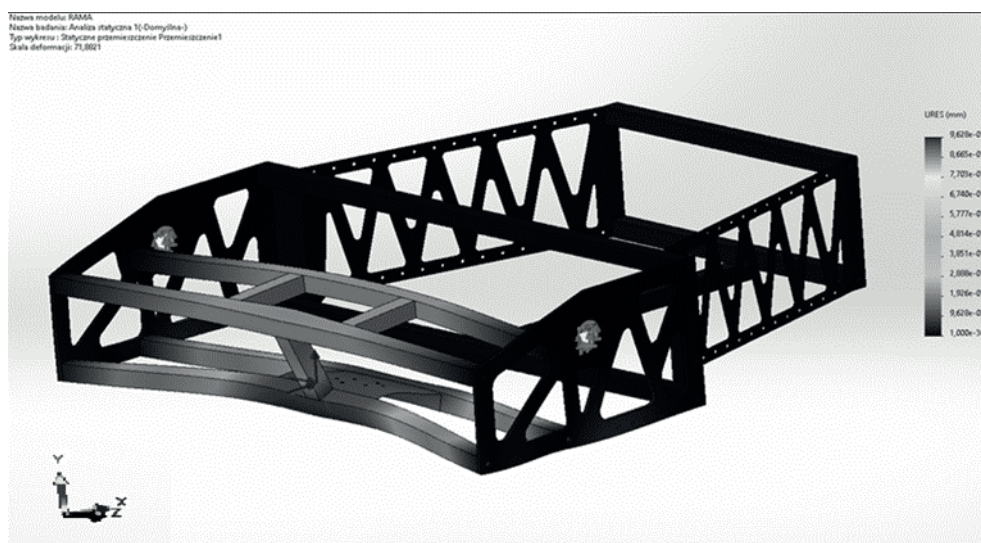
- utwierdzenie ramy w miejscach łożyskowania wahaczy,
- trójosiowy stan obciążenia przyłożony w miejscu łożyskowania belki dyferencyjnej, wzdłuż poszczególnych osi zostały przyłożone siły, wzdłuż osi X 500N, Y 30 N a osi Z 15 N.

Na rysunku 9 przedstawiono widok siatki z elementów skończonych typu TETRA 10 o długości krawędzi 1,5 mm, naniesiony na geometrie ramy pojazdu.



Rys. 9. Widok siatki z elementów skończonych nałożony na geometrię ramy pojazdu
Fig. 9. View of the finite element mesh superimposed on the geometry of the vehicle frame

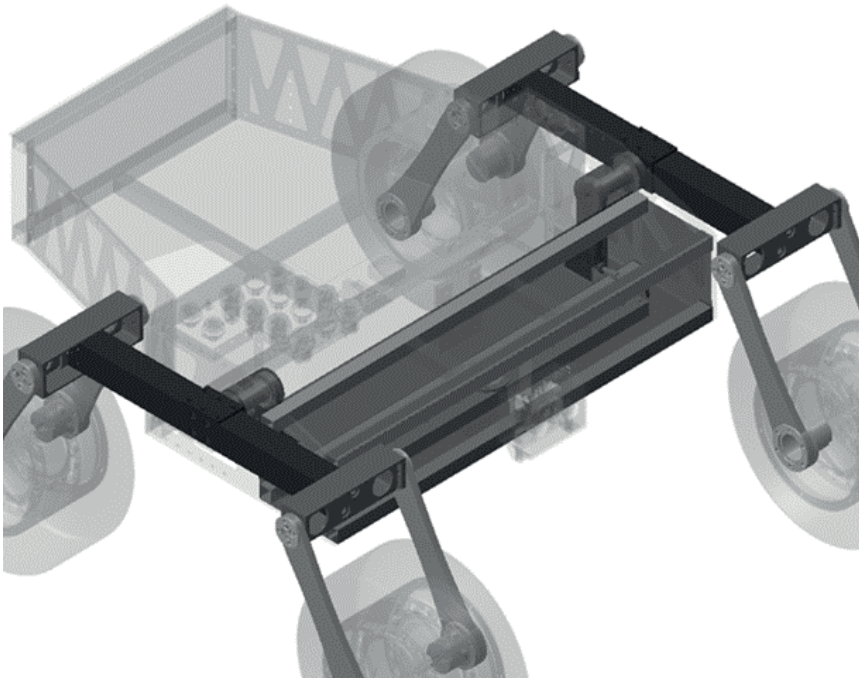
Po przeprowadzeniu obliczeń uzyskano mapę przemieszczeń ramy, co zostało przedstawione na rysunku 10.



Rys. 10. Przemieszczenia ramy spowodowane obciążeniami powstającymi podczas pokonywania nierówności o wysokości $h = 300$ mm
Fig. 10. Frame displacements caused by loads arising while overcoming unevenness with a height of $h = 300$ mm

6. MASA I WYIMARY UKŁADU ZAWIESZENIA POJAZDU SCORPIO X

Przyjęta koncepcja układu zawieszenia pojazdu Scorpio X, a następnie wykonany projekt do zakładanych warunków ruchu musiał spełniać również ograniczenia masowe i wymiarowe, wynikające z regulaminów zawodów serii Rover Challenge [6, 7]. Ostatecznie masa całkowita Scorpio X wynosiła 45 kg, w tym masa elementów zawieszenia 4,5 kg, co stanowi 10 %, natomiast masa samego mechanizmu dyferencyjnego (belka i jej łożyskowanie) wynosi 530 g, co stanowi 1,2 % masy całego pojazdu. Umieszczenie belki dyferencyjnej pracującej w płaszczyźnie poziomej z przodu pojazdu oraz konieczność jej ochrony przed przeszkodami terenowymi spowodował jednak podjęcie decyzji o umieszczeniu jej w chronionej prostopadłościenniej przestrzeni (klatce), zaznaczonej na rysunku 11 kolorem czerwonym. Objętość ta wyniosła 12,1 dm³. Ponadto, uwzględniając powstające podczas jazdy odkształcenia belki, koniecznym stało się wprowadzenie odsunięcia jej dolnej płaszczyzny od dolnej powierzchni klatki. Spowodowało to trudności w odpowiednim łożyskowaniu belki.



Rys. 11. Rozmieszczenie elementów układu zawieszenia pojazdu Scorpio X
Fig. 11. Location of Scorpio X suspension system components

7. PODSUMOWANIE

Przyjęta koncepcja takiego rozwiązania układu zawieszenia pojazdu spowodowała, że wydłużeniu uległa rama pojazdu, co samo w sobie było niekorzystne. Ponadto, górna powierzchnia zajęta przez klatkę została wskazana jako dobre miejsce montażu manipulatora. Problemem było jednak poprowadzenie przewodów do sterowania pracą manipulatora, które musiały omijać przestrzeń zajętą przez belkę dyferencyjną. Ponadto okazało się, że umieszczenie podstawy manipulatora blisko osi obrotu układu wahaczy powodowało możliwość pojawienia się niekontrolowanych ruchów nadwozia wraz z przemieszczającym się manipulatorem i ładunkiem. Uznano również że powstające odkształcenia elementów zawieszenia były zbyt duże, a wpływ odkształceń na kinematykę pracy układu zawieszenia był negatywny. Dodatkowo znaleziony został obszar podatny na redukcję masy. Krytyczne wnioski nie zmieniają jednak pozytywnej oceny całego pojazdu. Osiągnięto możliwość pokonywania przeszkód terenowych o wysokości dochodzącej do 350 mm. Pokonywanie wzniesień wyniosło 35 stopni. Wszystkie wymagania regulaminowe zostały spełnione. Wnioski z prac nad wersją Scorpio X zostały uwzględnione w kolejnej wersji pojazdu, tj. Scorpio 7.

LITERATURA

- [1] Regulamin zawodów Canadian International Rover Challenge: <https://circ.cstag.ca/2022/rules/> (dostęp: 26.10.2022).
- [2] Regulamin zawodów University Rover Challenge: <https://urc.marssociety.org/home/requirements-guidelines> (dostęp: 26.10.2022).
- [3] SANDIN PAUL E., *Robot Mechanism and Mechanical Devices Illustrated*, 2003.
- [4] MILLER S., *Teoria maszyn i mechanizmów. Analiza układów mechanicznych*, Oficyna wydawnicza PWr. Wrocław, 1996.
- [5] RUSIŃSKI E., CZMOCHOWSKI J., SMOLNICKI T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław, 2000.
- [6] KRZEMIŃSKI A., KOSOBUDZKI M., *Wstępna analiza wymagań stawianych kołom jezdny do pojazdu wysokiej mobilności*, Journal of Translogistics, 2020, Vol. 6, No.1.
- [7] MCCONVILLE J., *Introduction to Mechanical System Simulation Using Adams*, 2015.

ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND OPERATION OF THE SCORPIO X ROVER SUSPENSION SYSTEM

Key words: rover, Mars, off-road vehicle, suspension, Scorpio, Rover Challenge, URC

The article presents the characteristics of the structure of the dependent suspension system of the Scorpio X high-mobility vehicle, constructed for the purpose of participating in the competition of Mars rovers of the Rover Challenge series. The basic regulatory requirements of the competition and the concept of the vehicle suspension were presented and discussed. The analyses were limited to selected vehicle motion conditions, i.e. negotiating a single terrain obstacle. The kinematic ratio in the adopted

suspension system was determined, and the values of forces that affect the suspension elements were analyzed. The deformation values of the suspension elements and the vehicle frame were calculated. The conclusions from the use of the vehicle and the required changes to be made to the next version of the vehicle were also presented.

Corresponding author:

e-mail: bartek.lorek2@gmail.com