

*bezzałogowe pojazdy lądowe,
lekkie pojazdy, mobilność,
kryteria oceny mobilności*

Agnieszka DĄBROWSKA¹
Marian ŁOPATKA¹
Arkadiusz RUBIEC¹

OCENA MOBILNOŚCI LEKKICH BEZZAŁOGOWYCH POJAZDÓW LĄDOWYCH

W referacie omówione zostały problemy związane z oceną mobilności lekkich bezzałogowych pojazdów lądowych. Istniejące metody oceny mobilności opracowane na podstawie badań ciężkich pojazdów nie znajdują zastosowania w przypadku małych pojazdów. Ponadto, niestandardowa konstrukcja i ograniczone wymiary lekkich pojazdów bezzałogowych sprawiają, że zapewnienie wysokiego poziomu stateczności jest utrudnione. W referacie przedstawione zostały bliżej wymienione problemy i podjęta została próba stworzenia narzędzia do oceny mobilności i przydatności do wykonywania różnego rodzaju misji przez lekkie bezzałogowe pojazdy lądowe.

EVALUATION OF LIGHTWEIGHT UNMANNED VEHICLES MOBILITY

This paper focuses on mobility evaluation of lightweight UGV. The need for mobile lightweight technology with special emphasis on off-road conditions is great, but is hampered by the lack of mobility evaluation criteria. Existing methods to predict the mobility of heavy vehicles cannot be directly applied to lightweight platforms. Therefore we made an attempt to develop a tool to assess lightweight vehicles mobility and their suitability for different missions. Results of our work are presented in this paper.

1. WPROWADZENIE

Jednym z głównych kierunków rozwoju techniki wojskowej jest budowa platform bezzałogowych – powietrznych, morskich i lądowych. Z uwagi na niejednorodność ośrodka, występowanie różnorodnych przeszkód oraz problemy nawigacyjne – największe problemy techniczne stwarzają platformy lądowe i na nich zaczyna się koncentrować główny wysiłek badaczy.

Pierwotnie prace dotyczące bezzałogowych platform lądowych koncentrowały się głównie na problemach nowych systemów napędowych, nawigacji, lokalizacji i omijania przeszkód, wytyczania korytarzy ruchu, rozpoznawania otoczenia i przeciwnika oraz

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Budowy Maszyn

autonomii działania. Szybko okazało się jednak, że zasadniczym problemem dla wojskowych platform bezzałogowych jest dynamiczna stateczność pojazdu oraz zdolność pokonywania przeszkód. Brak operatora bezpośrednio odczuwającego i oceniającego nierówności terenu oraz zagrożenie przewróceniem i dostosowującego prędkość jazdy do odczuwanych i przewidywanych (na podstawie obserwacji terenu) warunków ruchu, powoduje konieczność zapewnienia platformom bezzałogowym znacznie wyższej mobilności niż w przypadku pojazdów załogowych [1,2,3].

Zakres referatu ukierunkowany został na przeprowadzenie oceny mobilności tylko jednej z grup pojazdów bezzałogowych – lekkich platform lądowych (z ang. *light unmanned ground vehicles – LUGV*). Do grupy tej należą zarówno małe roboty, tzw. plecakowe, o masie poniżej 15 kg, bezzałogowe platformy o masie do 1 tony, które wykonują misje transportowe, a także 2-3 tonowe pojazdy wykonujące w trybie pół-autonomicznym różnego rodzaju operacje mające na celu wsparcie człowieka i odsunięcie go od źródeł potencjalnych zagrożeń. Wszystkie te pojazdy (rys.1), choć należą do jednej grupy, osiągają zróżnicowane prędkości i poziomy mobilności zależne od rodzaju misji, do wykonywania których zostały stworzone [4].



Rys.1. Przykłady lekkich bezzałogowych pojazdów lądowych i ich zastosowanie

2. SPECYFIKA KONSTRUKCJI LEKKICH POJAZDÓW

Wśród wielu rozwiązań lekkich pojazdów bezzałogowych możemy wyróżnić wąskie platformy przeznaczone do bezpośredniego wspierania człowieka w terenie niedostępnym dla standardowych pojazdów. Głównym celem jest osiągnięcie poziomu mobilności człowieka (czyli dotrzeć tam gdzie dociera człowiek) i poruszanie się z prędkością porównywalną z poruszającym się człowiekiem.

Przeprowadzone w Katedrze Budowy Maszyn WAT analizy wykazały, że najefektywniejszą drogą osiągnięcia tego celu jest budowa lekkiej platformy o masie rzędu 200 kg i ładowności około 100 kg. Osiągalna maksymalna prędkość powinna zapewniać platformie zdolność do towarzyszenia człowiekowi na poziomie porównywalnym do osoby obciążonej ładunkiem 25-30 kg (lub zwierzęcia jucznego), przez minimum 8 godzin w zróżnicowanym terenie. Zapewnienie niezbędnego w tych warunkach minimalnego poziomu mobilności wymaga od platformy zdolności do [4,5]:

- rozwijania prędkości maksymalnej rzędu 30 km/h;
- poruszania się w terenie o nośności poniżej $CI = 50$ kPa;
- prostopadłego pokonywania wzniesień o nachyleniu do 60° ;
- poruszania się na zboczach o nachyleniu do 40° ;
- pokonywania rowów o szerokości do 1,0 m;
- pokonywania ścianek pionowych o wysokości do 0,6 m;
- pokonywania schodów;
- zakręcania na klatce schodowej;
- pokonywania zwężeń (ciaśnin) o szerokości 0,75 m;
- poruszania się po ścieżkach o szerokości poniżej 0,7 m.

Niezbędne jest zapewnienie bardzo wysokiego poziomu stateczności pojazdowi o szerokości zaledwie 0,7 m i poruszającego się z prędkością pozwalająca na nadążanie za człowiekiem. W połączeniu z wymaganiem zapewnienia odpowiednich zdolności transportowych (m.in. przewóz rannego lub ładunku) powodujących dodatkowe podniesienie środka ciężkości oznacza to konieczność zapewnienia platformie poziomu stateczności niedostępnego dla standardowych rozwiązań pojazdów.

Typ układu jezdnego (sposób poruszania się pojazdu) jest sprawą drugorzędną. Najważniejsze zadanie to osiągnięcie założonego poziomu mobilności, a także możliwość przewidywania i oceny mobilności i przydatności różnych konstrukcji do przykładowych misji. Nie jest to prosty problem do rozwiązania z uwagi na szereg problemów związanych z oceną mobilności lekkich pojazdów, wynikających głównie z [4]:

- nietypowej konstrukcji tego typu pojazdów i ich ograniczonych wymiarów (szczególnie szerokości), które powodują problem z zapewnieniem i oceną stateczności poprzecznej;
- charakterystyki profilu terenu i jego parametrów takich jak pochylenie (zbocza) i wysokie nierówności, które mają znaczący wpływ na mobilność pojazdu; a także z ograniczonej przydatności dostępnych w literaturze klasyfikacji nierówności występujących w terenie;
- problem z przydatnością istniejących metod przewidywania zachowania się pojazdu podczas poruszania się w terenie.

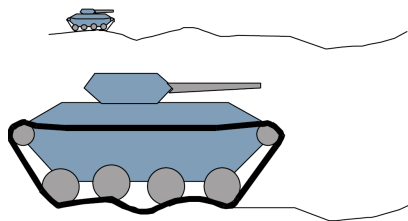
Z uwagi na szybki rozwój prac nad lekkimi bezzałogowymi pojazdami lądowymi i opisane powyżej problemy, na problem mobilności niewielkich pojazdów należy spojrzeć w szerszym kontekście i podjąć próbę stworzenia narzędzia do oceny ich mobilności i przydatności do różnego rodzaju misji.

2.1 Problem stateczności

W przypadku niewielkich pojazdów siły występujące podczas pokonywania przeszkód terenowych i podłoża o zróżnicowanych parametrach (piasek, glina, wilgotny grunt) stanowią poważny problem i utrudniają zapewnienie niezbędnego zapasu stateczności, zwłaszcza gdy pojazd porusza się ze stosunkowo dużą prędkością. Najprostszym sposobem rozwiązania tego problemu jest ograniczenie prędkości poruszania, poszerzenie bazy podparcia oraz omijanie nierówności poprzecznych. Jednak wymagania stawiane platformie eksploracyjnej jednoznacznie wykluczają ten sposób rozwiązania. Niezbędne jest zapewnienie bardzo wysokiego poziomu stateczności pojazdowi o szerokości zaledwie 0,7 m i obciążonemu spiętowanym ładunkiem dodatkowo podnoszącym położenie jego środka ciężkości. Taki poziom stateczności jest niedostępny dla standardowych rozwiązań pojazdów, stąd niezbędne jest opracowanie platformy posiadającej nowatorskie rozwiązanie konstrukcji układu jezdnego, które zapewni ciągły kontakt z gruntem wszystkich punktów podparcia (możliwość kopiowania terenu) mimo występujących nierówności [4,5].

2.2 Problem nierówności terenowych

Spełnianie wymienionych we wprowadzeniu minimalnych wymagań dotyczących mobilności oznacza konieczność zapewnienia platformie wysokich zdolności do pokonywania różnego rodzaju przeszkód terenowych. Istotna jest również precyzja ruchu (zwłaszcza przy zbliżaniu się do nieznanych lub podejrzanych obiektów) w stosunkowo niedługim czasie reakcji. Warto mieć przy tym świadomość, że nierówności terenowe, które dla standardowych pojazdów nie stanowią znaczącego problemu, w przypadku małych pojazdów mogą okazać się kłopotliwe. Wiele przeszkód terenowych pokonywanych przez duże pojazdy nie jest żadnym ograniczeniem (lub niewielkim), natomiast te same przeszkody z perspektywy małego pojazdu stają się prawdziwym wyzwaniem – rys.2 [4,6].



Rys.2. Przeszkody terenowe z perspektywy małego i dużego pojazdu [6]

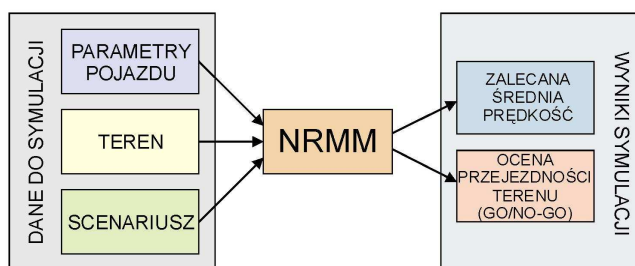
2.3 Problem z przydatnością wykorzystania istniejących metod oceny mobilności

Oddziaływanie pomiędzy pojazdem a podłożem, po którym się porusza, jest złożone i trudne do zdefiniowania. Do przewidywania zachowania się pojazdu w warunkach terenowych wykorzystuje się głównie metody empiryczne, doskonalone przez lata testów laboratoryjnych i poligonowych. Istnieje wiele systemów umożliwiających ocenę zachowania się pojazdu w danym terenie. Wszystkie te metody można przyporządkować do

trzech podstawowych grup obejmujących różne podejście do problemu współpracy pojazd-teren – od makroskopowego do mikroskopowego [6].

Przykładem makroskopowego (najbardziej szerokiego) podejścia do mobilności jest program komputerowy służący do oceny mobilności, tzw. NATO Reference Mobility Model (NRMM). Jest to narzędzie przeznaczone do symulacyjnej oceny mobilności terenowej konkretnego typu pojazdu w danych warunkach terenowych, uwzględniające wpływ warunków atmosferycznych, geometrię i częstość występowania przeszkód terenowych, a także informacje o podstawowych parametrach pojazdu (rys.3). Wynikiem analiz przeprowadzanych z wykorzystaniem modelu NRMM jest jednoznaczna ocena czy rozpatrywany pojazd jest w stanie pokonać dany teren czy też nie oraz informacja o zalecanej średniej prędkości przejazdu. Początkowo oprogramowanie to było opracowane do modelowania mobilności ciężkich pojazdów o ograniczonej konfiguracji układu jezdnego (tylko kołowe i gąsienicowe) i dla takich właśnie typów pojazdów przeprowadzone zostały testy terenowe stanowiące obecnie bazę danych wykorzystywaną do symulacji.

Model NRMM jest bardzo przydatnym narzędziem jednak kilka aspektów uniemożliwia obecnie jego zastosowanie do oceny mobilności lekkich bezzałogowych pojazdów lądowych. Jednym z nich jest to, że model NRMM uwzględnia czynnik ludzki, zakładając że pojazd będzie operował tylko w zakresie bezpiecznym dla operatora i uwzględniając wpływ jego umiejętności związanych z kierowaniem pojazdem. W przypadku pojazdów bezzałogowych czynnik ludzki należy pominąć, ponieważ większość tego typu pojazdów jest sterowana w systemie teleoperacji lub autonomicznie, co pozwala na pracę pojazdu również poza typowym poziomem komfortu człowieka. Jest to dosyć poważny problem utrudniający wykorzystanie modelu NRMM do zrozumienia zachowania się pojazdów bezzałogowych. Ponadto, baza danych terenów i przeszkód wykorzystywana do symulacyjnej oceny mobilności pojazdów stworzona została dla ciężkich i dużych pojazdów i w obecnej postaci nie można jej wykorzystać do przewidywania zachowania małych pojazdów. Kolejnym aspektem utrudniającym wykorzystanie tego modelu jest to, iż jest przeznaczony tylko dla pojazdów kołowych i gąsienicowych, a nie dla robotów o niestandardowej konstrukcji układu jezdnego [6,7,8,9].



Rys.3. Schemat ideowy modelu NRMM

Do drugiej grupy metod określania zdolności pokonywania terenu należy szereg metod analitycznych. Jedną z nich jest model Bekkera wiążący istotne parametry charakteryzujące współpracę pojazdu z podłożem i pozwalający określić zachowanie gruntu pod wpływem ruchu pojazdu. Wykorzystuje on zależność pomiędzy podstawowymi parametrami gruntu

i naprężeniami ścinającymi by określić zdolność pokonania terenu przez dany pojazd. Wzór pozwalający określić naprężenia ścinające przedstawia się następująco [9]:

$$\tau = A_1 e^{(-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1})K_1 j} + A_2 e^{(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1})K_1 j} \quad (1)$$

gdzie K_1 i K_2 to współczynniki związane z poślizgiem koła, określane doświadczalnie. Naciski na grunt p określane są następująco:

$$p = \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) z^n \quad (2)$$

gdzie: b – najmniejszy wymiar pola kontaktu opony z podłożem,
 z – osiadanie gruntu,
 K_c – współczynnik spoistości gruntu,
 K_ϕ – współczynnik tarcia gruntu,
 n – wykładnik związany z deformacją gruntu.

Model Bekkera umożliwia zbadanie różnych konfiguracji parametrów pojazdów kołowych jak i gąsienicowych, w celu znalezienia najlepszego rozwiązania dla konkretnego rodzaju terenu. Jednak powyższe zależności empiryczne stworzone zostały dla pojazdów o dużej geometrii i masie, posiadających kołowy lub gąsienicowy układ jezdny i ich bezpośrednie zastosowanie do oceny mobilności małych pojazdów nie jest możliwe. Głównym problemem jest brak wystarczającej ilości danych doświadczalnych dla pojazdów o tak małej masie i wymiarach [6,7,9].

Kolejną metodą analityczną określania przejezdności terenu jest metoda opracowana przez amerykańską Waterway Experiment Station of US Army Corps of Engineer (WES) podczas II Wojny Światowej. Polega ona na pomiarze rzeczywistej nośności gruntu metodą wciskania stożka – Cone Index (CI) – i porównywania jej z eksperymentalnie wyznaczoną minimalną nośnością gruntu nazywaną Vehicle Cone Index (VCI). Grunty o nośności CI większej od charakterystycznej dla pojazdu VCI pozwalały na pokonanie terenu („go”), natomiast uzyskanie z pomiaru wyniku gorszego od VCI wskazywało na wysokie prawdopodobieństwo ugrzęźnięcia („no go”).

Minimalną, charakterystyczną dla danego rodzaju pojazdu, niezbędną do zapewnienia przejezdności, nośność gruntu VCI wyznaczano na podstawie badań eksperymentalnych. W oparciu o zgromadzone rezultaty badań, rozwinięto obliczeniowe metody szacowania VCI dla pojazdów kołowych i gąsienicowych. Podstawą do ich wyznaczenia jest wskaźnik mobilności pojazdu MI (Mobility Index) ujmujący jego cechy konstrukcyjne. W przypadku pojazdów kołowych MI możemy wyznaczyć z następującej zależności:

$$MI_{wheeled} = \left(\frac{p_N \cdot K_M}{K_B \cdot K_O} + K_K - K_P \right) \cdot K_{SS} \cdot K_{SB} \quad (3)$$

gdzie: p_N – naciski nominalne na podłożu;
 K_M – współczynnik masy;
 K_B – współczynnik szerokości koła;
 K_O – współczynnik ostróg;
 K_K – współczynnik obciążenia kół jezdnych;

K_P – współczynnik prześwitu;
 K_{SS} – współczynnik mocy jednostkowej;
 K_{SB} – współczynnik zależny od rodzaju skrzyni biegów.

Na podstawie wartości MI obliczana jest wartość VCI. Dla pojazdów kołowych wzór ten przyjmuje postać:

$$VCI_1 = 11.48 + 0.2MI - \left(\frac{39.2}{MI + 3.74} \right) \quad (4)$$

Metoda VCI jest bardzo przydatna do określania mobilności pojazdów poruszających się po bezdrożach, ponieważ porównuje potencjalną siłę nacisku wywieraną przez pojazd na podłoże z siłą oporu podłoża. O ile w przypadku ciężkich pojazdów siły nacisku są znaczne, to w przypadku lekkich pojazdów osiągają znacznie mniejsze wartości. Stąd duża niedokładność uzyskiwanych wyników, która efektywnie hamuje wykorzystywanie tej metody do oceny mobilności małych pojazdów [7,8,9].

Dalsze badania i analizy prowadzone przez WES doprowadziły do opracowania metody opartej na wskaźnikach mobilności MN (Mobility Number), które pozwalają dokładniej oszacować dyspozycyjne siły uciągu pojazdów kołowych poruszających się w terenie o znanej nośności CI. Stwierdzony istotny wpływ parametrów gruntu i jego składu frakcyjnego na możliwości trakcyjne pojazdów, spowodował konieczność sprecyzowania odmiennych zapisów wyrażających wskaźnik mobilności MN dla poszczególnych charakterystycznych podłoży. I tak dla gruntu gliniastego wyraża się zależnością [10,11]:

$$MN_{WES} = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W} \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0.5} \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{2d}} \right) \quad (5)$$

gdzie: W – obciążenie koła;

CI – nośność gruntu określona metodą wciskania stożka;

δ – ugięcie opony na twardym podłożu pod obciążeniem W_k ;

h – wysokość profilu opony (napompowanej nie obciążonej);

d – średnica zewnętrzna opony z bieżnikiem – napompowanej, nieobciążonej.

W przypadku gruntów gliniasto-piaszczystych, wyraża go zależność [10,11]:

$$MN_{WES} = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W} \quad (6)$$

gdzie: b – szerokość koła napompowanego, nieobciążonego.

Natomiast dla suchych piasków przyjmuje ona postać [10,11]:

$$MN_{WES} = \frac{G_{CI} (b \cdot d)^{3/2}}{W} \cdot \frac{\delta}{h} \quad (7)$$

gdzie: G_{CI} – gradient nośności CI.

Poza Waterway Experiment Stadion nad opracowaniem kolejnych wskaźników mobilności pracowało wielu badaczy. Do najbardziej znanych i najczęściej stosowanych należą wzory stworzone przez Maclaurin'a [10,11]:

$$MN_M = \frac{CI \cdot b^{0.8} \cdot d^{0.8} \cdot \delta^{0.4}}{W} \quad (8)$$

Brixius'a:

$$MN_B = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W} \cdot \left(\frac{1 + 5 \cdot \frac{\delta}{h}}{1 + 3 \cdot \frac{b}{d}} \right) \quad (9)$$

i Rowland'a:

$$MN_R = \frac{k \cdot n \cdot CI \cdot b^{0.85} \cdot d^{1.15}}{W} \sqrt{\frac{\delta}{h}} \quad (10)$$

Na podstawie wskaźników mobilności możliwe jest wyznaczenie granicznej nośności gruntu VCI [10,11]:

$$VCI_{WES} = \frac{k \cdot W}{2 \cdot n \cdot b \cdot d \cdot \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0.5} \left(\frac{1}{1 + b/2d} \right)} \quad (11)$$

gdzie: k – wartość graniczna wskaźnika mobilności dla przypadku gdy cała siła przyczepności służy pokonaniu oporów ruchu (współczynnik uciągu $\mu = 0$);
 n – liczba mostów (kół jezdnych po jednej stronie pojazdu).

Wszystkie powstałe do tej pory wskaźniki mobilności są rezultatem badań eksperymentalnych przeprowadzanych na reprezentatywnej grupie pojazdów w danych warunkach terenowych. Stąd zależności te są wiarygodne tylko dla danego typu pojazdu w warunkach zbliżonych do tych, w jakich odbywały się testy terenowe. Ponadto, do tej pory nie zostały opublikowane wyniki prac nad MN dla pojazdów gąsienicowych, jak również dla innych rozwiązań układu jezdnego. Pomimo, iż zastosowanie istniejących wskaźników mobilności do oceny zachowania się lekkich bezałogowych pojazdów lądowych jest mocno ograniczone, to metoda ta potencjalnie stwarza duże możliwości opracowania nowych MN. W tym celu należy jednak przeprowadzić szereg badań doświadczalnych na pojazdach i w warunkach innych niż te badane dotychczas.

Ostatnia grupa metod wykorzystywana do określania mobilności terenowej pojazdów opiera się na bardzo szczegółowych modelach, opisujących zarówno koło jak i podłoże w skali mikroskopowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Model taki może być bez większych problemów przeskalowany na potrzeby małych pojazdów, jednak trudności związane z prawidłowym zdefiniowaniem parametrów gruntu i złożoność obliczeń sprawiają, że nie jest to proste i powszechnie stosowane narzędzie do oceny mobilności lekkich pojazdów [6,7].

3. CHARAKTER BADAŃ PROWADZONYCH W KBM WAT

Na podstawie przeprowadzonej analizy istniejących metod oceny zachowania się pojazdu w danym terenie można stwierdzić, iż ich przydatność do oceny mobilności lekkich bezzałogowych pojazdów lądowych jest bardzo ograniczona. Ponadto, nie ma w tej chwili spójnego narzędzia przeznaczonego do oceny mobilności niewielkich pojazdów (również tych o niekonwencjonalnych rozwiązaniach układu jezdnego) uwzględniającego wszystkie najważniejsze aspekty wpływające na wysokie zdolności poruszania się w zróżnicowanym terenie, tj. ocenę stateczności poprzecznej, ocenę możliwości pokonywania przeszkód terenowych oraz ocenę oddziaływania pomiędzy pojazdem a podłożem. Stąd też zasadne jest stworzenie własnego narzędzia do przewidywania zachowania się lekkich pojazdów podczas poruszania się w terenie oraz podjęcie próby opracowania nowych wskaźników mobilności w oparciu o wskaźniki istniejące, ale przeznaczone do oceny mobilności ciężkich pojazdów.

W tym celu należy jednak przeprowadzić szereg badań doświadczalnych na lekkich pojazdach i w warunkach zbliżonych do tych, w których planowane jest ich wykorzystanie. W Katedrze Budowy Maszyn WAT trwają obecnie prace nad kilkoma innowacyjnymi konstrukcjami lekkich platform bezzałogowych oraz budową toru przeznaczonego do testowania mobilności tego typu pojazdów – uwzględniać on będzie podłoża o różnej nośności, a także zróżnicowane przeszkody terenowe [4].

Rezultaty uzyskane z badań eksperymentalnych pozwolą na opracowanie tabeli porównawczej umożliwiającej wstępną ocenę mobilności i przydatności do wykonywania różnego rodzaju misji przez lekkie bezzałogowe pojazdy lądowe. Takie rozwiązanie obrazuje zależności pomiędzy wymaganiami związanymi z danym profilem misji oraz możliwościami ich spełnienia przez dany pojazd. Ponieważ każdy rodzaj misji posiada swoją specyfikę wymagania należy zdefiniować indywidualnie – np. misja prowadzona w terenie podmokłym polegająca na zebraniu informacji o występujących tam obiektach będzie miała odmienny charakter niż misja transportowa prowadzona na obszarach pustynnych. Przykładowy fragment tabeli porównawczej z wymaganiami dla terenu zurbanizowanego przedstawia rys.4.

| PORÓWNYWANY POJAZD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|
| WYMAGANIA MISJI | | | | | |
| ZAWRACANIE WEWNĄTRZ BUDYNKÓW (TAKŻE NA KLATKACH SCHODOWYCH) | | | | | |
| PRZEJEŹDŻANIE PRZEZ OTWORY DRZWIOWE (0.7 m SZEROKOŚCI) | | | | | |
| POKONYWANIE SCHODÓW | | | | | |

Rys.4. Fragment tabeli porównawczej dla terenu zurbanizowanego [4]

Stopień spełniania przez dany pojazd wymagań może być oceniany np. w skali od 1 do 4, gdzie: 1 – nie spełnia wymagań, 2 – spełnia w stopniu akceptowalnym, 3 – spełnia w stopniu dobrym i 4 – spełnia w stopniu bardzo dobrym. Następnie, uzyskane rezultaty punktowe należy pomnożyć przez siebie, w celu wyłonienia pojazdu spełniającego

w najwyższym stopniu stawiane wymagania. Takie rozwiązanie pozwala wyeliminować pojazdy, które wprawdzie są w stanie pokonać dany teren lub przeszkodę, ale w sposób mało efektywny i zagrażający powodzeniu całej misji. W celu znalezienia pojazdu najbardziej wszechstronnego należy dokonać porównania ocen z poszczególnych misji i je zsumować. Opisywana tabela porównawcza jest bardzo prostym, ale potencjalnie wartościowym narzędziem, które może zostać wykorzystane do oceny mobilności i przydatności do wykonywania różnego rodzaju misji przez lekkie bezzałogowe pojazdy lądowe [4].

4. PODSUMOWANIE

Obecnie znaczna część prac dotyczących lekkich bezzałogowych pojazdów lądowych koncentruje się na problemach nowych systemów napędowych, nawigacji, lokalizacji i omijania przeszkód, wytyczania korytarzy ruchu, rozpoznawania otoczenia i przeciwnika oraz autonomii działania. Jednak w przypadku gdy pojazd nie posiada odpowiedniego poziomu mobilności, wykonywanie przez niego działań w zróżnicowanych warunkach terenowych jest znacznie ograniczone i może zagrozić powodzeniu całej misji.

Lekkie bezzałogowe pojazdy lądowe prawdopodobnie nigdy nie będą posiadały dokładnie takiego samego poziomu mobilności co człowiek, jednak bardzo rozległe spektrum możliwości ich zastosowania sprawia, że poszerzenie wiedzy dotyczącej oceny zdolności pokonywania terenu i przydatności do wykonywania różnego rodzaju misji jest niezwykle istotne.

Połączenie wysiłków badawczych dotyczących opracowywania nowych konstrukcji lekkich pojazdów, udoskonalania narzędzia oceny mobilności w postaci tabeli porównawczej oraz eksperymentalnej weryfikacji mobilności lekkich pojazdów uwzględniającej poruszanie się w terenie o niskiej nośności i pokonywanie przeszkód terenowych, umożliwi rozpoznanie problematyki związanej z mobilnością lekkich bezzałogowych pojazdów lądowych oraz identyfikację struktury o najwyższym potencjale mobilności.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Estier T., Crausaz Y., Merminod B., Lauria M., Piguet R., Siegwart R.: *An innovative space rover with extended climbing abilities*, Proceedings of the Fourth International Conference Robotics 2000, Albuquerque, February – March 2000.
- [2] General Dynamics Land Systems: *High Mobility Robotic Platform Study: Final Report*, prepared for US Army TARDEC, Warren, MI. August 1999.
- [3] Spenko M., Iagnemma K., Dubowsky S.: *High Speed Hazard Avoidance for Mobile Robots in Rough Terrain*, Proceedings of the SPIE Conference on Unmanned Ground Vehicle Technology 2004.
- [4] Dąbrowska A., Rubiec A.: *Evaluation of lightweight unmanned vehicle mobility*, II InterTech Conference of Young Scientists, Poznań 2009.
- [5] Kozicka A., Łopatka M.: *Problemy mobilności platform logistycznych bezpośredniego wsparcia człowieka*, V Konferencja LogiTrans, Szczyrk 2008.
- [6] B. Haueisen: *Mobility analysis of small, lightweight robotic vehicles*, April 2003.
- [7] Worley M. E.: *Experimental study on the mobility of lightweight vehicles on sand*, Master Thesis, Blacksburg Virginia, June 2007.

-
- [8] Maclaurin B.: *Comparing the NRMM (VCI), MMP and VLCI traction models*, Journal of Terramechanics 44 (2007).
- [9] Wong J. Y.: *Theory of ground vehicles*, Third Edition, Wiley-IEEE, New York 2001.
- [10] Saarilahti M.: *Soil interaction model*, University of Helsinki, May 2002.
- [11] Łopatka M.: *Analiza metod oceny zdolności pokonywania terenu o niskiej nośności*, Biuletyn WAT 10/2004.