

PROBLEMS OF UNITS SELECTION OF PROPULSION SYSTEM FOR SMALL UNMANNED TACTICAL VEHICLE

Filip Polak, Jerzy Walentynowicz

Military University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel./fax: +48 022 6839565
e-mail: j.walentynowicz@wme.wat.edu.pl

Abstract

The battlefield was changed during many years and the weapon was developed also. Unmanned vehicles are one of the new kinds of weapon. They have different mass, executed tasks and the scope of autonomy. Their hybrid propulsion system increase traction proprieties of these vehicles considerably.

The concept of the hybrid drive for the small unmanned vehicle was the main goal of the work. It was made assumptions, that the vehicle will have the mass approximately 1 ton, running on six wheels with the speed up to 60 km/h. The vehicle will have the combustion engine power 25 kW as the basic source of energy, Energy will be accumulated in batteries the mass 48kg and specific power 2667 W/kg. The single electric engine will propel six wheels of the vehicle. Four rare and front wheel will be steered. Units of propulsion system were selected with using the computer program ADVISER2004, and traction effort versus vehicle speed was determined on the base of the movement equations of the vehicle.

The drive of the vehicle in unsteady condition was simulated using the program ADVISER2004 accord to the tests of ECE, FTP and 1015. It was affirmed that the vehicle with the chosen propulsion system could move with the speed more then 60 km/h on the asphalt roadway and below 50 km/h on the sandy road. It can to surmount the slopes 60%. Fuel consumption is circa 4 l/100 km in simulated drive test with the limitation of the maximum speed up to 60 km/h. The run range was circa 12 km as the electric vehicle.

Keywords: unmanned vehicle, hybrid propulsion systems, unit's selection

PROBLEMY DOBORU ZESPOŁÓW UKŁADU NAPĘDOWEGO DO MAŁEGO TAKTYCZNEGO POJAZDU BEZZAŁOGOWEGO

Streszczenie

Pole walki zmieniało się na przestrzeni wielu lat tak samo jak środki walki. Jednym z tych środków są pojazdy bezzałogowe. Różnią się one masą, wykonywanymi zadaniami oraz stopniem autonomii. Wyposażenie ich w hybrydowe układy napędowe znacznie zwiększa ich właściwości trakcyjne.

Celem pracy było opracowanie koncepcji napędu hybrydowego do małego pojazdu bezzałogowego. Założono, że będzie to pojazd o masie ok. 1 tony, poruszający się na kołach z prędkością do 60km/h. Podstawowym źródłem napędu będzie silnika spalinowy o mocy 25 kW, a energia będzie gromadzona w akumulatorach o masie 48 kg i mocy właściwej 2667 kW/kg. Pojedynczy silnik elektryczny będzie napędzał sześć kół pojazdu za pomocą wałów napędowych, w tym cztery koła kierowane. Zespoły układu napędowego dobrano przy wykorzystaniu programu komputerowego ADVISER2004, a charakterystyki trakcyjne wyznaczono w oparciu o równania ruchu pojazdu.

Za pomocą programu ADVISER2004 symulowano jazdę pojazdu w stanach nieustalonych zgodnie z testami ECE, FTP i 1015. Stwierdzono, że pojazd z dobranym układem może poruszać się z prędkością ponad 60 km/h pod drodze asfaltowej i poniżej 50km/h po drodze piaszczystej, pokonywać wzniesienia powyżej 60% przy zużyciu paliwa około 4 l/100 km podczas symulowanej jazdy wg uwzględnianych testów przy ograniczeniu maksymalnej prędkości do 60 km/h. Zasięg jazdy przy napędzie elektrycznym wynosił ok. 12km.

Słowa kluczowe: pojazdy bezzałogowe, hybrydowe zespoły napędowe, dobór zespołów

1. Wprowadzenie

Pole walki zmieniało się na przestrzeni wielu lat tak samo jak środki walki. Człowiek w przeszłości był zdany wyłącznie na siebie i swoje umiejętności. Współcześnie dzięki rewolucji technicznej i informatycznej ma on szereg narzędzi, które wspomagają jego działanie i rozszerzają zakres jego działalności.

Obecnie można zauważyć znaczny rozwój konstrukcji bezzałogowych pojazdów lądowych, powietrznych jak również poruszających się w wodzie. Zastosowanie bezzałogowych systemów walki na za zadanie zmniejszyć bezpośredni udział człowieka w działaniach zbrojnych, a w efekcie liczbę ofiar podczas tych działań. Jednocześnie konieczne jest zwiększenie efektywności takich działań.

Obecnie bezzałogowe pojazdy lądowe są w fazie zaawansowanego rozwoju i znajdują zastosowanie jako platformy bojowe, pojazdy zaopatrzenia, rozpoznania i nadzoru. Różnią się one masą, wykonywanymi zadaniami oraz stopniem autonomii. Wyposażenie ich w hybrydowe układy napędowe znacznie zwiększa ich właściwości trakcyjne. Zakres pracy dotyczy bezzałogowych pojazdów lądowych, które mogą pełnić rozmaite funkcje, nie tylko wykorzystywane w czasie konfliktów zbrojnych, lecz również w czasie pokoju.

Bezzałogowe pojazdy lądowe mogą być sklasyfikowane w kategoriach masy, prędkości jazdy i autonomiczności działania, przy czym kryteria podziału przyjęte przez państwa mogą być różne.

Pod względem masy można wyróżnić cztery grupy pojazdów [7]:

- miniplatformy o masie poniżej 30 kg, przenoszone przez żołnierzy, wykorzystywane do rozpoznania terenu na niewielkie odległości,
- małe platformy o masie własnej do 0,5 tony, przeznaczone do rozpoznania, ewakuacji rannych oraz ograniczonych działań bojowych,
- platformy taktyczne, których masa nie przekracza 5 ton, terenowe, przeznaczone do transportu lekkiego uzbrojenia, rozpoznania, niszczenia min, dowozu amunicji, wykonywania podstawowych zadań inżynierskich,
- platformy duże to bezzałogowe wersje bojowych wozów załogowych.

Klasyfikacje pojazdów bezzałogowych mogą się różnić zależnie od państwa - na przykład w amerykańskim „Future Combat System” pojazdy podzielono na trzy grupy.

Pod względem współpracy z operatorem pojazdy podzielono na [5, 6]:

- pojazdy zdalnie sterowane przez teleoperatora oddalonego od pojazdu, wyposażone w czujniki i urządzenia do nawigacji,
- pojazdy półautonomiczne (*SAP/F*), działające w sposób wcześniej zaprogramowany, wyposażone w rozbudowany system nawigacji komunikujące się z teleoperatorem sporadycznie, w celu zaakceptowania realizacji kolejnego zadania,
- pojazdy wewnątrznie autonomiczne (*Platform Centric AGV, PC-AGV*) wykonują zadania lub misje zbierając informacje również ze źródeł innych niż własne czujniki, mają autonomię A-B (działanie między punktami A...B) oraz zdolność do realizacji misji w niebezpiecznym terenie, a także do samoobrony na poziomie oferowanym przez załogowe odpowiedniki tych pojazdów.
- sieciocentryczne, działające jak sieć rozproszona (*Network-Centric Autonomous Ground Vehicles, NC-AGV*) są pojazdami autonomicznymi tak jak pojazdy wewnątrznie autonomiczne, lecz działającymi w sieci jak „węzły”, odbierając informacje i polecenia oraz rozdysponowując je wewnątrz grupy pojazdów odbywającej misję.

Pod względem prędkości jazdy pojazdy podzielić można na dwie podgrupy [7]:

- pojazdy – prędkość jazdy większa niż 5 km/h,
- roboty – prędkość jazdy mniejsza niż 5 km/h.

Celem prezentowanej pracy był dobór parametrów hybrydowego układu napędowego do małego pojazdu bezzałogowego o masie 1 tony określenie parametrów pojazdu z takim układem napędowym.

2. Koncepcja pojazdu

Najbardziej przydatnym pojazdem bezzałogowym do bezpośredniego wsparcia piechoty jest pojazd, który według założeń programu FCS określany jest jako MULE (Multifunction Utility/Logistic Equipment Vehicle). Jest to pojazd o przeznaczeniu pomocniczo-logistycznym, który jest w stanie zapewnić transport wyposażenia albo zapasów w sposób samodzielny [2]. Przy projektowaniu przyjęto taką koncepcję pojazdu.

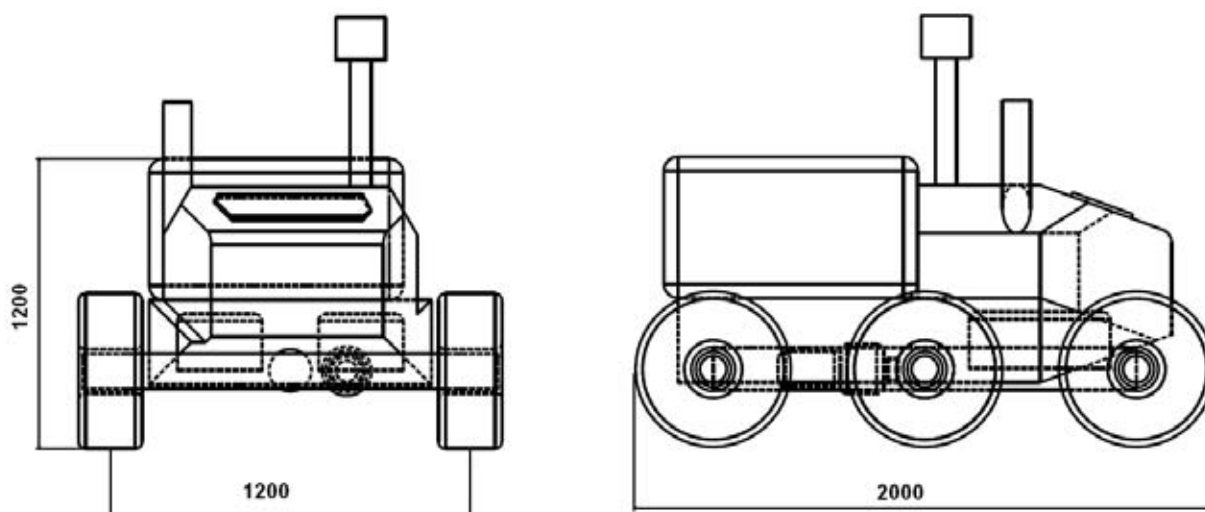


Rys. 1 Pojazd klasy MULE do zadań transportowych
Fig. 1. Vehicle class MULE for transportation tasks

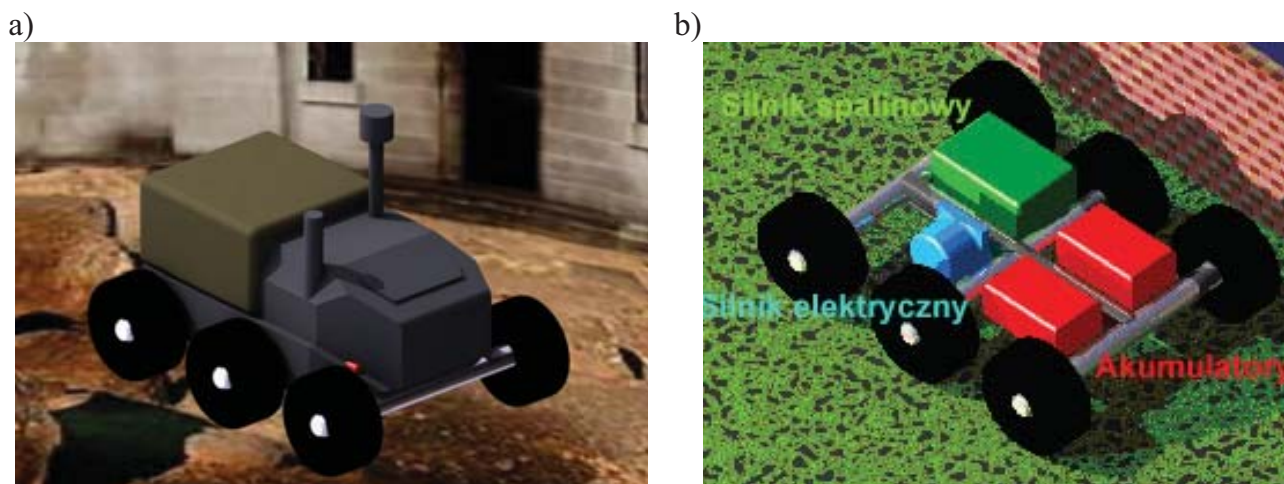
Założono następujące parametry wstępne pojazdu:

- masa pojazdu ok. 1T,
- masa ładunku ok. 30-40% masy całkowitej,
- zasięg 200 km,
- prędkość maksymalna 60 km/h,
- pokonywania wzniesień min. 45%,
- moc silnika 30-40 kW,
- liczba kół 6,
- dwie osie skądne z przodu i z tyłu pojazdu.

Do innych wymagań założono zdolność cichej jazdy na akumulatorach przy prędkości nie mniejszej niż 25 km/h i zasięgu 2-5 km. Przybliżone wymiary liniowe pojazdu przedstawiono na rysunku 2, a jego widok na rys. 3.



Rys. 2. Wymiary gabarytowe pojazdu bezzałogowego
Fig. 2. Overall dimensions of unmanned vehicle



Rys. 3. Widok pojazdu bezzalogowego (a) i zespoły jego układu napędowego (b)
 Fig. 3. Picture of unmanned vehicle (a) and its sets of propulsion system (b)

3. Obliczenia zespołów pojazdu

Do obliczeń zespołów pojazdu zastosowano program ADVISOR 2004 (Advanced Vehicle Simulator), który jest zbiorem modeli, danych, i skryptów, działających pod kontrolą programu Matlab i Simulink. Oprogramowanie to zostało stworzone do szybkiej analizy osiągnięć pojazdów z napędem konwencjonalnym, elektrycznym oraz hybrydowym. Dzięki bogatej bazie danych możliwe jest łatwe tworzenie modeli pojazdów osobowych i ciężarowych z napędem elektrycznym, spalinowym, hybrydowym, w tym wykorzystujących ogniwa paliwowe zasilane wodorem. Dzięki wbudowanemu modułowi możliwa jest analiza zachowania się pojazdu w poszczególnych warunkach drogowych, na które składają się standardowe testy drogowe (np. EEC, FTP, 1015 i inne).

Program jest bardzo intuicyjny, wymagający wiedzy z zakresu mechaniki i konstrukcji pojazdów. Skonstruowany przez użytkownika układ jest poddawany testom i na podstawie tych testów możliwe jest prowadzenie dalszych prac nad zwiększeniem zasięgu, zmniejszeniem zużycia paliwa przez pojazd i innymi właściwościami pojazdu.

Program ten powstał w Narodowym Laboratorium Odnawialnych Energii (NREL – USA), a obecnie jest oferowany komercyjnie przez międzynarodowe konsorcjum AVL Graz. Model pojazdu obejmował dziesięć plików niezbędnych do symulacji jego właściwości trakcyjnych oraz realizacji testów drogowych.

Z menu *Load File* wybrano rodzaj układu napędowego do projektowanego pojazdu. Po wyborze układu napędowego, w lewym rogu pojawił się wizerunek pojazdu wraz z podzespołami. Akceptując poszczególne podzespoły otrzymano dostęp do listy edycji danego podzespołu.

1. W podprogramie *Vehicle* utworzono plik z danymi pojazdu takimi jak jego wymiary zewnętrzne, masa ładunku, itd.
2. Wczytano dane wybranego silnika spalinowego z podprogramu *Fuel Converter* (pojemność silnika, jego masę, stopień sprężania, moc oraz szereg innych danych silnika).
3. Podprogram *Energy Storage* zawierało dane baterii możliwych do zamontowania w pojeździe, od zwykłych baterii kwasowych do superkondensatorów. Ze względu na przewidywana opcje „jazdy cichej”, tylko przy napędzie elektrycznym wybrano baterie litowo-jonowe o większej masie niż na przykład superkondensatory, ale o większej pojemności energetycznej.
4. Podprogram *Motor* umożliwił wybór silnika elektrycznego do napędu pojazdu, a charakterystycznymi wielkościami były np. moc, sprawność, zakres prędkości obrotowej, momentu, rodzaj prądu, itd.
5. Podprogram *Generator* umożliwiał wybór generatora prądu.

6. Za pomocą podprogramu *Transmission* wybrano skrzynię biegów do pojazdu. Możliwy był wybór skrzyni bezstopniowej, wielobiegowej, automatycznej i manualnej. Utworzono plik z wartościami przełożeń skrzyni biegów.
 7. *Wheel/axle* – to okienko dało możliwość wyboru rodzaju kół użytych w pojeździe. Określono ich parametry konstrukcyjne i rodzaj bieżnika oraz inne niezbędne parametry.
 8. *Accessory* oraz *Powertrain Control* pozostawiono wartościami domyślnymi.
- Wszystkie uaktywnione programy zostały one wyszczególnione na ekranie interface (rys. 4).



Rys. 4. Ekran interfejsu programu ADVISOR w wersji 2004
 Fig. 4. Interface screen of the ADVISOR program version 2004

5. Dobór zespołów układu napędowego pojazdu

W pojeździe hybrydowym powinna być zapewniona prawidłowa współpraca zespołów:

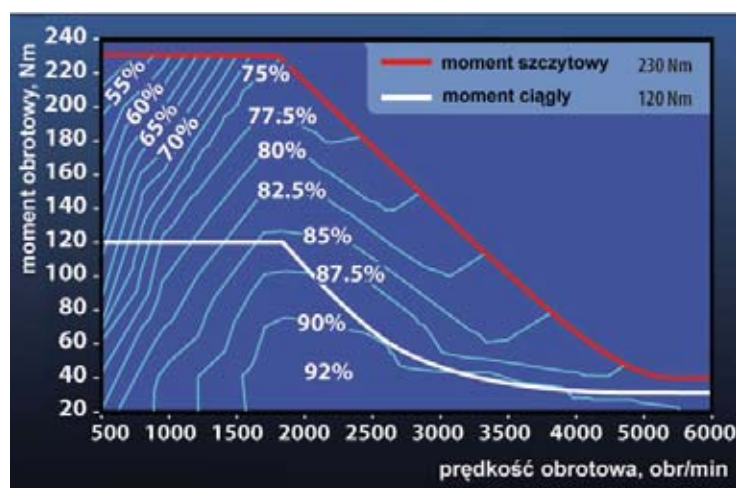
- silnika spalinowego, jako podstawowego źródła energii,
- silnika elektrycznego do bezpośredniego napędu pojazdu,
- baterii akumulatorów do akumulacji i uwalniania energii odpowiednio do potrzeb.

Biorąc pod uwagę konieczne uproszczenie zespołu napędowego przyjęto szeregowy układ napędowy, w którym silnik jest wykorzystany do ładowania baterii akumulatorów. Układ sterowania zapewnia odpowiednie naładowanie baterii przed ich przełączeniem w tryb cichej jazdy, tylko przy wykorzystaniu silnika elektrycznego. Podczas hamowania silnik elektryczny jest wykorzystywany do odzysku energii i ładowania akumulatorów.

Silnik spalinowy został tak dobrany, aby zapewniał jak najmniejsze zużycie paliwa. Był to silnik o zapłonie samoczynnym i mocy 25 kW dobrany z katalogu.

Obecnie w pojazdach hybrydowych, stosuje się silniki trójfazowe bezkomutatorowe z magnesami trwałymi. Wybrany silnik elektryczny P-50 firmy RASER Technologies ma moc 25 kW, z możliwością jej zwiększenia do 48 kW (rys. 5). Jest to możliwe w krótkim czasie jednak przy sprawności poniżej siedemdziesięciu procent. Podstawowe parametry silnika P-50:

- moment obrotowy maksymalny/ciągły 230 /120 Nm,
- moc maksymalna /ciągła 48 / 25 kW,
- maksymalna sprawność 92%,
- napięcie nominalne 300 V,
- prędkość obrotowa 0...6000 obr/min,
- masa silnika 48 kg.



Rys. 5. Charakterystyka silnika elektrycznego P-50
 Fig. 5. Characteristic of the motor P-50

Akumulatory dobrano tak, aby miały pojemność umożliwiającą jazdę z wyłączonym silnikiem spalinowym podczas zadań wymagających cichej jazdy. Akumulatory powinny charakteryzować się dużą mocą, niewielką masą oraz małymi rozmiarami. Do projektowanego układu napędowego przyjęto baterie litowo-jonowe o następujących parametrach:

- napięcie znamionowe 430 V,
- pojemność znamionowa 279 Ah,
- moc właściwa 2667 W/kg,
- masa baterii 45 kg.

Zbiornik paliwa został tak dobrany, aby zapewniał zasięg 150 km w warunkach miejskich, co przy oszczędnym cyklu jazdy powinno zapewnić zasięg ok. 250-300 km. Uwzględniając średnie zużycie paliwa na poziomie 4 l/100 km, uzyskane w trakcie symulacji testów jezdnych zbiornik paliwa powinien mieć pojemność minimum 12 litrów paliwa.

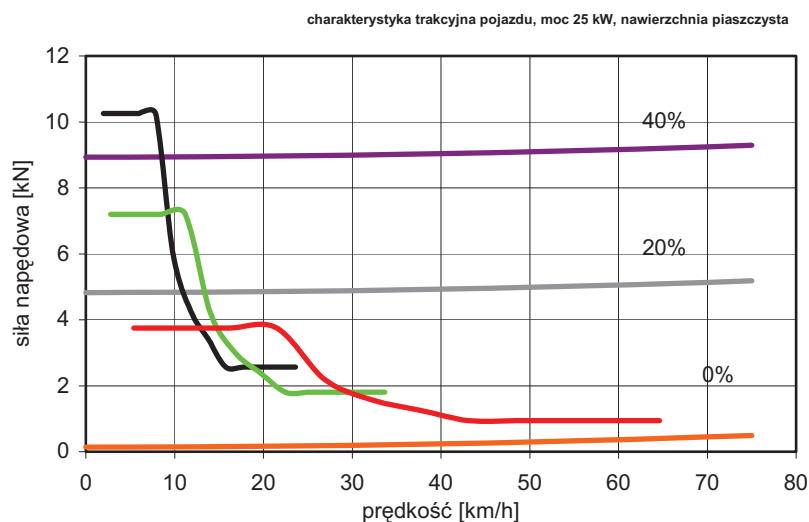
6. Charakterystyki trakcyjne pojazdu

Do wyznaczenia charakterystyk trakcyjnych pojazdu przyjęto następujące parametry pojazdu:

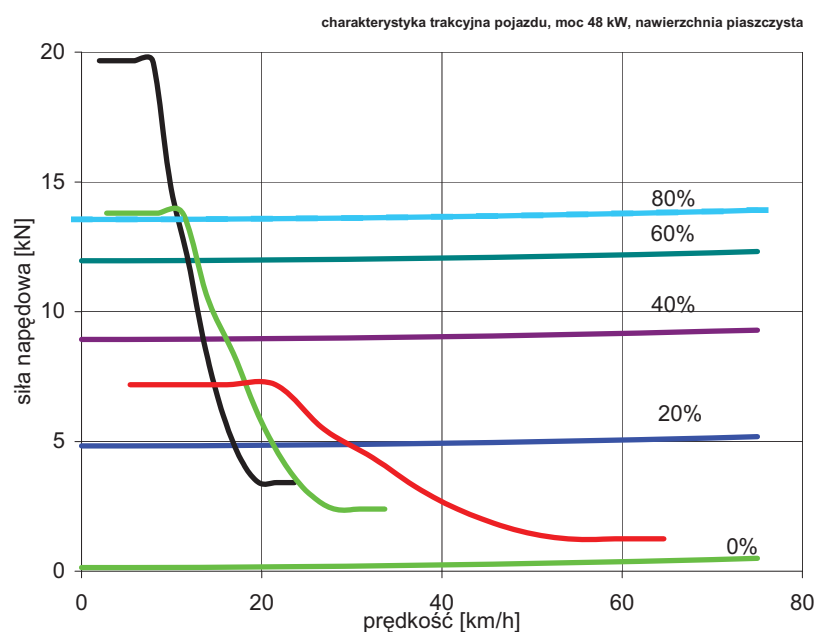
- masa całkowita 1400 kg,
- zasięg 300 km,
- prędkość maksymalna 65 km/h,
- opony (terenowe) 200/70 R12,
- przełożenia skrzyni biegów:
 - bieg I - 17,1,
 - bieg II - 12,
 - bieg III - 6,25.

Przykłady charakterystyk statycznych przedstawiających zmiany siły napędowej w funkcji prędkości jazdy pojazdu po drogach piaszczystych przy różnej mocy silnika przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Po płaskiej drodze piaszczystej pojazd może poruszać się z założoną prędkością, jednak jego zdolności pokonywania wzniesień szybko maleją przy większym pochyleniu drogi i przy mocy znamionowej silnika trudno będzie pokonać wzniesieniu 40% nawet na I biegu z małą prędkością jazdy. Gdyby użytkownik wymagał większej prędkości również na drogach nieutwardzonych to należałoby zwiększyć moc silnika elektrycznego.

Po drodze asfaltowej pojazd bez problemu może rozwinąć prędkość 65 km/godz, na siła napędowa pozwala na pokonywanie wzniesień o nachyleniu powyżej ok. 80%, a przy większym nachyleniu trzeba włączyć I bieg.



Rys. 6. Charakterystyka trakcyjna pojazdu, moc 24 kW, droga piaszczysta
 Fig. 6. Tractive effort versus vehicle speed, power 48kW, sandy road

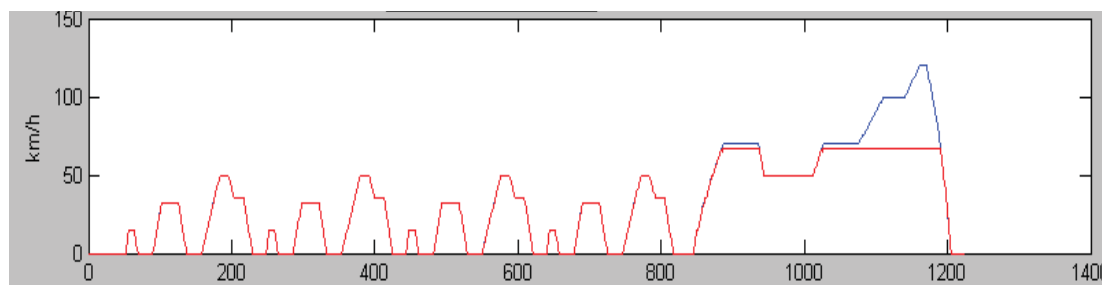


Rys. 7. Charakterystyka trakcyjna pojazdu, moc 48 kW, droga piaszczysta
 Fig. 7. Tractive effort versus vehicle speed, power 48kW, sandy road

Przeprowadzono symulacje jazdy pojazdu zgodnie z powszechni stosowanymi testami jezdnyimi EEC, FTP oraz 1015. Ograniczeniem przyjętym podczas realizacji tych testów była maksymalna prędkość pojazdu, ograniczona do 60 km/godz (rys. 7). Zrealizowane testy drogowe różniły się między sobą czasem oraz dystansem symulowanej jazdy pojazdu (tab. 1).

Tab. 1. Zestawienie wyników symulacji jazdy pojazdów
 Tab. 1. Statement of simulation results of vehicle run

Rodzaj testu	FTP	ECE	1015
Czas trwania testu	2477 [s]	1225 [s]	659 [s]
Dystans	17,77 [km]	10,93 [km]	4,2 [km]
Prędkość maksymalna	60 [km/h]	60 [km/h]	60 [km/h]
Prędkość średnia	25,82 [km/h]	32,1 [km/h]	22,9 [km/h]
Maksymalne przyspieszenie	1,48 [m/s ²]	1,06 [m/s ²]	1,19 [m/s ²]
Średnie zużycie paliwa	3,9 [l/100km]	4,2 [l/100km]	3,7 [l/100km]



Rys. 8. Przebieg prędkości jazdy wg testu ECE z ograniczeniem do 60km/godz.

Fig. 8. Instantaneous speed in ECE drive cycle with seed limit up to 60 km/h

Z porównania wyników symulacji jazdy zgodne z wybranymi testami wynika, że największe maksymalne przyspieszenia występują przy teście FTP, a największą średnią prędkość pojazd rozwijał przy jeździe teście ECE, przy którym jednak największe było zużycie paliwa. Średnio zużycie paliwa wynosiło ok. $4\text{ dm}^3/100\text{ km}$ (od $3,7\text{ dm}^3/100\text{ km}$ wg testu japońskiego do $4,2\text{ dm}^3/100\text{ km}$ wg testu ECE).

Przy założeniu jazdy wg testu FTP sprawdzono cichą jazdę pojazdu przy mocy silnika 25 kW uzyskując zasięg jazdy 12,3 km.

7. Wnioski

1. Zastosowanie programu ADVISOR 2004 umożliwiło wykonanie obliczeń symulacyjnych i dobór parametrów podzespołów układu napędowego do małego pojazdu bezzałogowego, tym silnika elektrycznego, silnika spalinowego oraz zespołu akumulatorów. Charakterystyki trakcyjne pojazdu wyznaczono inną metodą.
2. Na podstawie wyników obliczeń symulacyjnych wybrano szeregową koncepcję układu napędowego jednym silnikiem elektrycznym i systemem wałów napędowych do każdego koła pojazdu. System ten upraszczał strukturę zespołu napędowego oraz ułatwiał rozmieszczenie zespołów układu w pojeździe (platformie).
3. Weryfikacja osiągnięć pojazdu w oparciu o charakterystyki trakcyjne i testy jezdne pozwoliły na stwierdzenie, że pojazd osiągał założoną prędkość 60 km/godz po drodze piaszczystej płaskiej jednak prędkość szybko malała przy wzroście pochylenia drogi. Średnie zużycie paliwa przy różnych testach jezdnych wynosiło około $4\text{ dm}^3/100\text{ km}$.
4. Celowe jest wykorzystanie zastosowanej metodyki do dalszej optymalizacji parametrów pojazdu bezzałogowego z uwzględnieniem bardziej zróżnicowanego terenu i różnego stopnia wykorzystania ładowności pojazdu.

Literatura

- [1] Ehsani, M. et al., *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, CRC Press, LLC, 2005.
- [2] *Future Combat System (Brigade Combat Team)*, Marc, 2007.
- [3] Kahveci, A. R., *A view of uninhabited Vehicles or near future military operations*, NATO RTO MP-052, Ankara, 2000.
- [4] Knichel, D. G., *Unmanned Ground Vehicles, Saving Lives and Money*, NATO RTO MP-052, Ankara, 2000.
- [5] Siegwart, R., Nourbakhsh, I.R., *Introduction to autonomous mobile robots*, MIT Press, 2004.
- [6] *Technology development for Army Unmanned Ground Vehicles*, The National Academies, January 2003.
- [7] Walentynowicz, J., *Technologie bezzałogowych platform lądowych w aspekcie prognoz przyszłego pola walki*. Sympozjum nt. „Perspektywy wojskowych bezzałogowych pojazdów lądowych”, WAT Warszawa, 2006.