

Marian J. ŁOPATKA<sup>1</sup>  
Tomasz MUSZYŃSKI<sup>2</sup>  
Mirosław PRZYBYSZ<sup>3</sup>  
Rafał TYPIAK<sup>4</sup>

### **WPLYW STEROWANIA SPRZĘGIEM HYDROSTATYCZNYM NA MOŻLIWOŚCI TRAKCYJNE POJAZDU WYSOKIEJ MOBILNOŚCI**

*W referacie przedstawiono koncepcje dwuczłonowej bezzatłogowej platformy lądowej (BPL) wysokiej mobilności wyposażony w hydrostatycznie sterowany sprzęg. Sprzęg ten jest odpowiedzialny za realizację procesu skrętu oraz poprawę stateczności pojazdu podczas pokonywania przeszkód terenowych i pracy zainstalowanymi na nim osprzętami. Główną ideą przy opracowaniu tego zespołu było zapewnienie uzyskania przez BPL wysokiej zdolności pokonywania przeszkód terenowych i dużej zwrotności. W referacie zwrócono uwagę na problem mobilności w aspekcie pokonywania przeszkód pionowych.*

### **HYDROSTATIC COUPLE CONTROL INFLUENCE ON TRACTION HIGHT MOBILITY VEHICLE**

*In this article are presented idea of high mobility two segments Unmanned Ground Vehicle (UGV) equipped with hydrostatic steering coupler. Coupler enable steering and increases stability while overcoming obstacles and working with attachments. The main idea of its development was ensure UGV minimum turning radius and high to overcome terrain obstacles. In this paper is taken into consideration mobility problem of overcoming vertical obstacles.*

## **1. WSTĘP**

Robotyzacja zadań transportowych w strefach niebezpiecznych oraz trudnych warunkach terenowych podyktowana jest dążeniem do maksymalizacji bezpieczeństwa ludzi

---

<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa; ul. Kaliskiego 2  
tel: +48 22 683 96 16, e-mail: mlopatka@wat.edu.pl

<sup>2</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa; ul. Kaliskiego 2  
tel: +48 22 683 71 07, e-mail: tmuszynski@wat.edu.pl

<sup>3</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa; ul. Kaliskiego 2  
tel: +48 22 683 74 16, e-mail: mprzybysz@wat.edu.pl

<sup>4</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa; ul. Kaliskiego 2  
tel: +48 22 683 73 06, e-mail: rtypiak@wat.edu.pl

poprzez ich oddalenie od obszarów zagrożenia oraz zwiększeniem efektywności tych działań [4].

Przewiduje się, że pojazdy realizujące takie zadania muszą posiadać zdolność do poruszania się po bezdrożach, w trudnym i zróżnicowanym terenie, w związku z czym sprecyzowane zostały wymagania odnośnie ich mobilności:

- pokonywanie terenu niskiej nośności z ładunkiem- pożądaną wartością jest  $CI=200\text{kPa}$  [2];
- pokonywanie pochyłości wzdłużnych rzędu 60% ( $31^\circ$ ) i poprzecznych powyżej 40% ( $23^\circ$ ) z zapasem stateczności rzędu 20%;
- pokonywanie relatywnie dużych przeszkód terenowych tj. wały ziemne, rowy, ścianki, gruzowiska, na poziomie nie gorszym od samochodów ciężarowo-terenowych [6].

Przyjmuje się, że ich ładowność powinna osiągać wartości porównywalne do typowych pojazdów ciężarowo-terenowych o masie 1500-3000kg, aktualnie stosowanych do transportu ładunków w trudnym terenie.

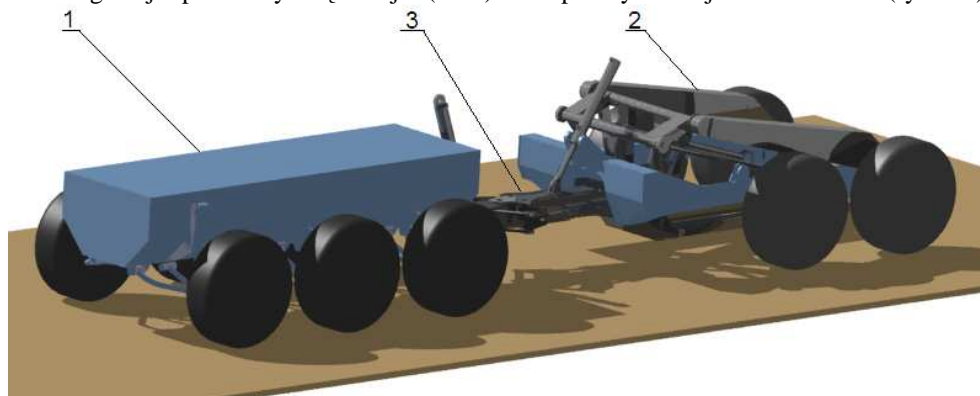
Zapewnienie możliwości spełnienia tak założonych oczekiwań wymaga:

- bardzo niskiego położenia środka ciężkości pojazdu wraz z ładunkiem w celu zapewnienia założonej stateczności;
- wieloosiowego układu jezdnego w celu zapewnienia dobrego rozkładu nacisków [7];
- dobrego dopasowania się układu jezdnego do nierówności terenowych w celu wykorzystania siły napędowej podczas pokonywania przeszkód terenowych;
- układu napędowego zdolnego do pracy przy dużych obciążeniach oraz rozwijającego prędkości pozwalające niezbędne do pokonywania przeszkód o znacznych gabarytach.

W wyniku tak sprecyzowanych wymagań stwierdzono, że typowe pojazdy ciężarowo-terenowe nie są w stanie spełnić założonych oczekiwań, co zdeterminowało konieczność poszukiwania nowych rozwiązań.

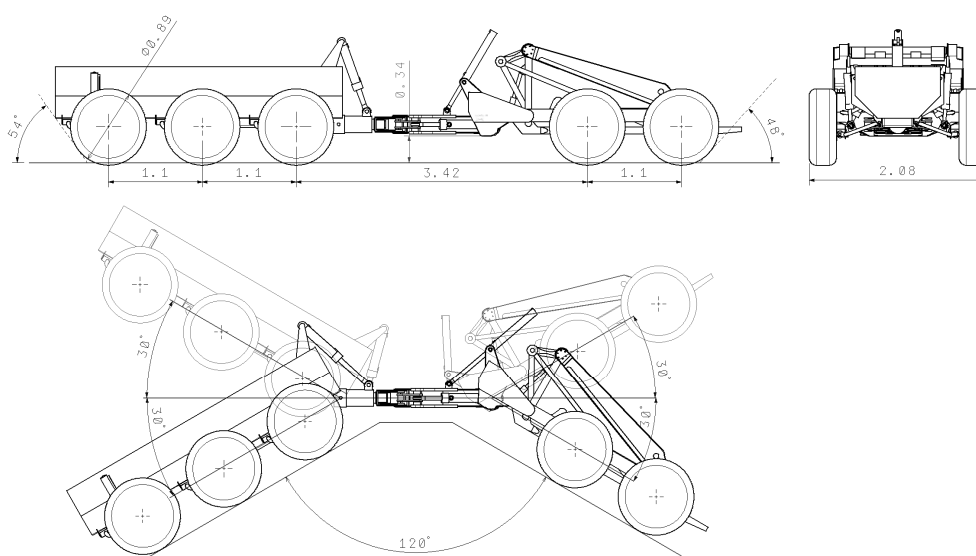
Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że w celu spełnienia powyższych wymagań pojazd powinien posiadać konstrukcję członową i wieloosiową w celu zapewnienia dobrej dystrybucji nacisków oraz siły napędowej niezbędnych do poruszania się po przeszkodach terenowych [1, 3].

W związku z tym w Katedrze Budowy Maszyn WAT opracowano koncepcję kołowej bezzałogowej platformy lądowej (BPL) o podwyższonej mobilności (rys. 1).



Rys. 1. Koncepcyjny pojazd członowy o podwyższonej mobilności: 1- człon przedni, 2- człon tylny, 3- sprzęg aktywny sterowany hydraulicznie

Zakłada ona wykorzystanie dwóch członów połączonych ze sobą aktywnym sprzęgiem. Pierwszy członów o masie własnej 3000kg jest przeznaczony do podejmowania i transportu ładunku do 1000kg, drugi natomiast o masie 2000kg, wyposażony w osprzęt widłowy służący do transportu ładunków spaletyzowanych o długości 2,5m i masie nie przekraczającej 2000kg.



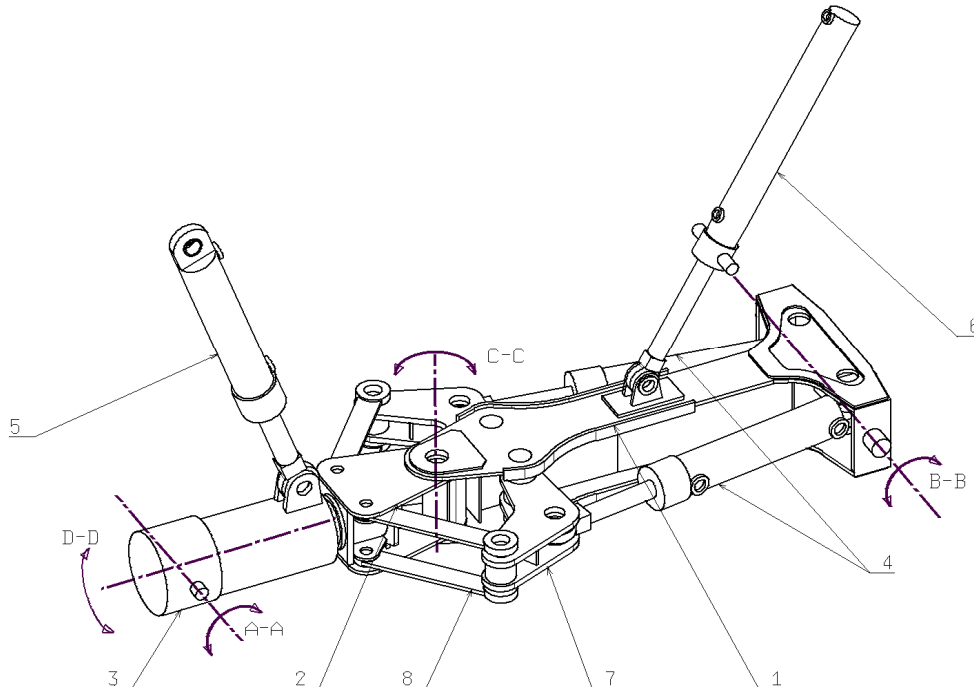
Rys. 2. Podstawowe wymiary pojazdu członowego

Dzięki budowie członowej przewiduje się, że platforma będzie cechowała się bardzo dobrym „kopiowaniem” terenu przy relatywnie małym skoku zawieszenia. Jest to szczególnie istotne dla zachowania odpowiedniego rozkładu nacisków zapewniających wykorzystanie siły napędowej na styku opona-podłoże podczas pokonywania przeszkód i nierówności terenowych. Kluczową rolę w pojeździe dla zwiększenia jego efektywności odgrywa sprzęg pojazdu sterowany hydraulicznie. Służy on do zwiększenia stateczności pojazdu podczas pracy zamontowanymi na nim osprzętami roboczymi oraz zwiększenie zdolności do pokonywania przeszkód terenowych. Sprzęg wspomaga także realizację procesu skrętu. Jego konstrukcja pozwala na uzyskanie kąta skrętu rzędu  $90^\circ$  co umożliwia wykonanie skrętu o promieniu ok. 4m. Dla lepszego dopasowania się pojazdu do nierówności terenowych sprzęg ma możliwość swobodnego obrotu względem osi wzdłużnej.

## 2. KONCEPCJA SPRZĘGU STEROWANEGO HYDRAULICZNIE

### 2.1 Budowa i zasada działania sprzęgu hydraulicznego

Koncepcję sprzęgu pokazano na rys. 3 natomiast zakres kątowy kinematyki ruchu przedstawiono w tab.1.



Rys. 3. Sprzęg hydrauliczny: 1- belka wzdłużna, 2- belka obrotowa, 3- korpus belki obrotowej, 4- siłowniki skrętu, 5- siłownik przedniego członu, 6- siłownik tylnego członu, 7,8- dźwignia pośrednia, A-A- oś obrotu sprzęgu względem członu przedniego, B-B- oś obrotu sprzęgu względem członu tylnego, C-C- oś skrętu członów, D-D- oś obrotu członu pierwszego i drugiego względem osi wzdłużnej

Tabela 1. Zakres ruchu sprzęgu względem poszczególnych osi

Oś	A-A	B-B	C-C	D-D
Zakres ruchu	+/- 30°	+/- 30°	+/- 90°	∞

Za pokonywanie przeszkód terenowych wymagających zaangażowania sprzęgu aktywnego odpowiadają siłowniki (5), (6). Odpowiednio siłownik (5) jest odpowiedzialny za sterowanie członem przednim realizując obrót sprzęgu do względem osi A-A, natomiast siłownik (6) w analogiczny sposób odpowiada za sterowanie członem tylnym wywołując obrót sprzęgu względem osi B-B. W procesie skrętu wykorzystuje się siłowniki (4), które oddziaływując na dźwignie (7) i (8), powodują skręt sprzęgu względem osi C-C wspomagając skręt członów względem siebie. Układ taki pozwala na osiągnięcie skrętu na poziomie 90° co jest niezwykle istotne dla osiągnięcia wymaganego promienia zawracania.

Łożyska zamontowane w korpusie dyszla obrotowego sprzęgu pozwalają na swobodny obrót członu przedniego względem tylnego wzdłuż osi D-D.

## 2.2 Pokonywanie przeszkód pionowych przez pojazd członowy wyposażony w sprzęg

Kształtowanie kinematyki z uwagi na mobilność platformy dokonana została na podstawie zdolności pokonywania przeszkód terenowych. Weryfikację przeprowadzono za pomocą programu MSC Adams. Szczególną uwagę wrócono na problem pokonywania przez pojazd przeszkód pionowych.

Głównym celem symulacji było:

- określenie progu maksymalnego, którego pokonanie nie wymusza konieczności użycia sprzęgu pojazdu;
- określenie maksymalnej wysokości przeszkody jaką pojazd jest w stanie pokonać wykorzystując sprzęg;
- zbadanie wpływu napędu tylnego członu platformy na pokonanie przeszkody.

Wszystkie warianty rozpatrywane były zarówno dla pojazdu bez ładunku jak i z ładunkiem znajdującym się na widłach drugiego członu.

Założenia do modelu komputerowego:

- model jest układem wielomasowym złożonym z elementów sztywnych połączonych ze sobą odpowiednimi więzami;
- kontakt koła z podłożem odwzorowany zostały za pomocą styku punktowego;
- odkształcenie ogumienia zdefiniowane zostało za pomocą elementu sprężysto-tłumiącego łączących koło z ramą pojazdu;
- założono, że zawieszenie ma charakterystykę liniową o współczynniku  $k=100\text{N/mm}$  i  $c=6,6\text{Ns/mm}$  [5];
- przyjęto współczynnik przyczepności 0,5 dla kontaktu koła z podłożem.

Badania polegały na wykonaniu symulacji przejazdu przez przeszkody pionowe o różnych wysokościach począwszy od 0,3m a następnie stopnowo zwiększając ich wysokość zmieniając tym samym stopień trudności pokonania przeszkody wykorzystując możliwości aktywnego sterowania sprzęgiem.

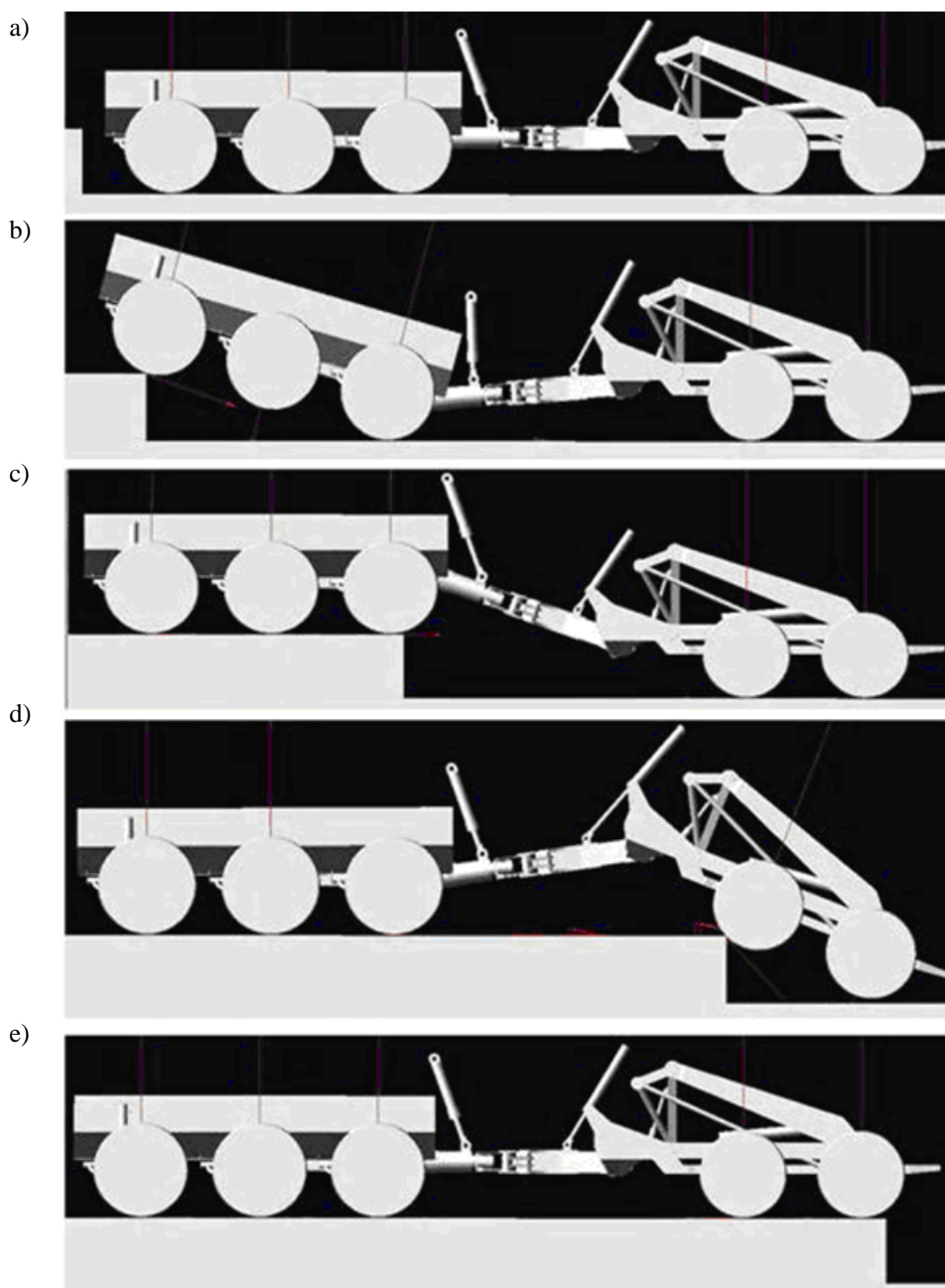
Przykładowy schemat przejazdu przez przeszkodę o wysokości 0,6m pokazany został na rysunku 4. Można w nim wyodrębnić 5 faz ruchu:

I- pojazd dojeżdża do przeszkody, jednocześnie podnosząc przednią oś członu przedniego (w tym celu siłownik członu tylnego zostaje zablokowany zwiększając tym samym stateczność pojazdu, natomiast siłownik pierwszy realizuje proces podnoszenia) (rys. 4a);

II- pierwsza oś znajduje się na przeszkodzie, następuje unoszenie tylnej części członu pierwszego wraz z jednoczesnym najazdem pozostałych jego osi (siłownik członu tylnego zablokowany, siłownik członu pierwszego realizuje proces podnoszenia tyłu członu przedniego) (rys. 4b);

III- podjazd do przeszkody pojazdu z jednoczesnym podniesieniem osi przedniej do wysokości pozwalającej przeprowadzenie sprzęgu nad krawędzią przeszkody aż do zetknięcia się z nią kół (działanie siłownikiem członu tylnego) (rys. 4c);

IV- ustalenie wysokości przedniej osi tylnego członu na poziomie umożliwiającym jej wjazd na przeszkodę (działanie siłownikiem członu tylnego) (rys. 4d);

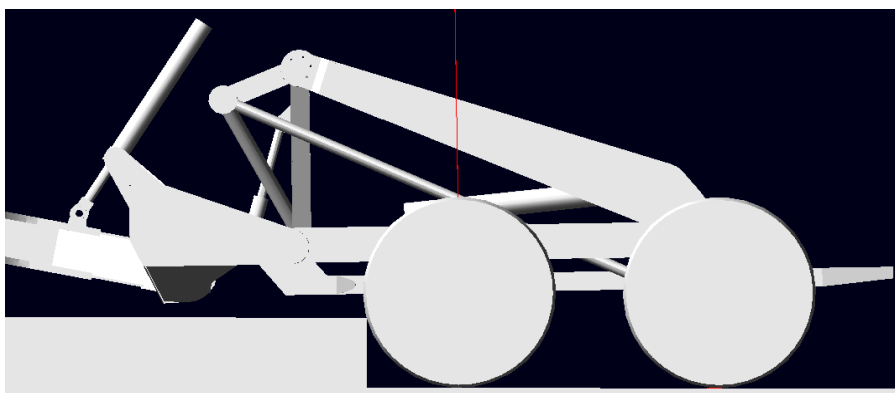


Rys. 4. Schemat pokonywania przeszkody pionowej przez pojazd członowy w programie MSC Adams z podziałem na fazy ruchu

V- dalszy podjazd z jednoczesnym ustaleniem członu tylnego w pozycji poziomej (działanie siłownikiem członu tylnego) (rys. 4e).

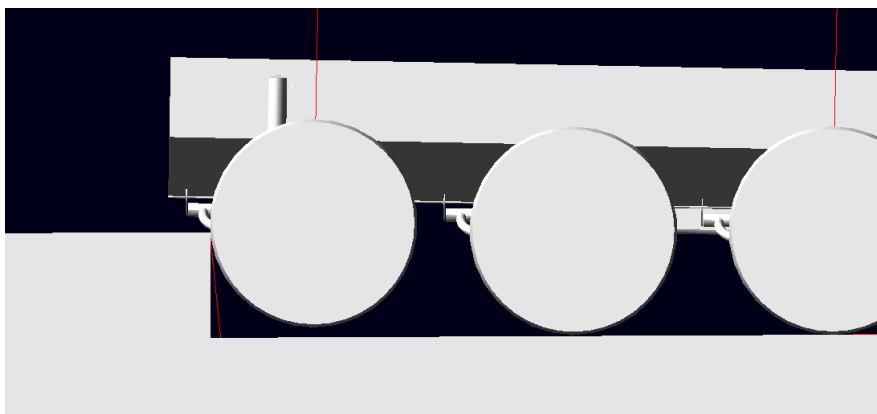
Schemat ten pokazuje mechanizm pokonania przeszkody przez pojazd członowy. Symulacje w różnych wariantach wysokości wykonywane były analogicznie, zmieniając jedynie kąt przesterowania sprzęgu za pomocą siłowników.

W zależności od wysokości przeszkody pionowej, przejazd charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem stopnia trudności. Jak wykazuje symulacja najłatwiejsze do pokonania są przeszkody terenowe o wysokości do 0,34m. Nie wymagają one użycia aktywnego sprzęgu hydraulicznego (rys. 5). Pokonanie przeszkód wyższych, wymaga użycia siłownika podnoszenia członu tylnego, w celu zwiększenia wysokości prześwitu sprzęgu.



Rys. 5. Pojazd pokonujący przeszkodę pionową o wysokości 0,3m

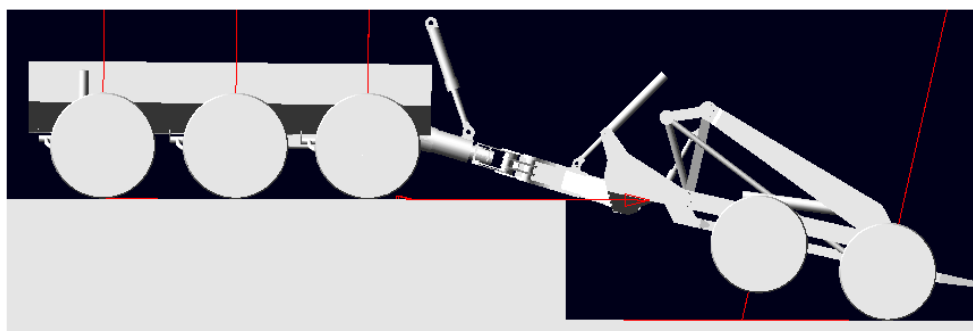
Kolejną wartością graniczną jest wysokość 0,42m. Pokonanie przeszkody terenowej o wysokości przewyższającej tą wartość jest procesem bardziej złożonym, gdyż wymaga podniesienia przodu pierwszego członu. W tym celu niezbędne jest pełne zaangażowanie siłowników podnoszenia sprzęgu (rys. 6).



Rys. 6. Pojazd pokonujący przeszkodę o wysokości 0,45m

Z analizy wykonanych symulacji wynika, że maksymalną wysokością jaką pojazd bez ładunku jest w stanie pokonać to 0,7m. Ograniczenie to wynika z założonej kinematyki sprzęgu i przekłada się bezpośrednio na wysokość unoszenia pojazdu. Potencjalnie istnieje więc możliwość zwiększenia zdolności pokonywania przeszkód terenowych przez zwiększenie skoku siłownika, zwiększając kąt obrotu podnoszenia sprzęgu, do maksymalnej wartości przy, której pojazd jest w stanie pokonać przeszkodę.

Analizę wykonano analogicznie do poprzednich symulacji. Z przeprowadzonych badań wynika, że zwiększenie zakresu kąta obrotu podnoszenia sprzęgu do  $\pm 40^\circ$ , umożliwia pokonanie ścianki pionowej o wysokości 1m czyli wyższej o 30% w stosunku do wyniku poprzedniego (rys. 7). Dalsze zwiększanie wysokości przeszkody nie byłoby możliwe ze względu na brak dostatecznej siły napędowej pierwszego członu pojazdu.



Rys. 7. Pojazd bez ładunku podczas pokonywania przeszkody pionowej o wysokości 1m

Wysokość maksymalna przeszkody dla pojazdu poruszającego się z ładunkiem wynosi 0,7m i ograniczona jest siłą napędową, a więc zmiana kinematyki nie wpłynęłaby na poprawę jego zdolności pokonywania przeszkód.

Z analizy symulacji przejazdu z wyłączeniem napędu drugiego członu wynika, że ma on duży wpływ na pogorszenie zdolności pokonywania przeszkody. Pojazd bez ładunku jest w stanie wjechać na przeszkodę o wysokości 0,5m natomiast z ładunkiem 0,4m.

### 3. WNIOSKI

Analiza numeryczno-kinematyczna pozwoliła określić zdolność pojazdu do pokonywania pionowych przeszkód terenowych oraz weryfikację przyjętych założeń. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań modelowych przedstawiono w tabeli 2.

Przewiduje się, że projektowany pojazd dwuczłonowy powinien charakteryzować się znacznie lepszą mobilnością w stosunku do typowych pojazdów ciężarowo-terenowych przy porównywalnej ładowności (Star 266- ładowność terenowa - 3500kg). Budowa członowa umożliwi uzyskanie bardzo dobrej zdolnością „kopiowania” nierówności terenu co wpłynie znacząco na zoptymalizowanie dystrybucji nacisków a zatem i możliwości poruszania się po podłożu o niskiej nośności. Na szczególną uwagę zasługuje przy tym fakt możliwość efektywnego wykorzystania sił napędowych podczas pokonywania przeszkód. Badania symulacyjne wykazały, że współczynnik przyczepności równym 0,5 jest wystarczający do pokonywania przeszkody o wysokości 0,7m.



Tabela 2 Zestawienie wyników przeprowadzonych analiz symulacyjnych

	Przejazd pojazdu					
	bez ładunku			z ładunkiem		
	z napędem tylnego członu	bez napędu tylnego członu	bez użycia sprzęgu pojazdu	z napędem tylnego członu	bez napędu tylnego członu	z użyciem sprzęgu pojazdu
wysokość przeszkody [m]	0,7 (1,0*)	0,7	0,34	0,5	0,4	0,34

\*- po zmianie kinematyki

Maksymalna wysokość jaką pojazd członowy jest w stanie pokonać bez użycia sprzęgu wynosi 0,34m. Wartość ta uzależniona jest od wielkości prześwitu pod sprzęgiem. Wykorzystując sprzęg aktywny pojazd jest w stanie pokonać wysokość 0,7m. Potencjalnie istnieje możliwość zwiększenia tej wartości do 1m, poprzez zmianę zakresu kąta obrotu podnoszenia sprzęgu do +/-40°. Pojazd obciążony ładunkiem jest w stanie pokonać przeszkodę

o wysokości 0,7m. Należy przy tym zwrócić uwagę, że istotną rolę w pokonywaniu przeszkód

o znacznych wysokościach odgrywa napęd tylnego członu pojazdu. Z badań wynika, że jego wyłączenie skutkuje zmniejszeniem możliwości pokonywania przeszkód pionowych o 30-40%.

#### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Brach I., Tyro G.: *Maszyny ciągnikowe do robót ziemnych*, WNT, Warszawa 1986
- [2] Hetherington J. G.: *The applicability of the MMP concept in specifying off-road mobility for wheeled and tracked vehicles* Journal of Terramechanics, vol. 38, issues 2, str. 63-70, April 2001
- [3] Hohl G. L.: *Military terrain vehicles*, Journal of Terramechanics, vol. 44, issues 1, str. 23-35, January 2007
- [4] Liston R. A.: 2002 St. *Christopher lecture* Journal of Terramechanics, vol. 41, issues 2-3, str. 73-86, April- July 2004
- [5] Prochowski L.: *Teoria ruchu i dynamika pojazdów mechanicznych, cz. II*, WAT, Warszawa 1997
- [6] Sołtyński A.: *Mechanika układu pojazd-teren*, WMON, Warszawa 1966
- [7] Vatanabe K., Yamakawa J., Tanaka M., Sasaki T.: *Turning characteristics of multi-axle vehicles*, Journal of Terramechanics, vol. 44, issues 1, str. 81-87, January 2007.