

BARTNICKI Adam¹
 DĄBROWSKA Agnieszka²
 ŁOPATKA Marian Janusz³
 RUBIEC Arkadiusz⁴

Badania układu napędu jazdy bezzałogowej kołowej platformy lądowej

*Bezzałogowa Platforma Lądowa,
 podwozie kołowe, wysoka mobilność,
 badania identyfikacyjne*

Streszczenie

Bezzałogowe Platformy Lądowe (BPL) wykorzystywane są w trudnodostępnym terenie realizując działania, których bezpośrednio wykonanie przez człowieka może powodować zagrożenie dla jego zdrowia i życia. W referacie przedstawiono koncepcję kołowej lekkiej BPL wyposażonej w przegubowy układ skrętu oraz zbudowaną wersję testową jej podwozia. Opisano również wyniki poligonowych badań doświadczalnych podwozia, podczas których weryfikowano założenia konstrukcyjne. Określono wartości współczynników oporów toczenia, przyczepności zastosowanego ogumienia oraz oporów pokonywania wzniesień i schodów.

RESEARCH OF DRIVE SYSTEM OF UNMANNED WHEELED GROUND VEHICLE

Abstract

Unmanned Ground Vehicles (UGV) are destined for man close support in not negotiable for standard vehicles terrain. Because they enhance the soldier's protection considerably by enabling them to operate at a safe distance from a threat such vehicles have nowadays become a key technology for many dirty and dangerous missions. This paper presents concept of innovative unmanned wheeled ground vehicle equipped with articulated steering system, its existing testbed and results of experiments conducted on specially designed test field. The main purpose of these tests was to verify selection correctness of elements of drive system, determine rolling resistance factors, tires tractive adhesion and grade resistance of investigated testbed.

1. WSTĘP

Robotyzacja pola walki jest jednym z zasadniczych kierunków rozwoju sił zbrojnych. Ma ona na celu zastąpienie człowieka w strefach zagrożenia przez Bezzałogowe Platformy Lądowe (BPL) o odpowiednim do przewidywanych działań wojskowych poziomie ruchliwości i mobilności. W tym celu adaptowane są zarówno pojazdy produkowane seryjnie i przystosowane do zdalnego sterowania, jak również powstają specjalne rozwiązania o dużej zdolności pokonywania przeszkód terenowych. Jednym z kierunków rozwoju BPL są lekkie platformy wykonujących zadania inspekcyjne zarówno w terenie otwartym jak i zurbanizowanym.

Zespół Katedry Budowy Maszyn Wojskowej Akademii Technicznej (KBM WAT) opracował i zbudował własną propozycję lekkiej Bezzałogowej Platformy Lądowej do zadań inspekcyjnych (rys.1 i tab.1). Jest to platforma czterokołowa (z napędzaną jedną osią) o przegubowym układzie skrętu z napędem hydro-mechanicznym. Cechuje się ona bardzo wysoką zwrotnością i zdolnością do poruszania się w bardzo wąskich i krętych korytarzach. Zgodnie z założeniami platforma powinna poruszać się we wnętrzach budynków, dlatego jej szerokość została ograniczona do 70 cm. W efekcie narzuciło to pewne ograniczenia konstrukcyjne związane z położeniem środków ciężkości jej członów. Zapewnienie platformie przegubowej odpowiedniego zapasu stateczności wymagało restrykcyjnego rozmieszczenia jej elementów (silnik, rozdzielacze, elementy ramy). Ponadto, kinematyka przegubowego układu skrętu platformy została tak określona, aby umożliwić jej zawracanie na schodach dwubiegowych. Założono również, że platforma powinna być w stanie transportować człowieka, co miało decydujący wpływ na jej rozmiary [1,2].

Do napędu demonstratora zastosowano zabudowaną przekładnię hydrostatyczną, której maksymalny chwilowy moment obrotowy możliwy do uzyskania na półosiach mostu napędowego (rys.1c) wynosi 515 Nm, natomiast moment nominalny do pracy ciągłej jest równy 277 Nm. Ponadto, człon napędowy został tak wykonany, aby możliwy był pomiar rozwijanej siły napędowej.

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
 Tel: + 48 22 683-93-88, Fax: + 48 22 683-72-11, E-mail: abartnicki@wat.edu.pl

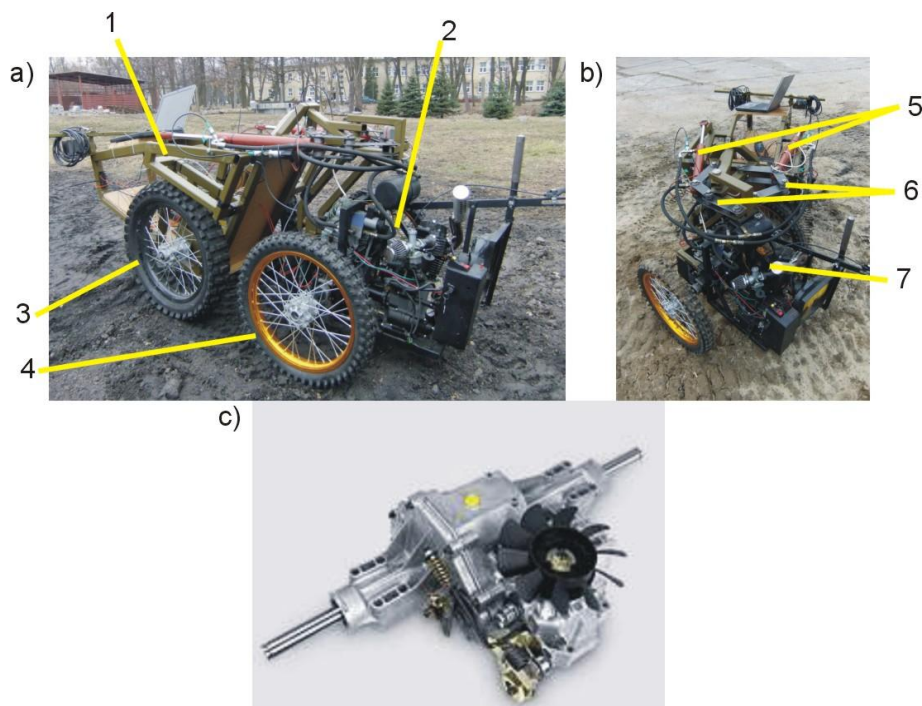
²Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
 Tel: + 48 22 683-72-19, Fax: + 48 22 683-72-11, E-mail: adabrowska@wat.edu.pl

³Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
 Tel: + 48 22 683-96-16, Fax: + 48 22 683-72-11, E-mail: mlopatka@wat.edu.pl

⁴Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
 Tel: + 48 22 683-71-07, Fax: + 48 22 683-72-11, E-mail: arubiec@wat.edu.pl

Tab. 1. Podstawowe parametry techniczne kołowej platformy testowej [3]

Masa własna	232 kg
Szerokość	0,7 m
Naciski jednostkowe	110 kPa
Układ bieżny	Kołowy
Silnik spalinowy	Iskrowy o mocy 14 KM
Układ napędowy	Mechaniczno hydrauliczny (z zabudowaną przekładnią hydrostatyczną)
Układ skrętu	Przegubowy – hydrauliczny



Rys.1. Kołowa platforma testowa: a) widok poglądowy, b) widok od czola, c) hydrostatyczny most napędowy Hydro-Gear; 1-człon ładunkowy, 2-człon napędowy, 3-koło HEIDENAU o rozmiarze 110/100x18, 4-koło QING o rozmiarze 70/100x17, 5-siłowniki skrętu $D=40$ mm, $d=22$ mm, $H=300$ mm, 6-dźwignie pośrednie układu skrętu, 7-iskrowy silnik spalinowy o mocy 14KM

W celu sprawdzenia poprawności założeń konstrukcyjnych popelnionych na etapie projektowania platformy, jak również określenia wartości oporów ruchu lekkich BPL, przeprowadzono badania poligonowe zbudowanego na podstawie projektu podwozia testowego lekkiej kołowej BPL. Jednym z głównych celów badań eksperymentalnych było zbadanie czy możliwe jest bezpośrednie zastosowanie dostępnych w literaturze wytycznych do projektowania układów napędowych tego typu platform.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE TESTOWEJ PLATFORMY KOŁOWEJ

Poligonowe badania eksperymentalne obejmowały:

- badania oporów ruchu platformy na różnych nawierzchniach,
- badania oporów pokonywania wzniesień,
- badanie siły uciążu,
- badanie oporów pokonywania schodów.

W celu określenia wpływu rozmiaru i rodzaju ogumienia na opory ruchu badano podwozie z dwoma rodzajami opon:

- firmy HEIDENAU o rozmiarze 110/100x18,
- firmy QING o rozmiarze 70/100x17.

Badania przeprowadzono na terenie toru testowego robotów KBM (próby na podłożu gruntowym i betonowym) oraz na terenie pomieszczeń laboratoryjnych KBM WAT (badania wstępne). Podczas badań rejestrowano wartość siły F_C poprzez czujnik umieszczony w ramie mostu napędowego (pośredni pomiar siły napędowej) [3].

Układ pomiarowy składał się z:

- czujnika siły ZEPWN CL14U o zakresie pomiarowym 0 – 10 kN i klasie 0,05;
- systemu akwizycji danych IO Tech Personal DAQ 3005;
- komputera typu laptop rejestrującego pomiary.

Zasadnicze badania poprzedziły badania wstępne, których celem było określenie masy całkowitej platformy testowej jak również jej rozkładu na poszczególne osie. W tym celu najechano kołami platformy na analogowe wagi o zakresie 0–100 kg i dokonano odczytu wartości. Masa własna platformy kołowej wyniosła $m_W = 232$ kg, przy czym masa przypadająca na człon napędowy jest równa $m_N = 140$ kg, a masa członu transportowego $m_T = 92$ kg.

W celu uzyskania siły napędowej F_N podczas jazdy niezbędne było przeliczenie siły uzyskanej z pomiaru zgodnie z zależnością [3]:

$$F_N = \frac{F_C \cdot a}{r_d} \quad (1)$$

gdzie: F_N – siła napędowa

a – promień działania czujnika siły, $a=0,18$ m

r_d – promień dynamiczny koła (dla koła 110/100x18 = 0,3 m, dla koła 70/100x17 = 0,25 m).

Tak wyliczona siła napędowa umożliwi określenie współczynnika oporów toczenia kół lekkiej platformy testowej na podstawie zależności [4]:

$$f = \frac{F_N}{Q} \quad (2)$$

gdzie: Q – całkowity ciężar platformy ($Q = 2320$ N).

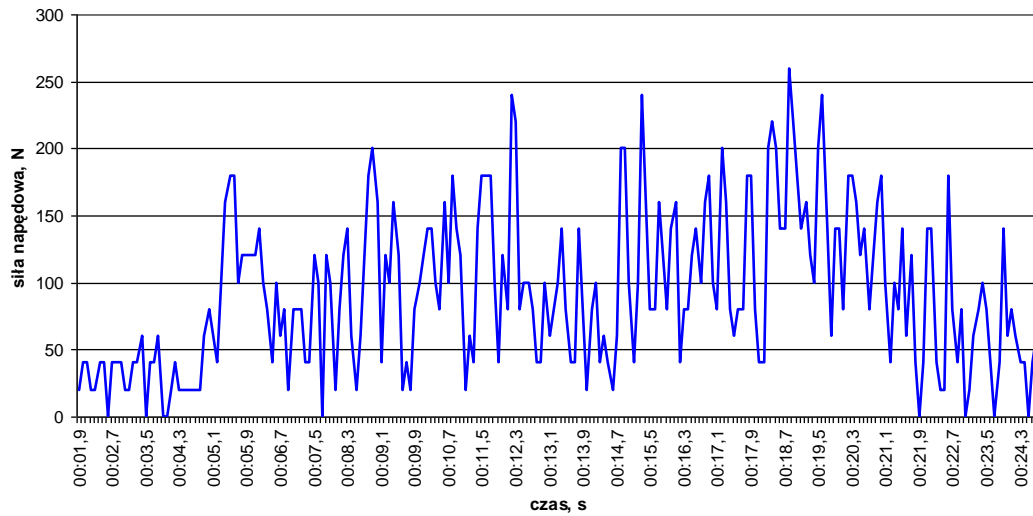
Badania wymaganych sił napędowych niezbędnych do jazdy platformy dokonano na podłożu betonowym, na gruncie o nośności $CI = 280$ kPa oraz na gruncie o obniżonej nośności $CI = 150$ kPa.

Próby zostały przeprowadzone zarówno dla kół o mniejszej jak i większej średnicy (rys.2).



Rys.2. Kolowa platforma testowa z dwoma rodzajami kół podczas badań na: a) podłożu betonowym, b) gruncie o nośności $CI = 280$ kPa, c) gruncie o nośności $CI = 150$ kPa

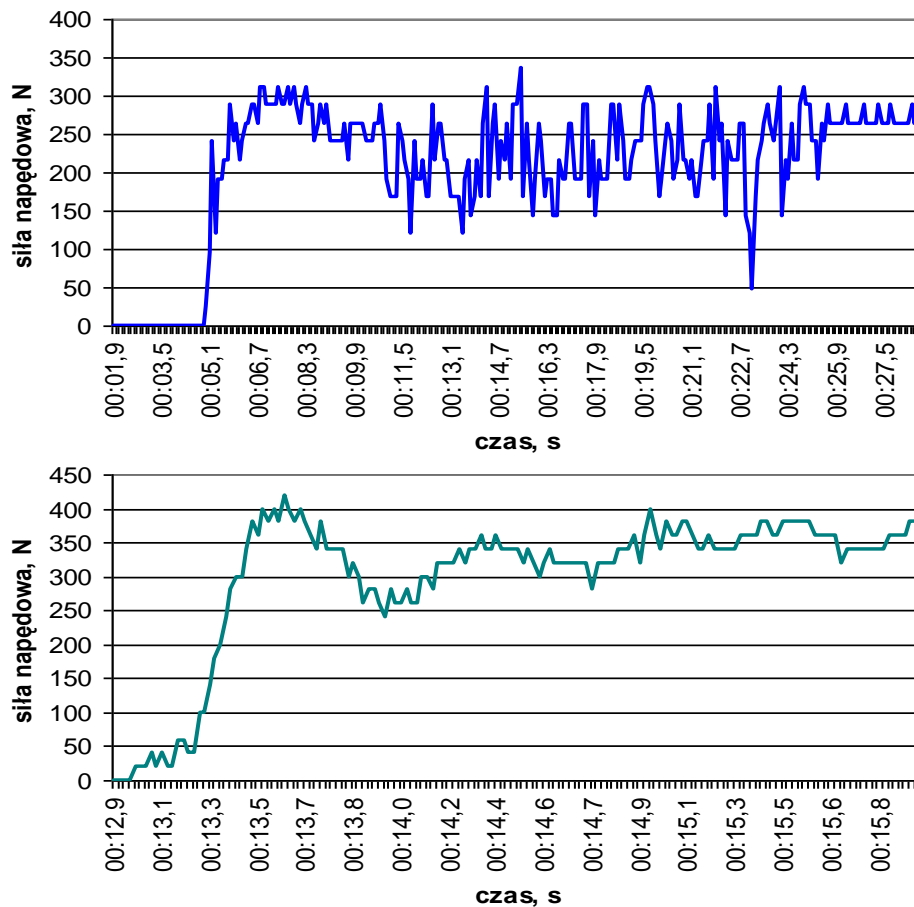
Podczas każdej z prób jechano ze stałą prędkością po określonym podłożu bez wykonywania manewrów skrętu. Przebieg czasowy zmiany wartości siły napędowej F_N podczas jazdy platformą po podłożu betonowym z kołami o większej średnicy przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Przebieg czasowy zmiany wartości siły napędowej podczas próby wykonywanej na podłożu betonowym z kołami o rozmiarze 110/100x18

Siła napędowa F_N podczas jazdy platformy z kołami o większej średnicy po podłożu betonowym (rys.3) zmienia się w zakresie 50–150 N. Do wyznaczenia współczynnika oporów toczenia przyjęto wartość 100 N. Dla wartości tej współczynnik oporów toczenia f dla kół o rozmiarze 110/100x18 wynosi zgodnie z zależnością (2) 0,04. Natomiast dla kół o rozmiarze 70/100x17 wartość zidentyfikowanego współczynnika oporów toczenia po podłożu betonowym wynosi 0,03.

Przebiegi czasowe zmiany wartości siły napędowej podczas jazdy platformy kołowej po podłożu gruntowym o nośności $CI = 280$ kPa przedstawiono na rysunku 4.

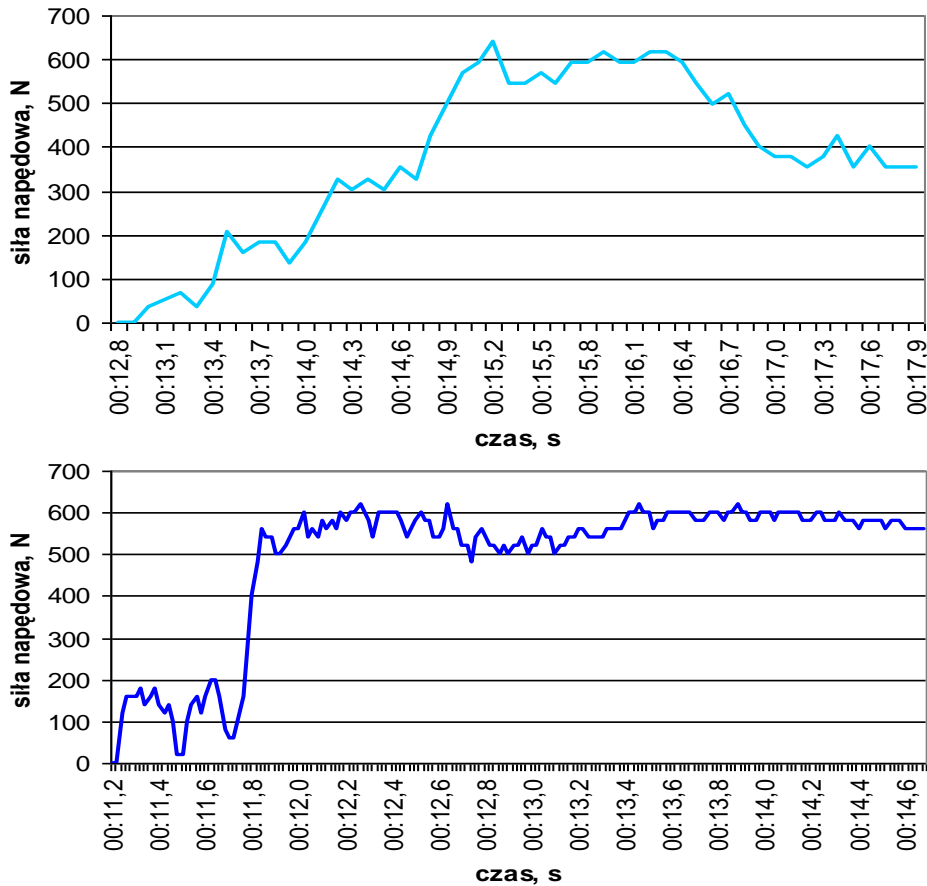


Rys.4. Przebiegi czasowe zmiany wartości siły napędowej podczas próby wykonywanej na podłożu gruntowym o nośności $CI = 280$ kPa z kołami: a) o rozmiarze 70/100x17, b) o rozmiarze 110/100x18

Układ napędowy platformy z kołami o rozmiarze 70/100x17 podczas jazdy po twardym podłożu gruntowym generuje siłę napędową zmieniającą się w zakresie 200–250 N, natomiast z kołami o rozmiarze 110/100x18 średnia siła napędowa wynosi 350 N. Zatem zidentyfikowana wartość współczynnika oporów toczenia lekkiej platformy kołowej poruszającej się po podłożu gruntowym wynosi:

- dla kół 70/100x17 – $f = 0,11$;
- dla kół 110/100x18 – $f = 0,15$.

Przebiegi czasowe zmiany wartości siły napędowej podczas jazdy platformy kołowej po gruncie o obniżonej nośności przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Przebiegi czasowe zmiany wartości siły napędowej podczas próby wykonywanej na podłożu gruntowym o obniżonej nośności z kołami: a) o rozmiarze 70/100x17, b) o rozmiarze 110/100x18

Zarówno w przypadku jednych jak i drugich kół rozwijana przez platformę siła napędowa zbliżona jest do wartości 600 N. Zatem opory toczenia kół w jednym jak i drugim rozmiarze są do siebie zbliżone, a ich współczynnik $f = 0,25$.

Przeprowadzone badania wykonane na zróżnicowanych nawierzchniach pozwoliły zidentyfikować wartości współczynników oporów toczenia różnych kół. Ich wartości wraz z analogicznymi danymi literaturowymi zestawiono w tabeli 2. Wartości literaturowe (z uwagi na zapotrzebowanie przemysłu) podawane są szczegółowo dla kół samochodowych lub wielkogabarytowych (niskociśnieniowych) stosowanych w maszynach roboczych.

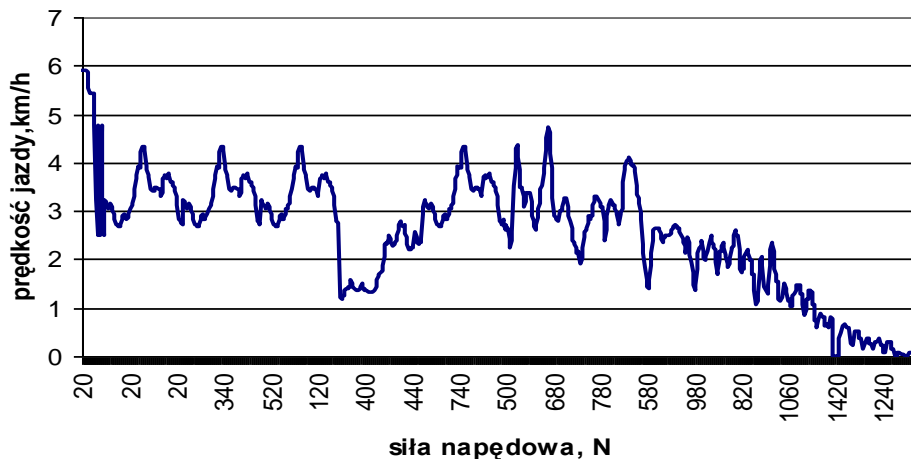
Tab.2. Wartości współczynników oporów toczenia kół po różnych podłożach [4,5]

	Wartość literaturowa	Wartość zidentyfikowana (w zależności od rodzaju kół)
Beton (podłoże nieodkształcalne)	0,02	0,03 – 0,04
Grunt	0,16	0,11 – 0,15
Grunt podmokły	0,18	0,25

W celu oszacowania wartości współczynnika przyczepności ϕ platformy z kołowym układem bieżnym na podłożu gruntowym przeprowadzono próbę (rys.6.) polegającą na ciągnięciu kołowej przyczepy z płożą, która wraz z przebytą drogą powodowała coraz większe opory. Zwiększanie oporów następuje poprzez przesuwanie się ciężaru zamieszonego na przyczepie i dociążanie płoży. Celem badania było wykreślenie charakterystyki zależności prędkości jazdy od siły napędowej (rys.7.).



Rys.6. Kolowa platforma testowa podczas próby wyznaczenia współczynnika przyczepności na podłożu gruntowym



Rys.7. Zależność prędkości jazdy platformy od jej siły napędowej

Stopniowy spadek prędkości jazdy platformy ściśle związany jest ze zwiększającym się poślizgiem kół po podłożu. Próba ta pozwoliła na określenie maksymalnej siły przyczepności F_ϕ zgodnie z zależnością [4]:

$$F_\phi = F_N - F_f \quad (3)$$

Dla podłoża gruntowego o nośności $CI = 280 \text{ kPa}$ i kół o rozmiarze $110/100 \times 18$ współczynnik przyczepności wynosi $0,55$, natomiast w przypadku kół $70/100 \times 17$ – $0,45$. Analogiczna próba przeprowadzona na pozostałych podłożach pozwoli na zidentyfikowanie pozostałych współczynników przyczepności.

W trakcie badań platformy przeprowadzono również próbę zidentyfikowania oporów wzniesienia oddziałujących na tego typu lekką platformę kołową. Dokonano przy tym wjazdu platformą na wzniesienie o nachyleniu 30% i 40% . Zbocza wzniesień zostały wyłożone ażurowymi płytami betonowymi. Próbę przeprowadzono z zamontowanymi kołami o większym promieniu, dla których zidentyfikowana wartość współczynnika oporów toczenia na podłożu betonowym wynosi $f = 0,04$. Uwzględniając pochylenie terenu wartość współczynnika oporów wzniesienia wyznaczano na podstawie zależności [4]:

$$i = \frac{F_N - f \cdot Q \cdot \cos \alpha}{Q \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

gdzie: $\cos \alpha$ – dla wzniesienia o nachyleniu $30\% = 0,957$, dla wzniesienia o nachyleniu $40\% = 0,925$.

Wyznaczona bezpośrednio z pomiarów wartość siły napędowej niezbędnej do wjazdu platformy na wzniesienie o nachyleniu 30% wynosi około 900 N , natomiast dla wzniesienia o nachyleniu 40% jej wartość wzrosła do 1100 N . Przebiegi czasowe zmiany wartości siły F_N podczas prostopadłego wjazdu platformy na wzniesienia przedstawiono na rysunku 8.

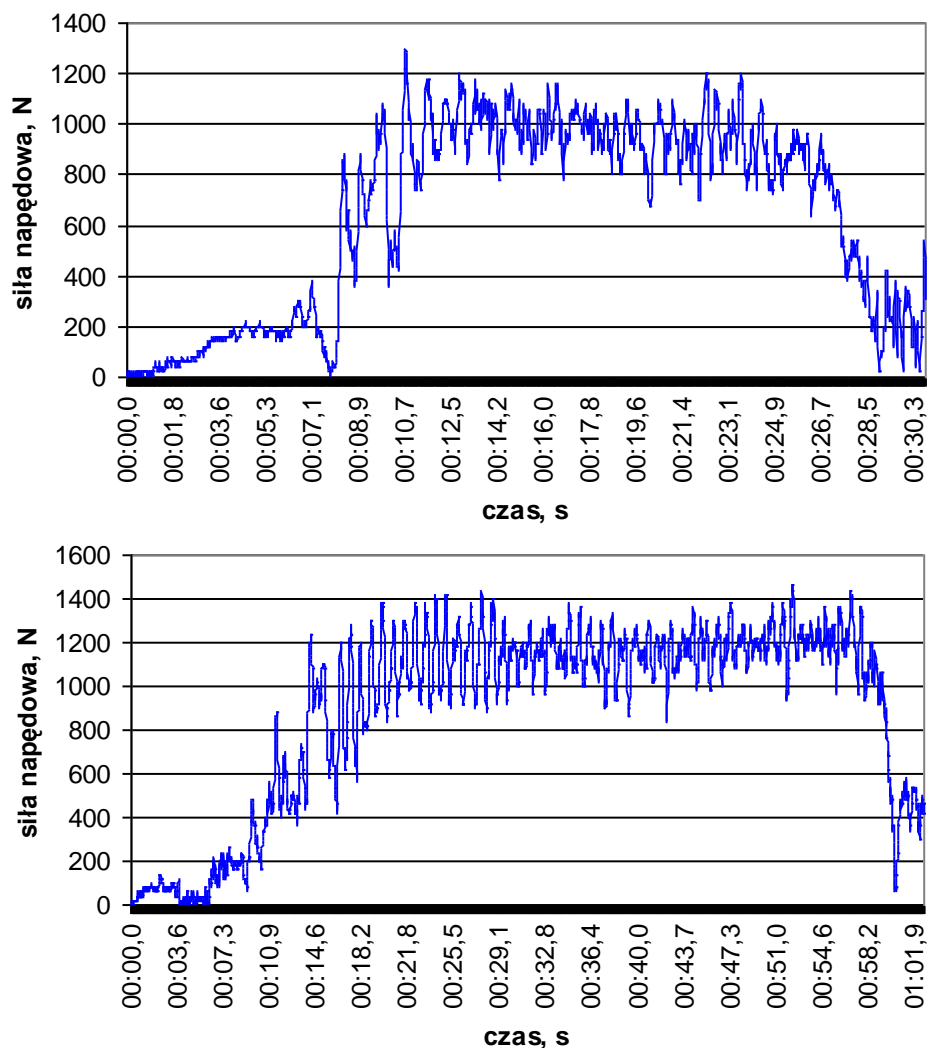
Zgodnie z zależnością (4) współczynnik oporów wzniesienia wynosi:

– dla pochylenia 30% :

$$i_{30} = \frac{900 - 0,04 \cdot 2320 \cdot 0,957}{2320 \cdot 0,957} = 0,36 \quad (5)$$

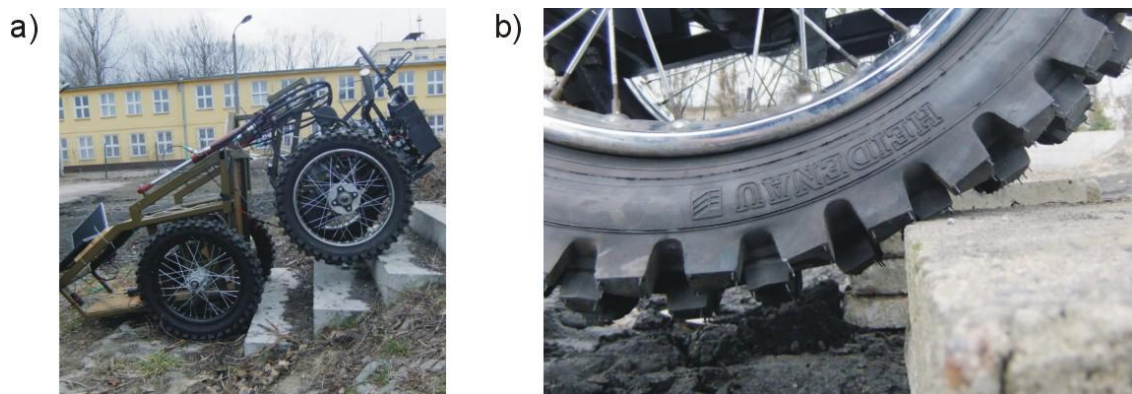
– dla pochylenia 40 %:

$$i_{40} = \frac{1100 - 0,04 \cdot 2320 \cdot 0,925}{2320 \cdot 0,925} = 0,47 \quad (6)$$



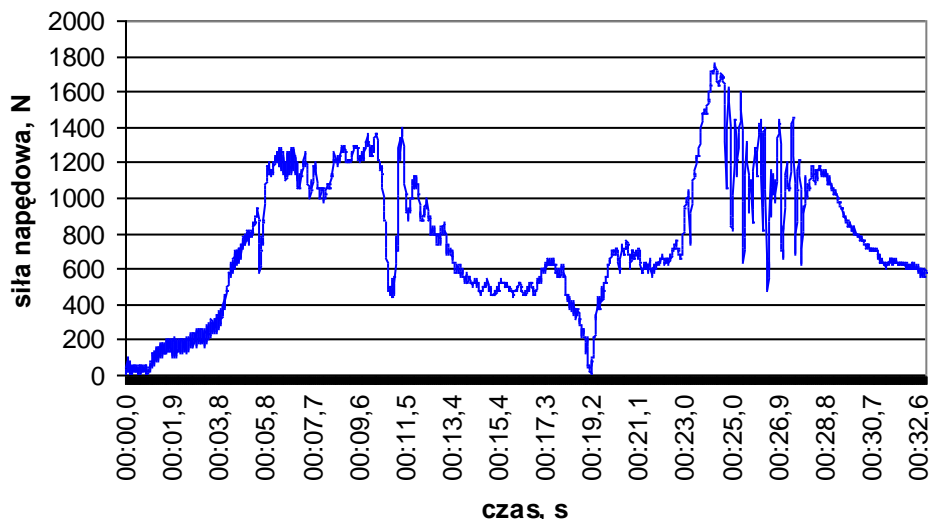
Rys.8. Przebiegi czasowe wartości siły napędowej podczas wjazdu platformy na wzniesienie: a) o nachyleniu 30 %, b) o nachyleniu 40 %

Analogicznie wyznaczono współczynnik oporów wjazdu na schody o wysokości stopnia równej 17 cm i długości 25 cm. W tym celu dokonano próby wjazdu platformą na betonowe schody (rys.9). Wjazd na schody tego typu platformy możliwy jest dzięki kształtowej współpracy bieżnika terenowego koła z kolejnymi stopniami (rys.9b).



Rys.9. Próba określenia siły napędowej podczas wjazdu platformy kołowej na schody: a) platforma podczas badania, b) kształtowa współpraca bieżnika ze stopniem

Przebieg czasowy zmiany wartości siły F_N podczas wjazdu platformy na kolejne stopnie schodów przedstawiono na rysunku 10.



Rys.10. Przebieg czasowy zmiany wartości zarejestrowanej siły napędowej w trakcie wjazdu platformy na schody

Zarejestrowana wartość siły napędowej niezbędna do wjazdu platformy na schody wynosi około 1400 N i jest to wartość odpowiadająca współczynnikowi przyczepności zbliżonego do wartości 1 (kształtowa współpraca bieżnika z podłożem). Współczynnik oporów pokonywania schodów przez pojazd kołowy, którego opony posiadają tego typu bieżnik kształtuje się na poziomie 0,75 – 0,8.

3. WNIOSKI

Przeprowadzone badania identyfikacyjne rozwijanych sił napędowych F_N zbudowanej kołowej platformy testowej umożliwiły zidentyfikowanie współczynników oporów toczenia f zastosowanych kół na różnych nawierzchniach (tab.2). Uzyskane wyniki (z wyjątkiem gruntu o obniżonej nośności) są zbliżone do danych literaturowych, co świadczy o możliwości wykorzystania dostępnych w literaturze danych do projektowania układów napędowych lekkich BPL. Kołowa platforma wyposażona w koła o rozmiarze 110/100x18 odznaczała się większymi oporami toczenia niż w przypadku zastosowania kół 70/100x17.

Podwozia kołowe w lekkich platformach lądowych (z uwagi na niskie opory ruchu w stosunku do podwozi gąsienicowych) powinny być stosowane tam, gdzie wymagane są układy o niskiej energochłonności. Wadą kołowych układów jezdnych są jednak stosunkowo duże (w porównaniu do gąsienicowych) naciski jednostkowe, przez co ich wykorzystanie na terenach o niskiej nośności jest ograniczone. Ponadto, poruszając się koła tworzą koleiny, niszcząc tym samym podłoże, co ma szczególne znaczenie w przypadku działań BPL na obszarach chronionych.

Wymagana zdolność do poruszania się platformy we wnętrzu budynków (maksymalna szerokość platformy 70 cm) powoduje, że zmniejszenie nacisków jednostkowych układu bieżnego przez zastosowanie szerszych opon jest bardzo ograniczone z uwagi na konieczność rozmieszczenia elementów napędowych (o określonych gabarytach) oraz ramy nośnej pomiędzy jej kołami.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Dąbrowska A., Łopatka M.J., Rubiec A.: *Wykorzystanie modelu symulacyjnego do oceny mobilności wąskiej platformy eksploracyjnej*, LOGITRANS – VI Konferencja Naukowo-Techniczna Logistyka, Systemy Transportowe, Bezpieczeństwo w Transporcie, Szczyrk 2009.
- [2] Dąbrowska A., Łopatka M.J., Rubiec A.: *Ocena mobilności lekkich bezałogowych pojazdów lądowych*, LOGITRANS – VII Konferencja Naukowo-Techniczna Logistyka, Systemy Transportowe, Bezpieczeństwo w Transporcie, Szczyrk 2010.
- [3] Sprawozdanie z projektu badawczego nr ON502001234/PBG *Kształtowanie struktur układów zawieszenia i jazdy lekkich bezałogowych platform lądowych ekstremalnej mobilności*. WAT, Warszawa 2011.
- [4] Prochowski L.: *Teoria ruchu i dynamika pojazdów mechanicznych, cz.1 i 3*, Warszawa, WAT 1998.
- [5] Brach J., Tyro G.: *Maszyny ciągnikowe do robót ziemnych*, Warszawa, WNT 1986.

Niniejsza praca jest częściowo finansowana z projektu rozwojowego nr 1649/B/T00/2010/40.