

DĄBROWSKA Agnieszka  
ŁOPATKA Marian Janusz  
RUBIEC Arkadiusz<sup>1</sup>

### **SPECYFIKA WYMUSZEŃ ODDZIAŁYWUJĄCYCH NA ZAWIESZENIE INŻYNIERYJNEGO ROBOTA WSPARCIA**

*Efektywność realizacji zadań przez Inżynieryjne Roboty Wsparcia (IRW) ściśle związana jest z poziomem ich mobilności terenowej, tym większej im lepszy posiadają układ zawieszenia. Jego zaprojektowanie wymaga znajomości specyficznych (innych niż w przypadku klasycznych pojazdów) wymuszeń, którym jest poddawane. W przypadku IRW są to wymuszenia zarówno kinematyczne (pochodzące od nierówności i przeszkód terenowych) jak i siłowe (pochodzące od ciężaru ładunku znajdującego się w osprzęcie roboczym). W referacie opisano istniejące metody klasyfikacji pojazdów do określonych grup mobilności oraz przedstawiono własną metodę jej oceny.*

### **SPECIFICATION OF EXTORTIONS INFLUENCING SUSPENSION SYSTEM OF EOD ROBOT**

*Effective tasks realization by EOD robot is closely related to its mobility level – better suspension system significantly increases robot ability to move through different terrain obstacles. Designing such a suspension system is not so simple and requires knowledge of specific extortions influencing robot. They are composed of two types – kinematic extortions resulting from terrain roughness and obstacles and force extortions coming from load located in working attachment. This paper presents existing methods of vehicles classification to particular mobility group and own method of mobility evaluation.*

#### **1. WSTĘP**

Jednym z najtrudniejszych i najniebezpieczniejszych zadań bojowych jest usuwanie i neutralizacja min, amunicji i niewybuchów określanych mianem UXO (*Unexploded Ordinance*) oraz improwizowanych ładunków wybuchowych IED (*Improvised Explosive Device*). Przedsięwzięcia tego typu realizują pododdziały inżynieryjne EOD (*Explosive Ordinance Disposal*), które w celu zwiększenia bezpieczeństwa żołnierzy coraz częściej wykorzystują roboty wsparcia.

---

<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, 00 – 908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2,  
tel. +48 22 683-71-07, e-mail: adabrowska@wat.edu.pl, mlopatka@wat.edu.pl, arubiec@wat.edu.pl

Efektywne usuwanie i neutralizacja UXO/IED – zwłaszcza w terenie zurbanizowanym, gdzie z uwagi na zagrożenia dla ludności, budowli oraz infrastruktury niedopuszczalna jest ich detonacja w miejscu znalezienia – wymaga od tego typu robotów zdolności do [1]:

- podejmowania leżących na powierzchni lub częściowo zagłębionych w gruncie granatów moździerzowych, amunicji artyleryjskiej, bomb lotniczych, min przeciwpancernych i przeciwpiechotnych, butli napełnionych gazem, beczek napełnionych paliwem lub chemikaliami – o różnych kształtach i masie do 500 kg;
- podejmowania bloków i elementów betonowych, np. maskujących IED, płyt chodnikowych, krawężników, kostki drogowej, kręgów i rur odwadniających itp.;
- unoszenia elementów konstrukcyjnych ograniczających dostęp do UXO lub IED typu słupy drewniane i pnie, betonowe słupy trakcyjne, płyty stropowe (do 1000 kg), kratownice stalowe, kształtowniki stalowe (pręty, kątowniki, rury itp.);
- rozładunku pojazdów transportowych oraz jednostek ładunkowych maskujących lub zawierających materiały niebezpieczne – np. europalet, zasobników lub kontenerów;
- wyciągania, przepychania lub unoszenia samochodów-pułapek – minimum o masie do 1500 kg (samochody osobowe) – pożądane 3000 kg (pick-upy oraz vany).

Zadania te niejednokrotnie realizowane są w bardzo zróżnicowanym oraz trudnodostępnym terenie (rys.1) w bezpiecznej odległości (500 – 1500 m) od sterującego robotem człowieka. Pożądane jest zatem, aby robot był zdolny samodzielnie (bez dodatkowych środków transportu) dotrzeć w miejsce potencjalnego zagrożenia. Istotne również jest jak najszybsze wykonanie zadania. Wymaga to opracowania i zaprojektowania zawieszania o specjalnej konstrukcji dostosowanej do realizowanego przez robota zadań.



Rys.1. Przykłady obszarów działania IRW: a) gruzowisko, b) bezdroże, c) teren wokół utwardzonej drogi

Specyfika misji IED/EOD wykonywanych przez IRW oraz analizy przeprowadzone w Katedrze Budowy Maszyn WAT pozwoliły wytypować trzy, wzajemnie różniące się wymagania wobec zawieszania robota używanego w tego typu zadaniach [1]:

- zdolność do rozwijania wysokich prędkości jazdy (pożądane 10 m/s) przy występowaniu niedużych nierówności podłoża (2 – 5 cm), umożliwiających szybkie dotarcie (dystans do 1500 m) i rozpoznanie obszaru uznanego wstępnie za niebezpieczny;
- jazda po znacznych nierównościach (20 – 30 cm) i pochyleniach terenu (45 %) przy prędkościach jazdy rzędu 2 – 3 m/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 (zmiana położenia osprzętu roboczego z obciążeniem) oraz jeździe z prędkościami poniżej 2 m/s – praca osprzętami roboczymi.

Ponadto, zawieszenie powinno umożliwić robotowi [2]:

- rozwijanie dużej siły uciągu na zróżnicowanej nawierzchni;
- pokonywanie pionowej ścianki o wysokości 0,5 m, rowu melioracyjnego, poprzecznego nasypu ziemnego;
- jazdę wzdłuż zboczy o nachyleniu wzdłużnym 40 % i poprzecznym 60 % oraz zmniejszenie obciążenia psychofizycznego teleoperatora.

Pociąga to za sobą zdolność zapewnienia przez zawieszenie równomiernego rozkładu nacisków na podłoże oraz niwelowania obciążeń dynamicznych przenoszonych na nadwozie robota i elementy systemu teleoperacji.

Obecnie do usuwania i neutralizowania materiałów i ładunków niebezpiecznych stosuje się głównie roboty zabudowane na podwoziach gąsienicowych z mechanicznymi elementami sprężysto-tłumiącymi (rys.2a i 2b).



Rys.2. Przykłady rozwiązania Inżynierskich Robotów Wsparcia:  
a) RC 50 Robotic Platform, b) ARTS, c) robot LandShark, d) robot IBIS

Kołowe układy zawieszenia wykorzystywane są w lżejszych robotach (do 1000 kg) używanych w misjach EOD (rys.2c). Również ten typ konstrukcji wyposażony jest w mechaniczne elementy sprężysto-tłumiące lub układy sztywne z przegubami wahań pomiędzy osiami (rys.2d).

Po dokonaniu analizy istniejących konstrukcji zawieszonych robotów uznano, że ze względu na wysoką zdolność przenoszenia obciążeń dynamicznych, podatność do zmiany charakterystyki i struktury układu zawieszenia bez jego przebudowy i wymiany podzespołów, na potrzeby IRW najkorzystniejsze będzie opracowanie układu zawieszenia hydropneumatycznego. Efektywnie działający układ zawieszenia umożliwi poprawę zdolności roboczych IRW.

Określenie zdolności operacyjnych robota biorącego udział w misjach EOD/IED wymaga określenia jego rzeczywistych zdolności pokonywania przeszkód terenowych i na tej podstawie ewentualnego zaklasyfikowania go robotów wysokiej mobilności.

## **2. NORMATYWNE WYMAGANIA STAWIANE POJAZDOM W ZAKRESIE MOBILNOŚCI**

Mobilność jest to zdolność do przemieszczania się z jednego miejsca w drugie. Na mobilność pojazdów mają wpływ wszystkie elementy wyposażenia, które wpływają na zdolność poruszania się:

- układ napędowy: charakterystyka i moc silnika, sposób przeniesienia napędu, efektywność sterowania napędem itd.;
- układ jezdny: system skreću, rozmiar opon, typ bieżnika, ciśnienie robocze w ogumieniu, nakładki na opony lub łańcuchy przeciwpoślizgowe itp.;
- zawieszenie: skok zawieszenia, charakterystyki zastosowanych elementów sprężystych i amortyzatorów, kinematyka zawieszenia itp.;
- geometria platformy bazowej: prześwit, rozstaw osi i kół, mechanizmy zmiany kształtu lub geometrii, mechanizmy zmiany położenia środka ciężkości itp.;
- osprzęt zwiększający mobilność: chwytaki, manipulatory, wyciągarki itp.

Polskie akty prawne nie definiują pojęcia mobilności pojazdów. Obowiązujące w naszym kraju Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie homologacji pojazdów przewiduje wprawdzie kategorię terenowego pojazdu, lecz wymagania stawiane tej kategorii są zbyt niskie, aby można było stwierdzić, jakim poziomem mobilności charakteryzują się homologowane pojazdy. Producenci pojazdów, często określają poziom mobilności ich wyrobów jako średni, wysoki lub ekstremalny. Najczęściej zapewnienia te, nie są podparte żadnym kryterium klasyfikującym dany pojazd.

Aktem prawnym jasno definiującym mobilność wojskowych pojazdów logistycznych jest natomiast Brytyjska Norma Obronna (*Ministry of Defence. Defence Standard 23-6*). Każdy pojazd będący na wyposażeniu wojsk brytyjskich ma przypisaną klasę mobilności, dzięki temu wiadomo, w jakim terenie może się poruszać i jakie przeszkody może pokonać. Norma określa wymagania terenowe w trzech przedziałach wagowych:

- pojazdy lekkie o ładowności do 4 ton;
- pojazdy średnie o ładowności z przedziału 4-8 ton;
- pojazdy ciężkie o ładowności powyżej 8 ton.

Dokument klasyfikuje mobilność pojazdów wg podziału:

- **Low Mobility (LMLC)** – pojazdy o niskiej mobilności terenowej. Niska mobilność akceptowalna jest dla pojazdów, które rzadko poruszają się poza drogami utwardzonymi. Od tych pojazdów nie wymagana jest duża ruchliwość, są to głównie pojazdy osiągające duże prędkości poruszające się po drogach publicznych. Do tej grupy pojazdów zaliczyć można samochody osobowe, autokary, a także duże zestawy przewożące towary. Ich przydatność podczas wojskowych działań ograniczona będzie zapleczem logistycznym oraz siecią dróg.
- **Improved Low Mobility (ILMLC)** – pojazdy o zdefiniowanej ulepszonej niskiej mobilności charakteryzują się lepszymi parametrami ruchliwości terenowej niż pojazdy LM, ale nie zaliczają się do pojazdów MM.
- **Medium Mobility (MMLC)** – pojazdy o średniej mobilności terenowej. Pojazdy te są używane w szerokim obszarze działań bojowych w bezpośredniej strefie ognia. Wykazują zdolność poruszania się w terenie. Są w stanie pokonać przeszkody wodne, ale tylko po modyfikacjach nadwozia. Powinny także posiadać napęd na wszystkie koła.
- **Improved Medium Mobility (IMMLC)** – pojazdy o zdefiniowanej ulepszonej średniej mobilności charakteryzują się lepszymi parametrami ruchliwości terenowej niż pojazdy MM, ale nie zaliczają się do pojazdów HM.
- **Hight Mobility (HMLC)** – pojazdy o wysokiej mobilności. Pojazdy te muszą poruszać się z dala od dróg i szlaków, zarówno w dzień jak i w nocy. Wysoka mobilność zapewnia możliwość sprawnego poruszania się w trudnych terenie, pokonywania złożonych przeszkód i przekraczania cieków wodnych, bez wstępnego przygotowania. Pojazdy te są wykorzystywane podczas działań wojskowych do zapewnienia rozpoznania, dostarczenia zaopatrzenia dla oddziałów walczących na froncie.

Zaklasyfikowanie Inżynierskiego Robota Wsparcia (o ładowności do 4 ton) do grupy pojazdów wysokiej mobilności (HMLC) możliwe jest dopiero po spełnieniu określonych wymagań (tab.1).

Tab.1. Parametry opisujące mobilność dla lekkich pojazdów o ładowności do 4 t.

Kryteria	Klasa mobilności				
	HMLC	IMMLC	MMLC	ILMLC	LMLC
MMP (kPa)	< 280	280 - 350	350 - 550	550 - 700	> 700
Moc jednostkowa (kW/t)	> 22	> 19	> 12	> 12	< 12
Prześwit (mm) min.	400	260	180	150	115
Średnica zawracania (m)	< 11	< 12	< 13	> 13	> 13
Głębokość brodzenia (m) min.	0,75	0,75	0,75	0,5	0,5
Kąt wejścia (°) min.	45°	40°	40°	35°	–
Kąt zejścia (°) min.	40°	38°	38°	30°	–
Stateczność poprzeczna(°) min.	35°	33°	30°	28°	28°
Ugięcie zawieszenia (mm) min.	200	130	125	125	100

Naciski jednostkowe wyznaczone wg metody MMP nie mogą przekraczać wartości 280 kPa. Pojazd powinien być wyposażony w silnik zapewniający moc 22 kW w przeliczeniu na tonę masy pojazdu. Specyfikacja podwozia musi gwarantować ugięcie zawieszenia co najmniej 200 mm, prześwit przynajmniej 400 mm i średnicę zawracania do 11 m. Pojazd musi pokonywać wzniesienie nachylone pod kątem  $35^\circ$  oraz przeszkody wodne do głębokości 0,75 m bez specjalnych przygotowań. Minimalny kąt wejścia powinien wynosić  $45^\circ$  a kąt zejścia  $40^\circ$ .

Istniejące normatywy klasyfikują pojazdy do określonych grup mobilności na podstawie ich parametrów techniczno ruchowych, a nie rzeczywistej zdolności pokonywania przeszkód.

Alternatywą dla parametrycznej oceny mobilności pojazdu jest przeprowadzanie testów w znormalizowanych warunkach, zapewniających powtarzalność rezultatów. Są one zdecydowanie bardziej wiarygodne i z tego względu przyjmowane kryteria oceny mogą być niższe. Przykładowo w armii USA dla pojazdów wysokiej mobilności wymaga się zdolności poruszania się po zboczach o nachyleniu zaledwie 40 % ( $23^\circ$ ), natomiast dla pojazdów średniej mobilności parametr ten wynosi 30 % ( $18^\circ$ ) – przy zachowaniu zdolności prostopadłego podjazdu na wzniesienie o nachyleniu 60 % ( $31^\circ$ ). Testy pozwalają jednoznacznie ocenić zastosowane rozwiązania konstrukcyjne zawieszenia, układu napędowego, rozkładu mas, itp. – zgodnie z przyjętymi założeniami.

Opracowywanie struktury układu zawieszenia wymaga już na etapie projektu wiedzy na temat wymuszeń, jakim poddawane będzie ono w czasie eksploatacji. Umożliwi to później weryfikację mobilności robota podczas testów poligonowych. Ponieważ roboty poruszają się w zupełnie innych obszarach niż, np. samochodowe pojazdy terenowe, należy określić wymuszenia adekwatne do późniejszych obszarów użytkowania robotów.

W przypadku IRW kluczem do zapewnienia niezbędnego poziomu mobilności są zdolności pokonywania przeszkód terenowych. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

- pokonywanie wzniesień (strome podjazdy);
- pokonywanie ścianek pionowych (zwłaszcza krawężników – maksymalnie 16 cm);
- pokonywanie murków (progów itp.);
- pokonywanie rowów (zwłaszcza przydrożnych) i kanałów;
- pokonywania wałów i nasypów;
- poruszania się po terenie o niskiej nośności.

Najbardziej jednoznaczna metoda oceny powyższych zdolności są testy poligonowe na specjalnie przygotowanym torze badawczym. Za kryterium spełnienia wymagań przyjąć należy pokonanie przeszkody o sprecyzowanych wcześniej parametrach, a nie określenie granicznych możliwości robota w zakresie zdolności pokonywania przeszkód.

Ponieważ IRW wyposażone są w osprzęty robocze (odmiennie niż w przypadku pojazdów) o znacznych udźwigach nie należy również zapominać, że zawieszenia poddawane jest również wymuszeniom siłowym pochodzącym od ciężaru ładunków. Robot przemieszczający się z ładunkiem nie powinien utracić stateczności.

### 3. TOR DO BADANIA MOBILNOŚCI INŻYNIERYJNEGO ROBOTA WSPARCIA

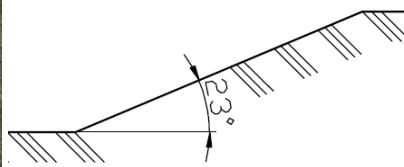
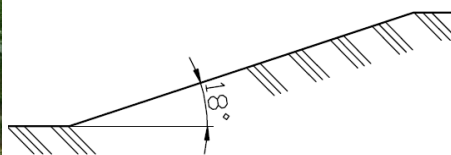
Testy mobilności przeprowadzane są w Polsce zgodnie z Polską Normą PN-V-80004 („Parametry zdolności pokonywania przeszkód terenowych przez samochody – metody pomiaru”), lecz wyniki tych testów nie określają precyzyjnie możliwości pokonywania przeszkód, ze względu na mały zakres realizowanych badań.

Analizy przeprowadzone w zespole Katedry Budowy Maszyn Wojskowej Akademii Technicznej umożliwiły określenie przeszkód terenowych, jakie powinny być pokonywane przez Inżynieryjne Roboty Wsparcia.

Ponadto, podjęto próbę opracowania terenowego toru testowego oraz własnych metodyk badawczych do oceny mobilności robota inżynieryjnego. Zaprojektowany tor składa się z następujących stanowisk: wzniesienie, pionowa ścianka, rów, modułowy tor terenowy, nasypy oraz rynna glebowa [1].

Zdolność pokonywania wzdłużnych i poprzecznych nachyleń terenu oceniana jest w oparciu o wzniesienie o długości około 20 m usypane z gruntu gliniasto-piaszczystego, utwardzone i wyłożone płytami ażurowymi o wymiarach 40x60x10 cm i posiadające trzy różne kąty pochyleniach zboczy:

- zbrocze nachylone pod kątem  $\alpha_1 = 18^\circ = 30\%$  (rys.3a) o długości 10 m;
- zbrocze nachylone pod kątem  $\alpha_2 = 23^\circ = 40\%$  (rys.3b) o długości 7,5 m;
- zbrocze nachylone pod kątem  $\alpha_3 = 30^\circ = 60\%$  (rys.3c) o długości 6 m.







Rys.3. Zdjęcia poglądowe i przekroje poprzeczne zboczy pochylonych pod kątem:  
a)  $18^\circ$ , b)  $23^\circ$ , c)  $30^\circ$

Ocena zdolności pokonywania pionowych przeszkód typu ścianka i próg jest realizowana na stanowisku badawczym składającym się z:

- pionowej ścianki o wysokości  $h_p = 54$  cm (rys.4), której wysokość można ograniczyć podkładając płyty betonowe,
- krawężników drogowych o wymiarach  $20 \times 30 \times 100$  cm i trylinek, które można zestawiać w potrzebne przeszkody.



Rys.4. Pionowa ścianka o wysokości 54 cm (zdjęcie poglądowe i przekrój poprzeczny)

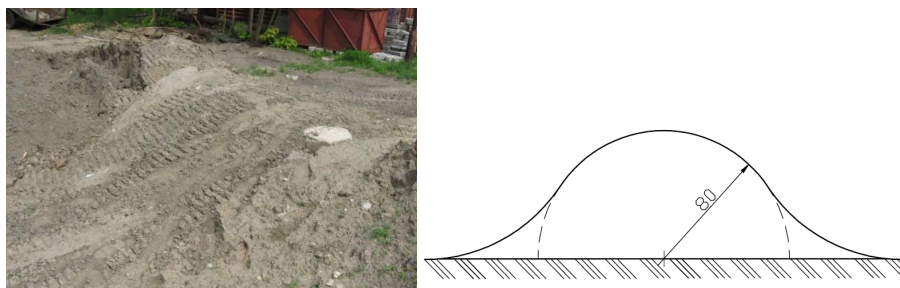
Do badania zdolności pokonywania rowów drogowych przygotowano wykop o długości 5 m, niesymetrycznej wysokości brzegów (wynoszącej 70 i 50 cm), szerokości dna 40 cm oraz zboczach o nachyleniu 50 % (rys.5).



Rys.5. Przekrój poprzeczny rowu

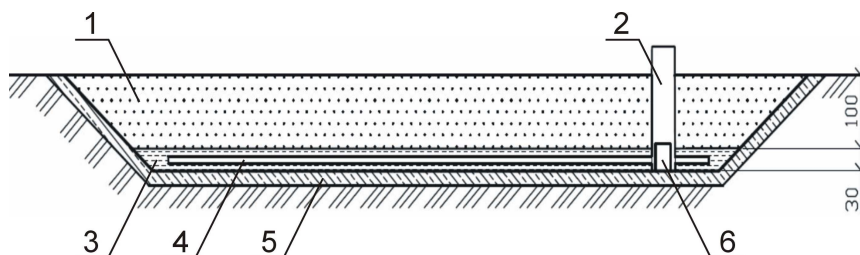


Zdolności pokonywania nasypów można określić pokonując wał ziemny o przekroju pokazanym na rys.6 i wysokości 80 cm – został on usypany bez zagęszczania. Przeszkoda ma przypominać świeżo usypany wał o bardzo wysokich oporach ruchu i relatywnie niskiej przyczepności.



Rys.6. Zdjęcie poglądowe i profil nasypu

Do badania mobilności robota inżynierskiego w terenie o niskiej nośności (bardzo ważny jest równomierny rozkład nacisków na podłoże) przygotowano rynnę glebową (rys.7). Została ona tak zaprojektowana, aby w łatwy sposób można było zmieniać podstawowy parametr decydujący o nośności gruntu – wilgotność. Stanowisko zostało zaadaptowane na byłym zbiorniku wodnym. Fundamenty wyłożone są folią wodoodporną. Na dnie zbiornika rozprowadzony jest system drenażowy składający się z połączonych rur perforacyjnych o średnicy 100 mm. Dren powiązany jest ze studzienką rewizyjną o średnicy 400 mm, w której zainstalowana jest pompa zanurzeniowa do brudnej wody służąca do regulacji poziomu wody w rynnie. Rury drenażowe zasypane są warstwą żwiru o wysokości 30 cm oraz metrową warstwą piasku rzecznoego. Aby nie doszło do zmieszania się piasku i żwiru, warstwy rozdzielone są płótnem z geowłókniny.



Rys.7. Schemat rynny glebowej: 1 – piasek, 2 – studzienka rewizyjna, 3 – żwir, 4 – rury drenażowe, 5 – fundament, 6 – pompa zanurzeniowa

Ze względu na możliwość przeprowadzenia różnych badań stanowisko wyposażono w glebogryzarkę oraz zagęszczarkę. Dzięki tym urządzeniom możliwe jest odpowiednie przygotowanie gruntu do badań. Do oceny nośności gruntu w rynnie wykorzystano standardową w NATO metodę zagłębienia znormalizowanego stożka znaną pod nazwą *Cone Indeks (CI)*.

Koncepcja toru terenowego przewiduje przeprowadzenie badań na specjalnie zaprojektowanych stanowiskach badawczych. Projekt zawiera precyzyjną metodykę realizacji badań mobilności dla każdego stanowiska. Dzięki temu możliwe jest przygotowanie odpowiedniego zestawu testów dla konkretnego pojazdu. Podczas badań weryfikowane są przyjęte rozwiązania konstrukcyjne oraz rzeczywiste możliwości pokonywania przeszkód terenowych. Przeprowadzenie przedstawionego zestawu testów wyczerpująco scharakteryzuje możliwości terenowe badanych rozwiązań. Ponadto, tor umożliwi określenie wpływu wykorzystania dostępnych osprzętów i manipulatorów na zdolności pokonywania przeszkód i samoewakuacji.

#### 4. WNIOSKI

Doświadczenia zebrane przez lata prowadzenia operacji militarnych na bliskim wschodzie (Irak, Afganistan) pokazały, że stosowanie zaadoptowanych na potrzeby wojska zrobotyzowanych mini maszyn na potrzeby misji IED/EOD jest mało efektywne z uwagi na konstrukcje ich układów zawiesznień.

Ponieważ wymagania związane z istniejącymi klasami mobilności dotyczą tylko cech fizycznych pojazdów i nie opisują rzeczywistych zdolności pokonywania przeszkód terenowych, dla Inżynieryjnych Robotów Wsparcia opracowano autorską metodę badania mobilności robotów.

Znajomość na etapie projektowania rodzaju i kształtu przeszkód terenowych, które później robot będzie musiał pokonać umożliwia opracowanie układu zawieszienia, który zapewni robotowi określony poziom mobilności. Dzięki temu możliwa jest również wstępna weryfikacja zdolności pokonywania przeszkód terenowych na podstawie badań symulacyjnych z wykorzystaniem metody układów wieloczołonowych.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Łopatka M.J. i inni: *Sprawozdanie z realizacji projektu rozwojowego „Inżynieryjny robot wsparcia IOD/IED – usuwania ładunków i materiałów niebezpiecznych“*. WAT, Warszawa 2011.
- [2] Muszyński T.: *Inżynieryjne roboty wsparcia, Seminarium pt.: Stan i perspektywy rozwoju Bezzałogowych Platform Lądowych*, WAT, Warszawa 2008.
- [3] Dąbrowska A., Łopatka M.J., Rubiec A.: *Koncepcja hydropneumatycznego zawieszienia robota wsparcia inżynieryjnego*. Konferencja TRANSCOMP, Zakopane 2009.
- [4] Konopka S., Łopatka M.J., Muszyński T., Typiak A.: *Bezzałogowe platformy lądowe*. Praca zbiorowa pod redakcją Z. Mierczyka: *Nowoczesne technologie systemów uzbrojenia*, WAT, Warszawa 2008.
- [5] Maślowski A. i inni: *Development of Surveillance Mobile Robot in Poland*, Proceedings of 52 “UV for Aerial, Ground and Naval Military Operation” RTO NATO 2002.