

Wojciech **KLEIN**
Arkadiusz **MEŻYK**
Tomasz **CZAPLA**

HYBRYDOWY UKŁAD NAPĘDOWY POJAZDU GĄSIENICOWEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję hybrydowego układu napędowego pojazdu gąsienicowego o masie 15-18 ton, który posłuży do opracowania lekkiej uniwersalnej platformy gąsienicowej. Konieczność zapewnienia wysokiej prędkości maksymalnej oraz dużej dynamiki przy ograniczonej masie doprowadziła do wyboru hybrydowego układu napędowego z zastosowaniem silnika o zapłonie samoczynnym oraz silników elektrycznych w układzie równoległym. Omówiono przeprowadzoną analizę koncepcyjną oraz badania modelowe pojazdu dla wybranych trybów działania.

Słowa kluczowe: pojazd gąsienicowy, koncepcja napędu, napęd hybrydowy.

1. WSTĘP

W pierwszych militarnych zastosowaniach pojazdów gąsienicowych, hybrydowych układów napędowych używano przede wszystkim w tych przypadkach, kiedy nie były dostępne przekładnie mechaniczne o wymaganej mocy. Przykładem konstrukcji czołgu z napędem hybrydowym z czasów I wojny światowej może być czołg St. Chamond o masie całkowitej pojazdu 25 ton. Układ napędowy składał się z czterocyndrowego benzynowego silnika Panhard o mocy 80-90 koni mechanicznych współpracującego z 52 kW generatorem, dostarczającym energii elektrycznej dla silników napędzających niezależnie prawą i lewą gąsienicę. Sterowanie było realizowane przez różnicowanie prędkości gąsienic. W czasie II wojny światowej elektryczny układ przeniesienia napędu wykorzystano w dziale samobieżnym Sd. Kfz. 184 Ferdinand. W jego przypadku dwa silniki Maybach HL 120 napędzały generatory służące do dostarczania energii elektrycznej dla dwóch silników napędzających gąsienice. Masa całkowita pojazdu wynosiła 65 ton.

Przez kilka dziesięcioleci po zakończeniu II wojny światowej elektryczne układy przeniesienia napędu nie były stosowane w wojskowych pojazdach gąsienicowych, ze względu na zbyt dużą masę oraz zawodność maszyn elektrycznych.

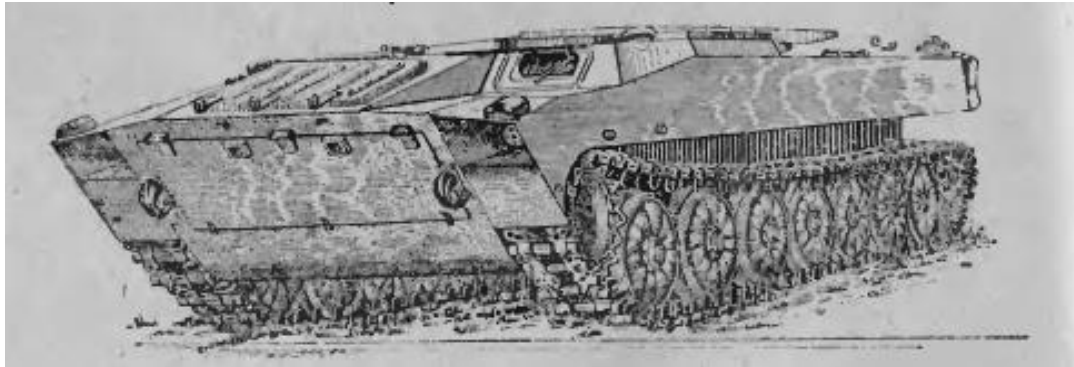
Obecnie, kiedy niezawodne oraz efektywne silniki elektryczne z magnesami trwałymi są dostępne – osiągi pojazdów mogą być poprawione poprzez zastosowanie napędu hybrydowego spalinowo-elektrycznego.

Zalety napędu hybrydowego w porównaniu do mechanicznego to:

- zmniejszenie zużycia paliwa, którego efektem jest zwiększenie zasięgu,
- redukcja emisji hałasu i ciepła,
- większa dowolność konfiguracji geometrycznej układu napędowego (niezależna od redukcji objętości układu napędowego),
- możliwość skrytego działania przez wykorzystanie napędu elektrycznego zasilanego z akumulatorów.

2. POJAZD BAZOWY

Badania modelowe oraz symulacje numeryczne, jak również w późniejszym etapie próby poligonowe, przeprowadzono na pozbawionym uzbrojenia podwoziu pojazdu 2S1 Goździk (rys. 1).



Rys.1. Podwozie bazowe do budowy pojazdu z napędem hybrydowym

Zdecydowano się na pozostawienie silnika głównego jako źródła napędu przy wyższych prędkościach oraz uzupełnienie układu przeniesienia napędu dwoma silnikami elektrycznymi o mocy 125 kW każdy. Źródłem energii dla zamontowanych silników jest agregat prądowłórczy o mocy 110 kW. Masa pojazdu w tej konfiguracji wynosi 15 ton.

3. UKŁAD NAPĘDOWY

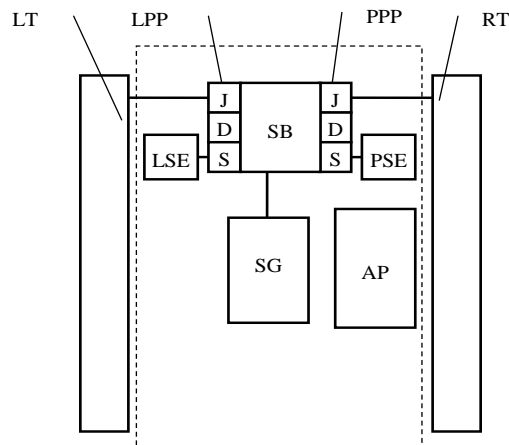
Układ napędowy składa się z silnika spalinowego, połączonego ze skrzynią biegów oraz dwóch silników elektrycznych, podłączonych do planetarnych mechanizmów skrzętu. Mechanizmy skrzętu zbudowane są w formie przekładni planetarnych, w których koło duże połączone jest z silnikiem spalinowym poprzez pięciostopniową skrzynię biegów, a koło słoneczne sprzężone jest z silnikiem elektrycznym. Napęd jest wyprowadzony poprzez jarzmo do przekładni bocznej i koła napędzającego gąsienicę (rys. 2).

Źródłem energii dla silników elektrycznych jest agregat prądowłórczy o mocy 110 kW oraz bateria akumulatorów. W zależności od zapotrzebowania na moc, można korzystać z różnych źródeł energii. W przypadku jazdy z małą prędkością, wykorzystywane są tylko silniki elektryczne zasilane z akumulatorów, agregatu, bądź też z obydwu źródeł. Układ napędowy działa w ten sposób jako hybrydowy szeregowy. W przypadku większych prędkości wykorzystywany jest silnik spalinowy, układ napędowy działa wtedy w trybie równoległym z mocą przepływającą do kół zarówno od silników elektrycznych, jak i silnika spalinowego.

Możliwe tryby pracy układu napędowego:

- jazda z małą prędkością z wykorzystaniem silników elektrycznych (do skrytego poruszania się, czerpiąc energię z akumulatorów, w innym przypadku z wykorzystaniem silnika spalinowego sprzężonego z generatorem),
- jazda z dużą prędkością z wykorzystaniem silnika spalinowego do napędu a maszyny elektrycznej z nim związanej działającej w trybie generatorowym,

- jazda z prędkością maksymalną z wykorzystaniem silnika spalinowego oraz maszyny elektrycznej z nim związanej działającej w trybie silnikowym (czerpiącej energię z akumulatorów),
- hamowanie lub zjazd ze wzniesienia z odzyskiem energii (magazynowanej w akumulatorach),
- postój z silnikiem głównym pracującym w zespole z generatorem jako agregat prądowłórczy.



Rys.2. Konfiguracja hybrydowego układu napędowego

LG – lewa gąsienica, PG – prawa gąsienica, LPP – lewa przekładnia planetarna, PPP – prawa przekładnia planetarna, LSE – lewy silnik elektryczny, PSE – prawy silnik elektryczny, SB – skrzynia biegów, SG – silnik główny, AP – agregat prądowłórczy

4. MODEL DYNAMICZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO

Model dynamiczny pojazdu został zaimplementowany w środowisku MATLAB SUMULINK. Zapis matematyczny modelu opiera się na wzorach analitycznych, gdzie współczynnik oporów skrętu oraz oporów toczenia zostały zidentyfikowane za pomocą badań eksperymentalnych. W celu wyznaczenia parametrów kinematycznych należy w każdym kroku całkowania obliczyć siły P_1 oraz P_2 działające na gąsienice pojazdu podczas ruchu obrotowego pojazdu oraz siły P_3 oraz P_4 działające podczas ruchu postępowego.

$$P_1 = \left(f \frac{G}{2} + \frac{\mu_s GL}{4B} \right) \cos \alpha - \frac{G \sin \alpha}{2} \quad (1)$$

$$P_2 = \left(-f \frac{G}{2} + \frac{\mu_s GL}{4B} \right) \cos \alpha + \frac{G \sin \alpha}{2} \quad (2)$$

$$P_3 = P_4 = \frac{1}{2} f G \cos \alpha \quad (3)$$

$$\mu_s = \frac{\mu_{s \max}}{0,92 + 0,15 \frac{R}{B}} \quad (4)$$

gdzie:

f – współczynnik oporów toczenia

$\mu_{s \max}$ – współczynnik oporów skrętu,

G – ciężar pojazdu,

B – rozstaw gąsienic ,

L – długość roboczej powierzchni gąsienicy,

α – kąt nachylenia wzniesienia

Tablica 1. Maksymalne wartości współczynnika oporów skrętu $\mu_{s \max}$

Rodzaj gruntu	Wartości średnie współczynnika oporów skrętu $\mu_{s \max}$
Suchy, trawiasty grunt gliniasty	0,8-1,0
Sucha droga gruntowa	0,7-0,9
Ściernisko na gruncie gliniastym	0,6-0,8
Wilgotny grunt gliniasty	0,3-0,4
Śnieg	0,25-0,7

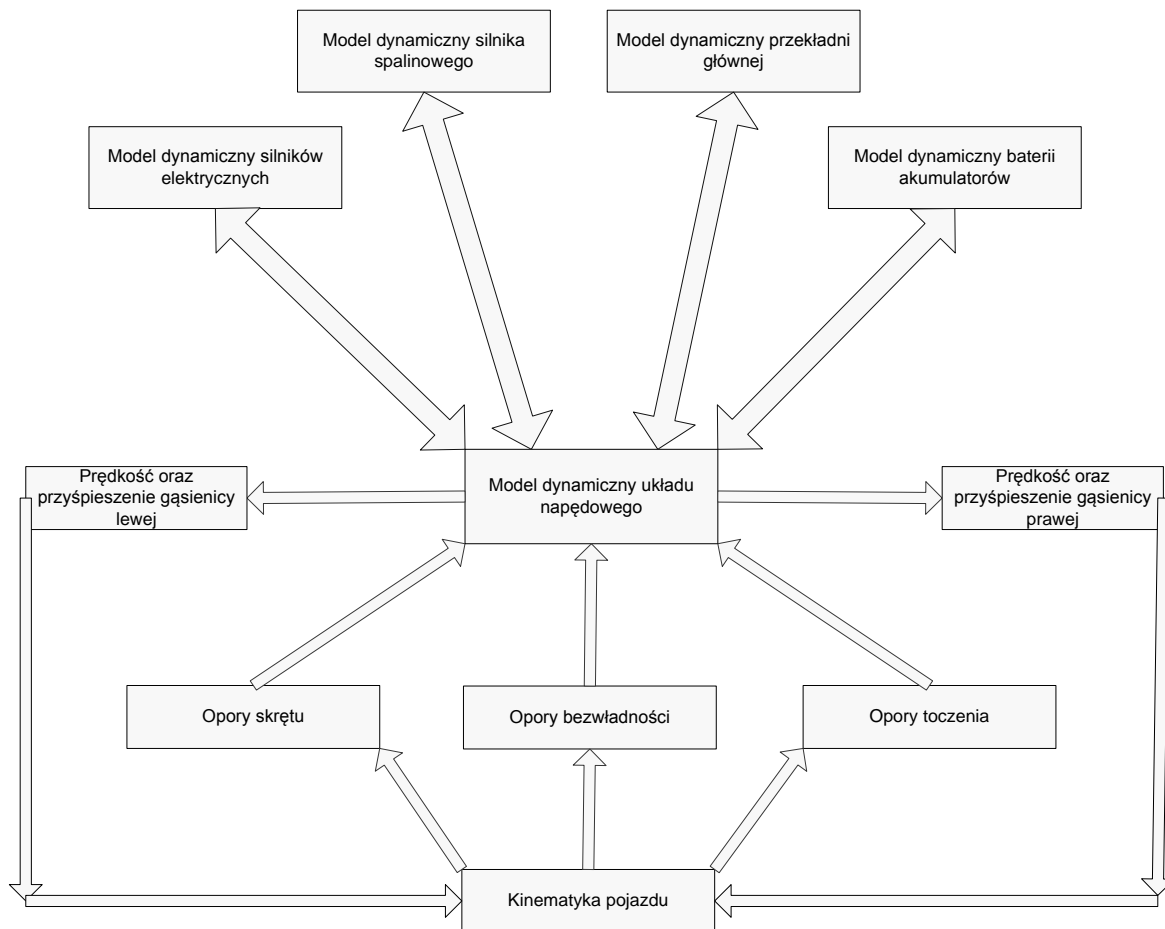
Tablica 2. Współczynniki oporów toczenia f dla pojazdów gąsienicowych

Rodzaj podłoża	Wartości średnie współczynnika oporów toczenia f
Asfalt, droga brukowa	0,03-0,06
Ściernisko	0,07-0,08
Łąka	0,08-0,12
Piasek	0,1-0,2

W omawianym modelu przyjęto następujące założenia:

- idealny kontakt pomiędzy gąsienicą a gruntem (brak poślizgu gąsienicy),
- opis parametrów silnika spalinowego oraz silników elektrycznych został zbudowany na podstawie danych doświadczalnych,
- pominięto straty energii w dodatkowych elementach elektrycznych (przekształtniki, akumulatory),
- pominięto wpływ zużycia baterii akumulatorów.

Podstawowy przepływ danych w modelu został zilustrowany na rys. 3. W modelu tym rozgraniczono siły generowane przez opory toczenia i skrętu pojazdu gąsienicowego oraz uwzględniono siły bezwładności wywołane przyspieszeniami liniowymi oraz kątowymi. Zintegrowanie, w modelu dynamicznym układu napędowego pojazdu gąsienicowego, modeli silników spalinowych, elektrycznych, akumulatorów oraz przekładni głównej pozwoliło na wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych hybrydowego pojazdu gąsienicowego.



Rys.3. Podwozie bazowe do budowy pojazdu z napędem hybrydowym

5. WYNIKI BADAŃ MODELOWYCH

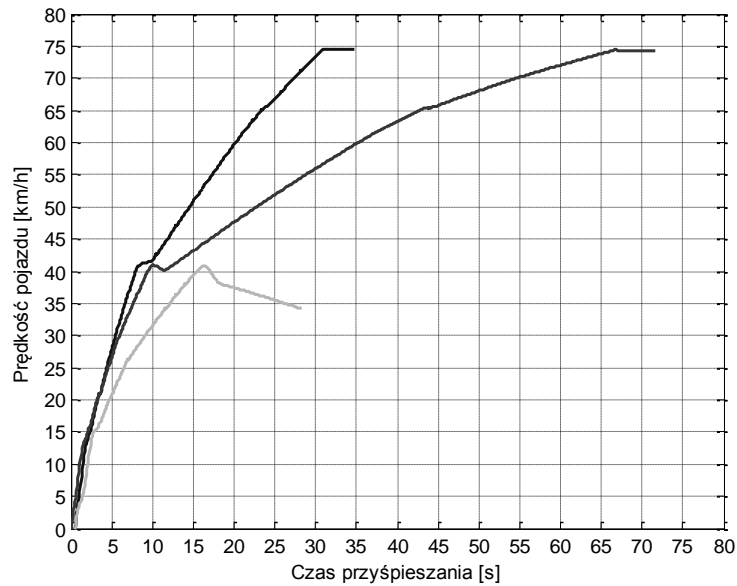
W celu zbadania charakterystyk trakcyjnych pojazdu przy zastosowaniu wyżej wymienionego modelu wymuszono następujące cykle jazdy:

- cykl jazdy „na wprost” z zastosowaniem silnika spalinowego oraz silników elektrycznych,
- cykl jazdy „po łukach” w trybie szeregowym (tylko silniki elektryczne).

5.1. Cykl jazdy „na wprost”

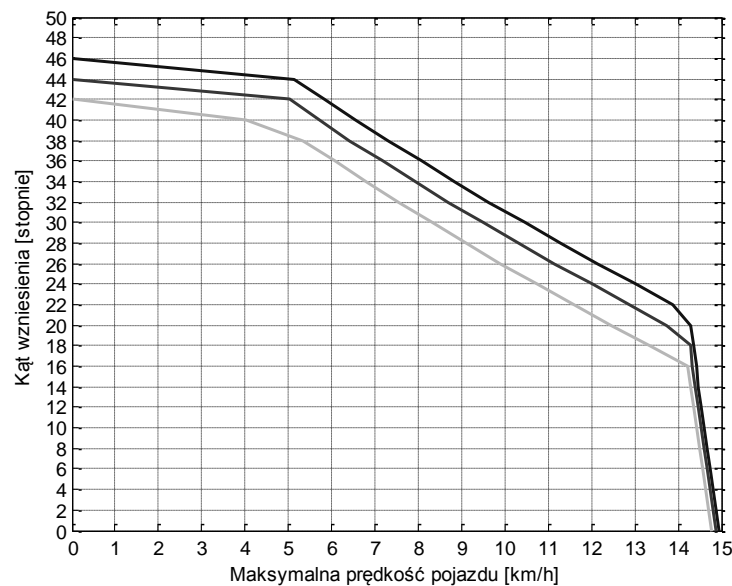
Cykl ten został wprowadzony w celu zbadania maksymalnych prędkości pojazdu oraz przyspieszeń, a także zdolności pokonywania wzniesień przy różnych warunkach terenowych. Charakterystykę przyspieszenia pokazano na rys. 4. Przebieg przyspieszenia wyznaczono dla mocy chwilowej silników elektrycznych. Silniki mogą pracować pod pełnym obciążeniem przez 90 sekund. Pojazd osiągnie prędkość maksymalną dla każdego z rodzajów nawierzchni

w czasie niższym od ograniczonego możliwościami silników. Przebiegi zdolności pokonywania wzniesień dla różnych prędkości przedstawiono na rys. 5.



Rys.4. Charakterystyka przyspieszenia dla mocy chwilowej silników elektrycznych

(współczynnik oporów toczenia $f=0,01$ – kolor niebieski, $f=0,05$ – kolor czerwony, $f=0,1$ – kolor zielony)

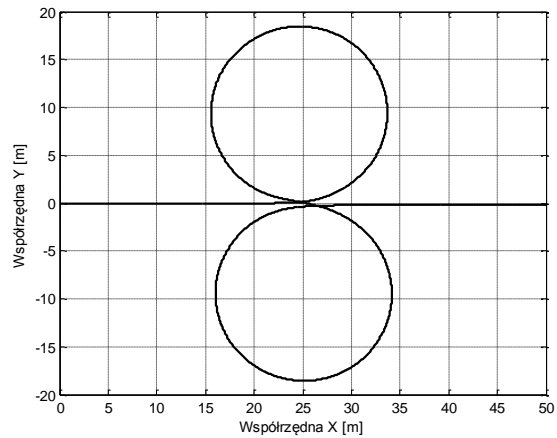


Rys.5. Charakterystyka pokonywania wzniesień dla mocy chwilowej silników elektrycznych

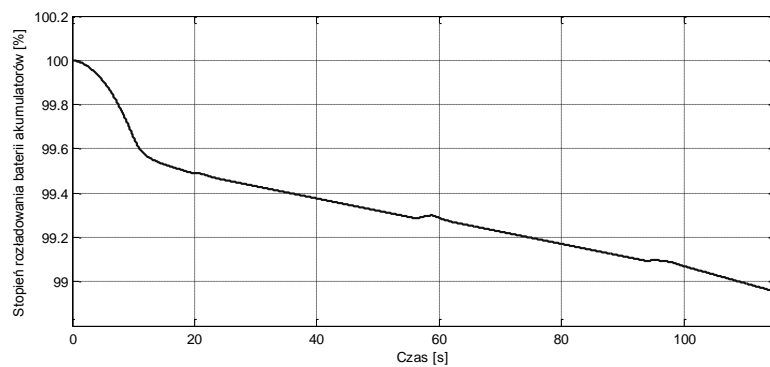
(współczynnik oporów toczenia $f=0,01$ – kolor niebieski, $f=0,05$ – kolor czerwony, $f=0,1$ – kolor zielony)

5.2. Cykl jazdy „po łukach”

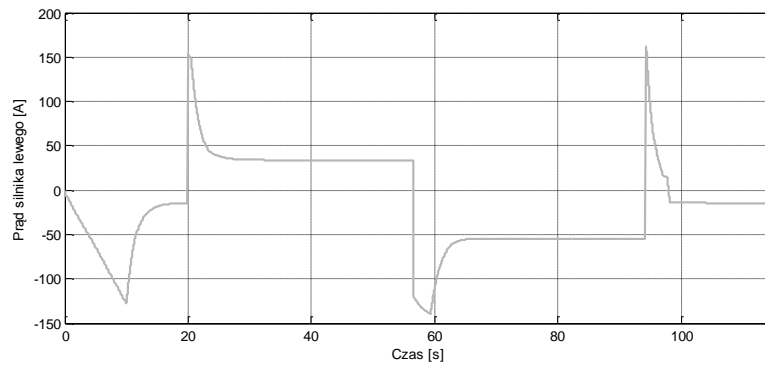
Cykl ten został wprowadzony w celu zbadania zdolności rekuperacji energii elektrycznej podczas wykonywania zakrętów oraz określania zdolności manewrowej pojazdu. Droga przebyta przez pojazd została pokazana na rys. 6.



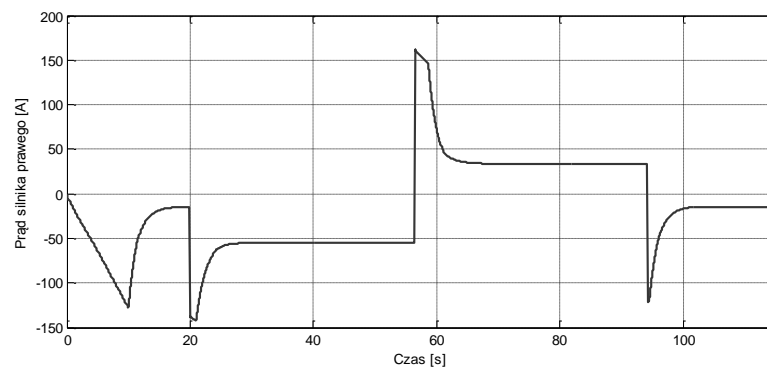
Rys.6. Droga przebyta przez pojazd – cykl jazdy „po łukach”



Rys.7. Stopień rozładowania akumulatorów – cykl jazdy „po łukach”



Rys.8. Prąd silnika lewego – cykl jazdy „po łukach”



Rys.9. Prąd silnika prawego – cykl jazdy „po łukach”

Na rys. 7. przedstawiono stopień naładowania akumulatorów. W punktach zmiany kierunku ruchu pojazdu występuje zmniejszenie zużycia energii spowodowane jej odzyskiem przez silnik napędzający gaśnicę, znajdującą się po wewnętrznej stronie zakrętu (rys 8 i 9).

Najważniejsze parametry dynamiczne pojazdu otrzymane na drodze symulacji numerycznych:

- maksymalna prędkość pojazdu w trybie szeregowym wynosi 14,8 [km/h];
- maksymalna prędkość pojazdu w trybie równoległym wynosi 74,4 [km/h];
- przy poruszaniu się z maksymalną prędkością (14,8 [km/h]) w trybie szeregowym teoretyczny zasięg na baterii akumulatorów wynosi 5319 [m].

6. WNIOSKI

Napęd hybrydowy wydaje się być właściwą drogą do zwiększenia prędkości, manewrowości oraz zasięgu gaśnicowych wozów bojowych.

Wykorzystanie akumulatorów pozwala na uzyskanie możliwości skrytego poruszania się z niską emisją ciepła przy zerowej emisji spalin.

Hybrydowy układ napędowy może być zastosowany jako część programu modernizacyjnego pojazdów gaśnicowych, bez znacznej ingerencji w ich strukturę mechaniczną.

7. LITERATURA

- [1] Detchessahar M., Lemarchand Y.: Des Hommes et des Projets dans l'Urgence — La naissance du char d'assaut français, Annales des Mines p 47; quoting Note résumant la question du matériel d'artillerie d'assaut, G.Q.G., 28 November 1916. SHAT, 16 N.
- [2] Walentynowicz J.: Future of hybrid propulsion system for combat vehicles. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2006, Vol. 13, No. 3, s.399-420.
- [3] Burdziński Z.: Teoria ruchu pojazdu gaśnicowego, WKiŁ Warszawa 1988.
- [4] Wong J. Y.: Theory of Ground Vehicles, John Wiley and Sons New Jersey 2008.
- [5] Сергеев Л. В.: Теория танка, Moskwa 1973.

HYBRID TRANSMISSION FOR TRACKED VEHICLE

Abstract: The paper presents hybrid drive study for tracked vehicle designed as lightweight multipurpose platform of maximum mass 15-18 tones. High top speed and dynamics requirements related with mass reduction need led authors to choose parallel hybrid drive with Diesel engine and electric motors. Concept analysis was done and model simulation were performed for chosen operation modes.

Key words: tracked vehicle, drive concept, hybrid drive.

W artykule wykorzystano wyniki pracy finansowanej przez KBN w ramach projektu Nr 0048/R/T00/2008/05.