

Adam BARTNICKI<sup>1</sup>  
Marian J. ŁOPATKA<sup>1</sup>  
Tomasz MUSZYŃSKI<sup>1</sup>  
Arkadiusz RUBIEC<sup>1</sup>

### **HYDROPNEUMATYCZNE ZAWIESZENIE INŻYNIERYJNEGO ROBOTA WSPARCIA**

*Jednym z obszarów zastosowania robotów na współczesnym polu walki jest usuwanie i neutralizowanie improwizowanych ładunków wybuchowych IED. Zadania te często realizowane są w trudnodostępnym terenie i wymagają użycia sprzętów roboczych o znacznych udźwigach. Determinuje to konieczność wyposażenia robotów w zawieszenie o specjalnej konstrukcji dostosowanej do realizowanej przez nie funkcji. W referacie przedstawiono układ hydropneumatycznego zawieszenia Robota Wsparcia Inżynieryjnego (RWI) oraz jego model wraz z wynikami badań symulacyjnych.*

### **HYDROPNEUMATIC SUSPENSION OF EOD ROBOT**

*One of the areas of robots activities on contemporary battlefield is the removal and neutralization of Improvised Explosive Device IED. These task are often performed in rough terrain and required high capacity equipment. It causes necessity of equip robots in special construction suspension. In this paper has been presented multifunction hydropneumatic suspension of EOD Robot and its model with simulation results.*

#### **1. WSTĘP**

Robotyzacja współczesnego pola walki stała się dominującym kierunkiem rozwoju narodowych sił zbrojnych wielu krajów. Podstawowym zadaniem Bezzałogowych Platform Lądowych (BPL) jest zwiększenie dystansu dzielącego żołnierza od zagrożenia.

Jednym z obszarów zastosowania robotów są zadania związane z usuwaniem i neutralizowaniem niewybuchów UXO (*ang. Unexploded Ordinance*) oraz improwizowanych ładunków wybuchowych IED (*ang. Improvised Explosive Device*) [3, 4, 11]. Niejednokrotnie IED oraz UXO znajdują się poza utwardzonymi drogami (gruzowisko, bezdroże itp.), a ich usunięcie lub neutralizacja wymaga zastosowania

---

<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, e-mail: abartnicki@wat.edu.pl, mlopatka@wat.edu.pl, tmuszynski@wat.edu.pl, arubiec@wat.edu.pl

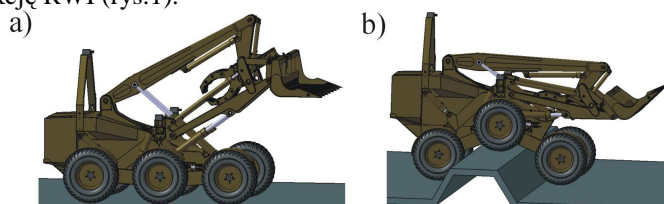
osprzętów roboczych o znacznych udźwigach (ok. 250 kg) w celu podjęcia samego ładunku lub utworzenia drogi do potencjalnie niebezpiecznego przedmiotu.

Stosowane obecnie, do usuwania i neutralizacji ładunków niebezpiecznych, relatywnie tanie zrobotyzowane cywilne minikoparki i miniładowarki, nie są w stanie wykonać stawianych im zadań. Spowodowane jest to ich niewielką zdolnością do pokonywania przeszkód terenowych.

Specyfika misji IED/EOD realizowanych przez roboty wsparcia inżynierskiego (RWI) oraz analizy prowadzone w Katedrze Budowy Maszyn WAT pozwoliły wytypować trzy, wzajemnie różniące się wymagania wobec zawieszenia robota używanego w tego typu zadaniach:

- zdolność do rozwijania wysokich prędkości jazdy (pożądane 10m/s) przy występowaniu niedużych nierówności podłoża (2 do 5 cm), umożliwiającą szybkie dotarcie (dystans do 1500m) i rozpoznanie obszaru uznanego wstępnie za niebezpieczny;
- jazda po znacznych nierównościach (20 – 30 cm) i pochyleniach terenu (45 %) przy prędkościach jazdy rzędu 2 - 3m/s – możliwie najszybsze dotarcie do ładunków znajdujących się w trudnodostępnym terenie;
- zapewnienie zapasu stateczności poprzecznej oraz wzdłużnej robota, przy dużej nierównomierności obciążenia poszczególnych jego osi oraz jeździe z prędkościami poniżej 2 m/s – praca osprzętami roboczymi.

Koniecznym problemem do rozwiązania, jest opracowanie robota oraz zaprojektowanie układu zawieszenia umożliwiającemu mu spełnienie jednocześnie stawianych mu wymagań. Do realizacji misji IED/EOD w Katedrze Budowy Maszyn WAT opracowano własną konstrukcję RWI (rys.1).



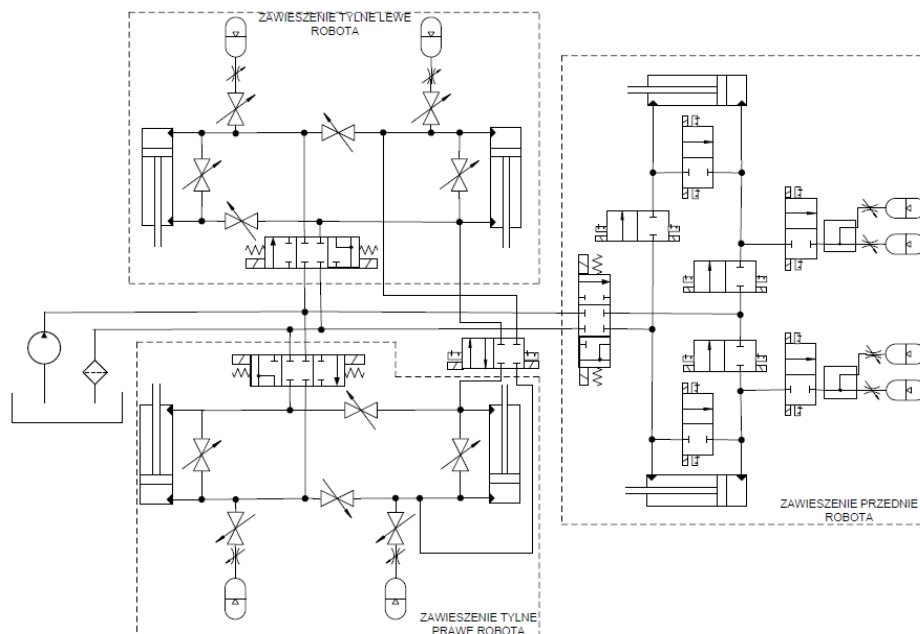
Rys.1. Robot Wsparcia Inżynierskiego:

a) widok poglądowy; b) zdolność pokonywania przeszkody terenowej

Jest to robot kołowy trzyosiowy o masie własnej ~3000 kg, wyposażony w dwa osprzęty robocze: manipulatorowy – o udźwigu 250 kg oraz ładowarkowy – o udźwigu 1500 kg. Poza wcześniej wymienionymi wymaganiami, układ zawieszenia i jazdy powinien zapewnić mu zdolność pokonywania: rowów przydrożnych i melioracyjnych, murków i ścianek o wysokości 50 cm, zboczy o nachyleniu wzdłużnym 60 % i poprzecznym 40 % oraz terenów o niskiej nośności (minimum  $CI=200$  kPa).

## 2. ZAWIESZENIE INŻYNIERYJNEGO ROBOTA WSPARCIA

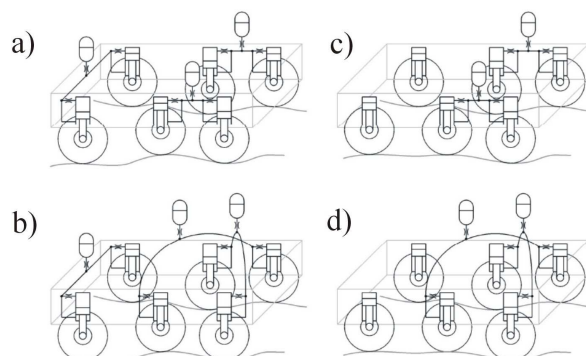
Na podstawie tak zdefiniowanych wymagań oraz przyjętego zawieszenia wielowahaczowego (rys.1), zaprojektowano układ zawieszenia hydropneumatycznego (rys.2)



Rys.2. Schemat ideowy hydropneumatycznego zawieszenie RWI

Ponieważ cechuje się ono znacznie większą zdolnością przenoszenia obciążeń dynamicznych [2, 11] oraz funkcjonalnością niż klasyczne zawieszenia mechaniczne, w stosunkowo prosty sposób można zmienić charakterystykę jego pracy bez konieczności przebudowy samego układu, dzięki przesterowaniu rozdzielaczy czy zaworów.

Zaprojektowany układ (rys.2) umożliwia uzyskanie wytypowanych na podstawie analizy [5, 6, 7, 10] pożądaných alternatywnych struktur podparcia robota (rys.3) w celu dostosowania charakterystyki zawieszenia do realizowanych zadań. Aby zapewnić dużą siłę uciążu (równomierne przenoszenie nacisków na podłoże) dla jazdy terenowej zaproponowano zastosowanie połączeń (hydraulicznych) kołyskowych: pomiędzy lewym i prawym kołem osi przedniej (rys.3a.b) oraz środkowym i tylnym kołem lewej i prawej burty (rys.3a) lub pomiędzy lewą i prawą burtą osi środkowej i tylnej (rys.3b). W celu zapewnienia podatności podczas występowania znacznych obciążeń dynamicznych (jazda z dużymi prędkościami) zastosowano akumulatory hydrauliczne. Alternatywne struktury zawieszenia umożliwiające pracę osprzętami roboczymi (rys.3c,d) w odróżnieniu od struktur do jazdy terenowej mają zablokowany skok kół osi przedniej (najmocniej obciążonej).



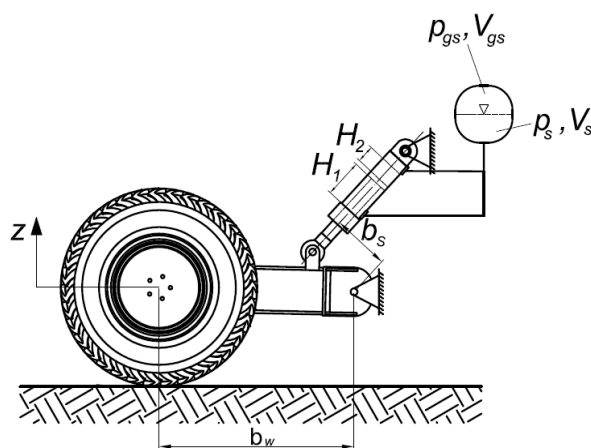
Rys.3. Struktury zawieszenia RWI: a, b) struktury do jazdy terenowej; c, d) struktury do pracy osprzętami roboczymi

Ponadto zaprojektowany układ (rys.2) pozwala uzyskać elastyczne niezależne zawieszenie każdego z kół, pożądane podczas jazdy z dużymi prędkościami po niewielkich nierównościach.

Zastosowanie alternatywnych struktur zawieszenia (na jednym obiekcie badawczym) umożliwia zweryfikowanie ich przydatność do poszczególnych wymagań oraz zbadanie wpływu zawieszenia na możliwości robocze robota.

### 3. MODEL ZAWIESZENIA RWI

W celu zapewnienia odpowiedniej podatności zawieszenia, zgodnie z przyjętą koncepcją robota wsparcia inżynierskiego opracowano model konstrukcyjny zawieszenia (rys.4). Położenie punktów zamocowania siłowników oraz wahaczy dobrano tak, aby całkowity skok każdego z kół z wynosił 500 mm, przy czym nominalny prześwit robota w położeniu równowagi statycznej wynosi 250 mm.



Rys.4. Układ zawieszenie kół przednich RWI w położeniu równowagi statycznej

Ponieważ ciśnienie gazu w położeniu równowagi statycznej  $p_{gs}$  jest zależne od wymiarów układu kinematycznego zawieszenia (rys.4), siłownika hydraulicznego oraz danej wartości siły  $F_z$ , to na sztywność zawieszenia można wpływać jedynie zmieniając pojemność nominalną akumulatora  $V_0$ . Natomiast dzięki zmianom wartości ciśnienia wstępnego naładowania akumulatora gazem  $p_0$ , wpływać można na zmianę obszaru adiabaty (progresywność zawieszenia) zgodnie, z którą dany akumulator pracuje. Zatem celem badań symulacyjnych jest dobór pojemności akumulatora hydraulicznego  $V_0$ , oraz ciśnienia jego wstępnego naładowania gazem  $p_0$  umożliwiających uzyskanie pożądanego skoku koła.

W celu doboru siłowników hydraulicznych zawieszenia ( $D=80\text{mm}$ ,  $d=56\text{mm}$ ,  $H=150\text{mm}$ ) założono równomierny rozkład masy całkowitej ( $m_c=3000\text{ kg}$ ) na poszczególne koła robota.

Na podstawie wstępnych badań symulacyjnych [2] określono obciążenia dynamiczne zawieszenia robota podczas pokonywania przeszkody w kształcie rampy o wysokościach 0,05m oraz 0,3m przy prędkości 10m/s. Obciążenia zawieszenia ujęto w postaci współczynnika nadwyżek dynamicznych  $k_d$  określającego zmiany wartości siły  $F_z$  pochodzącej od masy robota i przypadającej na pojedyncze koło zgodnie z zależnością:

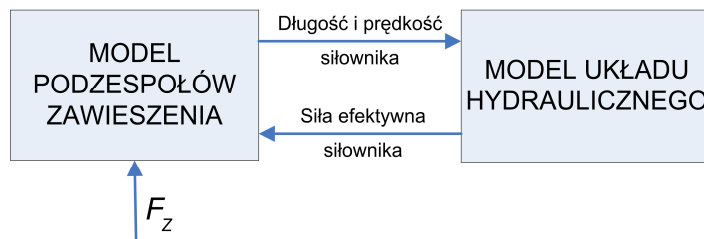
$$k_d = \frac{F_{zi}}{F_z} \quad (1)$$

gdzie:

$F_{zi}$  – wartość pionowej reakcji na kole podczas pokonywania nierówności;

$F_z$  – wartość statyczna pionowej reakcji na kole.

Największą wartość współczynnika  $k_d$  zanotowano dla osi przedniej i wynosiła ona 1,3 [2]. Następnie opracowano model dynamiczny zawieszenia (rys.5) najbardziej obciążanego wahacza (oś przednia) w celu doboru odpowiednich akumulatorów hydraulicznych. Składa się on z wzajemnie powiązanych ze sobą modułów: mechanicznego oraz hydraulicznego. Moduł mechaniczny (rys.6a,b) obejmuje więzy kinematyczne (obrotowe i liniowe) łączące poszczególne jego elementy, natomiast moduł hydrauliczny (rys.6c) instalację hydrauliczną zawieszenia.



Rys.5. Schemat blokowy modelu zawieszenia RWI

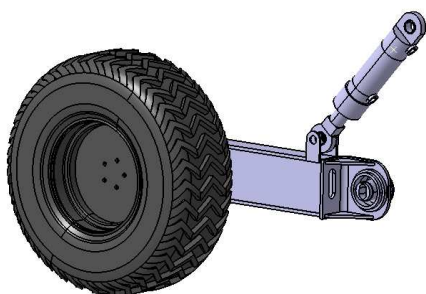
Model mechaniczny wahacza (rys.6b) wykonano metodą układów wielocłonowych (pakiet MD ADAMS View). Przy jego opracowywaniu przyjęto następujące założenia upraszczające:

- rozkład masy robota na koła jest równomierny;
- podłoże jest nieodkształcalne;

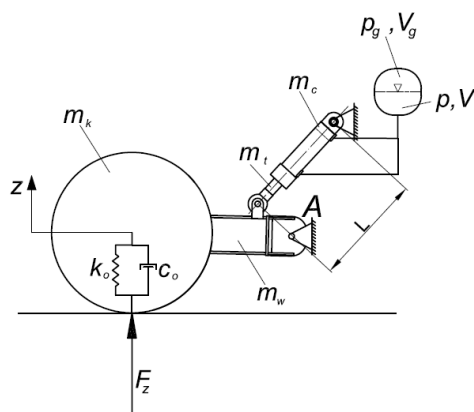
- pod kołem występuje wymuszenie w postaci pionowej siły  $F_z$  (rys.6b) pochodzącej od masy robota;
- punkt zamocowania wahacza  $A$  stanowi jego punkt obrotu;
- uwzględniono sztywność promieniową opony (ugięcie statyczne 0,03m) oraz bezwymiarowy współczynnik tłumienia  $\xi=0,1$ ;
- masa nieresorowana wynosi: 156,5 kg, przy czym masa koła z silnikiem hydraulicznym  $m_k=78$  kg, masa wahacza  $m_w=51$ kg, masa cylindra siłownika  $m_c=18$ kg, a masa tłoczyska  $m_t=9,5$  kg.

Zmiany długości siłownika  $L$  oraz jego prędkości  $\frac{dL}{dt}$  pod wpływem siły  $F_z$  stanowią parametry wyjściowe modułu mechanicznego powiązane z modułem układu hydraulicznego (wykonanego w programie Easy5) (rys.6c) w którym stanowią parametry wejściowe.

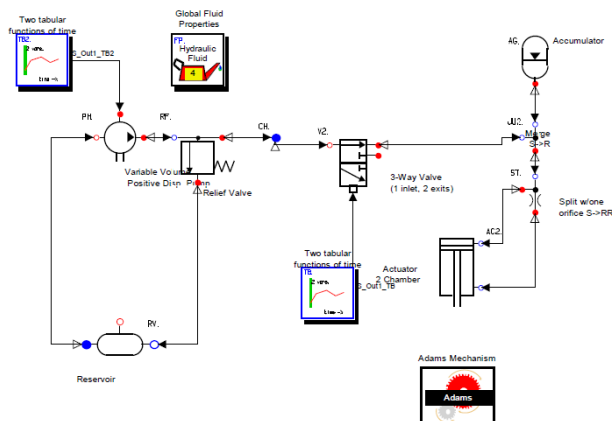
a)



b)



c)



Rys.6. Model zawieszenia przedniego wahacza RWI: a) widok izometryczny; b) schemat modułu mechanicznego; c) schemat modułu hydraulicznego

Dodatkowo dla modelu układu hydraulicznego (rys.6c) przyjęto:

- brak wymiany ciepła układu z otoczeniem oraz pracę akumulatora wg. przemiany adiabatycznej:

$$p_{g1}V_{g1}^{\kappa} = p_{gs}V_{gs}^{\kappa} = p_{g2}V_{g2}^{\kappa} = const \quad (2)$$

gdzie:

-  $p_{g1}$ ,  $V_{g1}$  – odpowiednio ciśnienie i objętość gazu w akumulatorze przy dolnym położeniu koła;

-  $p_{gs}$ ,  $V_{gs}$  – odpowiednio ciśnienie i objętość gazu w akumulatorze w położeniu równowagi statycznej;

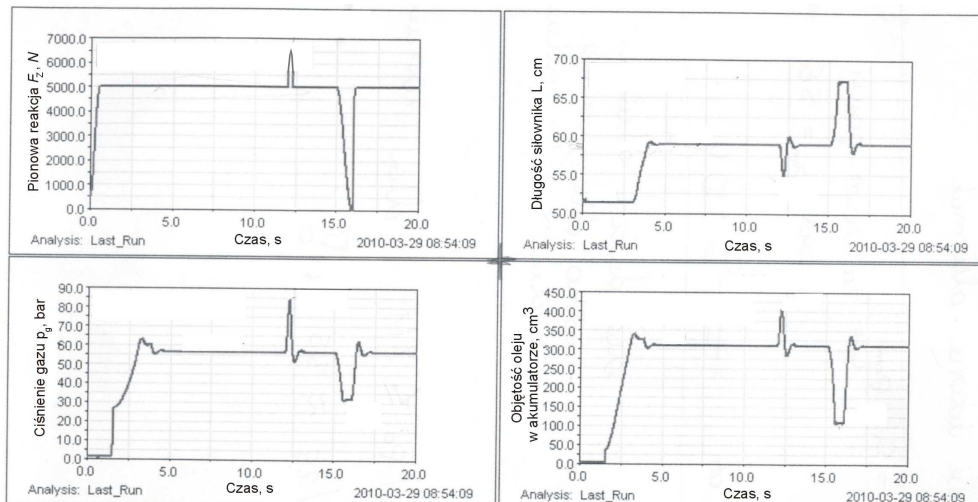
-  $p_{g2}$ ,  $V_{g2}$  – odpowiednio ciśnienie i objętość gazu w akumulatorze przy górnym położeniu koła;

-  $\kappa$  - wykładnik adiabaty ( $\kappa=1,4$ );

- nie uwzględniono wpływu (podatności) przewodów hydraulicznych oraz dynamiki zaworów przełączających.

#### 4. BADANIA SYMULACYJNE MODELU

W oparciu o opracowany model zawieszenia hydropneumatycznego przeprowadzono serię symulacji komputerowych za pomocą współpracujących ze sobą programów ADAMS oraz Easy5 polegających na badaniu zawieszenia wahacza przedniego poddanego wymuszeniu siłą  $F_z$ . Określone we wstępnych badaniach symulacyjnych obciążenia dynamiczne zawieszenia, umożliwiły zdefiniowanie przebiegu czasowego zmian wartości siły wymuszającej  $F_z$  (rys.7a). Statyczną wartość siły  $F_z$  wynoszącą 5000N zwiększano w ciągu 0,1s o współczynnik 1,3 (najazd na przeszkodę) do wartości 6500N, a następnie zredukowano ją do 0N (brak kontaktu koła z podłożem) w celu określenia zakresu pracy akumulatora hydraulicznego oraz skoku siłownika zawieszenia. Przykładowy przebieg symulacji przedstawiono na rysunku 7. Podczas badań symulacyjnych zmieniano pojemność nominalną akumulatora  $V_0$  zgodnie z typoszeregiem akumulatorów membranowych firmy HYDAC (0,4, 0,7, 1,4, 2,4 dm<sup>3</sup>), ustalając ciśnienie wstępnego naładowania gazem tak aby dla ciśnienia  $p_{gs}$  objętość gazu i oleju w akumulatorze były sobie równe.



Rys.7. Przykładowe wyniki symulacji modelu wahacza z akumulatorem  $V_0=0,75\text{dm}^3$ ,  $p_0=25\text{bar}$ : a) przebieg czasowy zmiany siły  $F_z$ , b) przebieg czasowy zmiany długości siłownika  $L$ , c) przebieg czasowy zmian ciśnienia gazu  $p_g$ , d) zmiana objętości oleju  $V$  w akumulatorze

Aby zawieszenie mogło wykorzystać w pełni swój skok, jako kryterium doboru pojemności nominalnej  $V_0$  akumulatora wykorzystano wartość wyznaczonego uprzednio na drodze symulacyjnej współczynnika  $k_d$  w ujęciu ciśnieniowym.

$$k_d = \frac{p_{g2}}{p_{gs}} \quad (3)$$

Dla dobrze dobranego akumulatora jego wartość powinna być zbliżona do 1,3. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki badań symulacyjnych zawieszenia przedniego

	$V_0$ [dm <sup>3</sup> ]			
	0,4	0,7	1,4	2,4
$p_{gs}$ [bar]	56	56	56	56
$p_{g2}$ [bar]	92,6	84,2	70	62
$k_d$	1,65	1,50	1,25	1,10

Na podstawie przeprowadzonych symulacji do siłowników zawieszenia przedniego dobrano akumulator o pojemności  $V_0=1400\text{ cm}^3$ , przy  $p_0=25\text{ bar}$ . Analogicznie badano zawieszenie kół mniej obciążonych ( $k_d=1,1$ ) osi środkowej i tylnej, dla których dobrano akumulator  $V_0=0,75\text{dm}^3$  przy  $p_0=25\text{ bar}$ .



## 5. PODSUMOWANIE

Z uwagi na odmienny charakter jazdy i pracy robota wsparcia inżynierskiego (zdalnej) od klasycznych pojazdów i maszyn zaistniała konieczność stworzenia nowego rozwiązania zawieszenia. Postawione (często nawzajem wykluczające się dla zawiesznień mechanicznych) wymagania odnośnie realizowanych funkcji zdeterminowały zastosowanie zawieszenia hydropneumatycznego.

Opracowany model umożliwił dobór akumulatorów hydraulicznych na podstawie wstępnego kryterium jego oceny (współczynnik  $k_d$ ). Należy przeprowadzić badania symulacyjne zachowania się całego robota z tak dobraną charakterystyką zawieszenia, a następnie wyniki te zweryfikować przeprowadzając doświadczalne badania na obiekcie rzeczywistym.

Szeroko opisywanych w literaturze metod oceny efektywności zawiesznień opartych na kryterium komfortu (wartości przyspieszeń pionowych, kołysań wzdłużnych itp.) kierowcy, czy operatora, nie można w bezpośredni sposób wykorzystać do oceny zawieszenia robota z uwagi na brak w nim operatora. Zatem poza weryfikacją modelu należy opracować nowe kryteria oceny zawiesznień platform bezzałogowych (np. wpływ na system teleoperacji) oraz na ich podstawie zbadać trafność zastosowania wytypowanych struktur zawieszenia.

Opracowanie platformy bazowej wyposażonej w efektywnie działające zawieszenie zwiększające jej mobilność oraz możliwości robocze pozwoli wykorzystać ją do innych celów, np. jako nośnik multisensorycznego systemu do wykrywania ładunków i materiałów niebezpiecznych lub innych osprzętów roboczych.

## 6. LITERATURA

- [1] Borkowski W., Rybak P., Michałowski B.: Influence of tracked vehicle suspension type on dynamic loads of crew and inside equipment, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol.13, No.4, 2006
- [2] Dąbrowska A., Łopatka M. J., Rubiec A.: Koncepcja hydropneumatycznego zawieszenia robota wsparcia inżynierskiego, Międzynarodowa Konferencja TRANSCOMP, Zakopane 2009
- [3] General Dynamics Land Systems. "High Mobility Robotic Platform Study: Final Report." Prepared for US Army TARDEC, Warren, MI. August 1999
- [4] Khalil G., Hitchcock J.: Ground Vehicle Mobility Requirements; RTO AVT Symposium, Lisbon, 1998
- [5] Knorn F.: Modelling and control of an active hydro-pneumatic suspension, Praktikumsbericht, Otto von Guericke Universität Magdeburg, Magdeburg 2006
- [6] Kroneld P., Lieder T., Kalervo N., Marjanen Y.: Modelling a selective hydropneumatic suspension element, Proceedings of ICSV13, Vienna 2006
- [7] Naude A. F., Snyman J. A.: Optimisation of road vehicle passive suspension system. Part 1. Optimisation algorithm and vehicle model., applied Mathematical Modelling, no 27 2003r
- [8] Norma ISO 5008 Agricultural wheeled tractors and field machinery – Measurement of whole-body vibration of the operator

- [9] Reimpell J., Betzler J.: Podwozia samochodów. Podstawy konstrukcji, WKiŁ, Warszawa 2001
- [10] Siwulski T.: Modelowanie stateczności dynamicznej pojazdów przemysłowych z podatnymi elementami jezdnyimi, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2004
- [11] Uys P.E., Els P.S., Thoresson M.: Suspension settings for optimal ride comfort of off-road vehicles travelling on roads with different roughness and speeds, Journal of Terramechanics, vol.44, Issue 2, April 2007

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach **2008-2010** jako projekt rozwojowy Nr OR 00 0012 05