

FUTURE OF HYBRID PROPULSION SYSTEM FOR COMBAT VEHICLES

Jerzy Walentynowicz

*Military University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel./fax: +48 22 6839565
e-mail: jwalentynowicz@wme.wat.edu.pl*

Abstract

Problems of propulsion systems development for future combat vehicles were presented in this paper. This development works are realised accord the program „All Electric Combat Vehicle”. Properties of hybrid propulsion systems with military requirements were described. Nationals programs of research on hybrid propulsion were characterised. Investigation a few prototypes of armoured vehicles 4x4 and 8x8 and lightweight tracked platforms are realised in USA. Germans factories presented many system for hybrid vehicles. They are electro-mechanical system, electrical motors, energy storages systems and few prototypes tracked and wheeled vehicles. Prototype of transport vehicle 6x6 and cross terrain vehicle 4x4 was worked out in Great Britain and simulation investigations of tracked vehicle were realised. Armoured hybrid vehicle was designed in France and simulation investigations on lightweight tracked vehicle were ran. Prototypes modular and compatible tracked and wheeled vehicles were worked out in Sweden, but propulsion system for wheeled vehicle was designed in international cooperation. South Africans' program cancers fighting vehicles 8x8 and prototype of this vehicle is investigated

Keywords: *transport, combat vehicles, hybrid propulsion systems, tracked vehicles, wheeled vehicles*

PRZYSZŁOŚĆ NAPĘDÓW HYBRYDOWYCH WÓZÓW BOJOWYCH

Streszczenie

W referacie przedstawiono problemy rozwoju napędów hybrydowych w wozach bojowych przyszłości. Prace te są realizowane w ramach kierunku „W pełni elektryczny wóz bojowy”. Opisano właściwości napędów hybrydowych z uwzględnieniem wymagań wojskowych. Scharakteryzowano narodowe programy prac nad napędami hybrydowymi. Badania kilku prototypów opancerzonych pojazdów kołowych 4x4 oraz 8x8 oraz lekkich platform gąsienicowych są realizowane w USA. Niemieckie wytwórnie przedstawiły wiele systemów hybrydowych. Są to układy elektro-mechaniczne, silniki elektryczne i systemy sterowania i kilka prototypów pojazdów kołowych i gąsienicowych. W Wielkiej Brytanii opracowano prototyp pojazdu transportowego 6x6 i terenowego 4x4 oraz prowadzone są badania symulacyjne pojazdów gąsienicowych. Pojazd opancerzony 6x6 opracowano we Francji oraz prowadzone są prace nad lekkim pojazdem gąsienicowym. Prototypy modułowych, kompatybilnych pojazdów kołowych i gąsienicowych opracowano w Szwecji, przy czym napęd do pojazdu kołowego powstał w ramach współpracy międzynarodowej. Program południowoafrykański dotyczy wozu bojowego z napędem 8x8, a prototyp jest badany.

Słowa kluczowe: *wozy bojowe, hybrydowe układy napędowe*

1. Wstęp

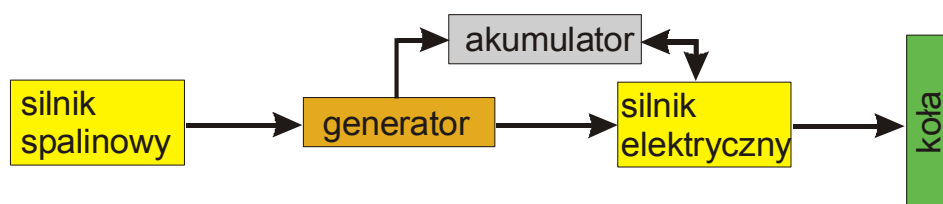
Napędy hybrydowe pojazdów wojskowych są częścią kierunku rozwoju sprzętu wojskowego znanego jako „AECV All Electric Combat Vehicle” („W pełni elektryczny pojazd bojowy), który obejmuje także programy zastosowania energii elektrycznej do bardziej efektywnego uzbrojenia oraz wzmocnienia ochrony wozu przed działaniem przeciwnika [1, 2].

Pojazd z napędem hybrydowym to taki pojazd, w którym energia niezbędna do jego napędu jest czerpana z dwóch lub więcej rodzajów źródeł, zasobników (akumulatorów) energii lub

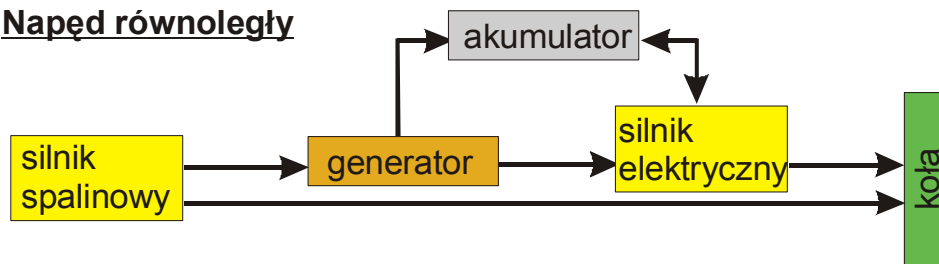
przetwornic zamontowanych w pojeździe [3]. Rozróżnia się układ szeregowy, w którym pojazd napędzany jest cały czas z jednego źródła energii, a zadaniem drugiego źródła jest uzupełnianie energii ze źródła pierwszego (rys. 1a), oraz układ równoległy, w którym dwa źródła mogą jednocześnie lub niezależnie napędzać pojazd (rys. 1b). Mogą być także stosowane układy mieszane: szeregowo – równoległe.

Możliwość akumulacji energii podczas jazdy pojazdu to najważniejsza zaleta napędu hybrydowego. Pozwala ona na wykorzystywanie pełnego strumienia energii podczas ruszania i przyspieszania pojazdu oraz odzyskiwanie energii traconej podczas hamowania. Jeżeli podstawowym źródłem napędu jest silnik spalinowy, to jego praca w mniejszym zakresie prędkości i momentu obrotowego ułatwia dopasowanie parametrów silnika do tych warunków pracy. Napęd hybrydowy umożliwia zastosowanie także innych, pokładowych źródeł energii, w tym ogniw paliwowych.

Napęd szeregowy



Napęd równoległy



Rys. 1. Napędy pojazdów hybrydowych, szeregowy i równoległy
Fig. 1. Propulsion systems for hybrid vehicles, series and parallel

Efekty zastosowania napędów hybrydowych w pojazdach wojskowych są uzasadnione ich istotnymi zaletami:

- korzystnymi charakterystykami momentu obrotowego silników elektrycznych,
- znacznie zmniejszonym zużyciem paliwa (nawet do 30...40%),
- podwójnym źródłem napędu (silnik elektryczny i akumulatory lub silnik spalinowy),
- mniejszą emisją hałasu, toksycznych składników spalin i mniejszym śladem cieplnym,
- możliwością elastycznego rozmieszczania zespołów układu napędowego w pojeździe,
- możliwością zasilania broni elektromagnetycznej oraz innych rodzajów uzbrojenia i sprzętu energią elektryczną wytworzoną przez generator i zakumulowaną na pokładzie pojazdu.

Jednym z najważniejszych problemów, ograniczających rozwój napędu hybrydowego są efektywne i pojemne urządzenia do akumulacji energii, która może być magazynowana w akumulatorach:

- elektrochemicznych i elektrycznych (kondensatorach),
- mechanicznych (koła zamachowe),
- hydraulicznych (gazowych).

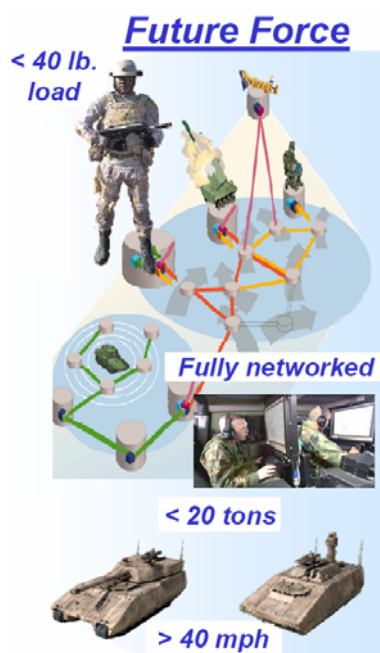
Dysponując jednocześnie kilkoma źródłami o dużej mocy można zasiląć wiele pokładowych urządzeń elektrycznych i elektronicznych wykorzystujące zarówno stały strumień energii jak również energię impulsową o dużej mocy chwilowej.

Celem prezentowanej pracy jest przeanalizowanie aktualnego stanu techniki w zakresie opracowanych układów napędowych wozów bojowych oraz przedstawienie prac prowadzonych przez różne państwa.

2. Programy napędów hybrydowych pojazdów wojskowych

2.1. Pojazdy Stanów Zjednoczonych

W USA prace nad wozami bojowymi ukierunkowane są na uzyskanie systemu pola walki (tzw. Future Combat System), zwartego, lekkiego, o dużej mobilności i precyzyjnego w działaniu, a także o pełnej komunikacji wewnętrznej nowoczesnego systemu walki (rys. 10). System ten wymaga bardzo wydajnych źródeł energii, która może być wykorzystana do napędów pojazdów, ich ochrony przed działaniem przeciwnika oraz do zasilania broni pokładowej o dużej sile rażenia.



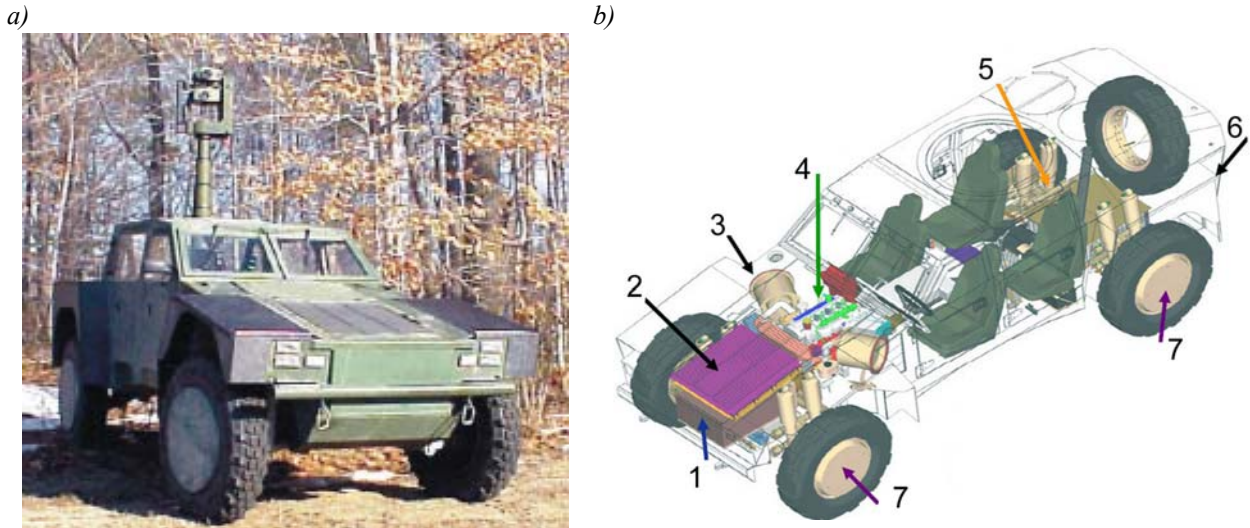
Rys. 2. Siły zbrojne przyszłości
Fig. 2. Future combat system

Jednocześnie z wozami bojowymi konieczne będzie wprowadzanie nowych typów pojazdów transportowych, które obecnie są już pojazdami przestarzałymi o kilkunastoletnim okresie użytkowania. Nowe pojazdy powinny charakteryzować się przede wszystkim małym zużyciem paliwa, małą masą i zmniejszeniem czynności obsługowych.

Przeanalizowano i wybrano szereg technologii związanych z tymi problemami oraz zaczęto prace nad ich rozwojem aby w perspektywie 10-15 lat można było stosować je w seryjnych pojazdach [5].

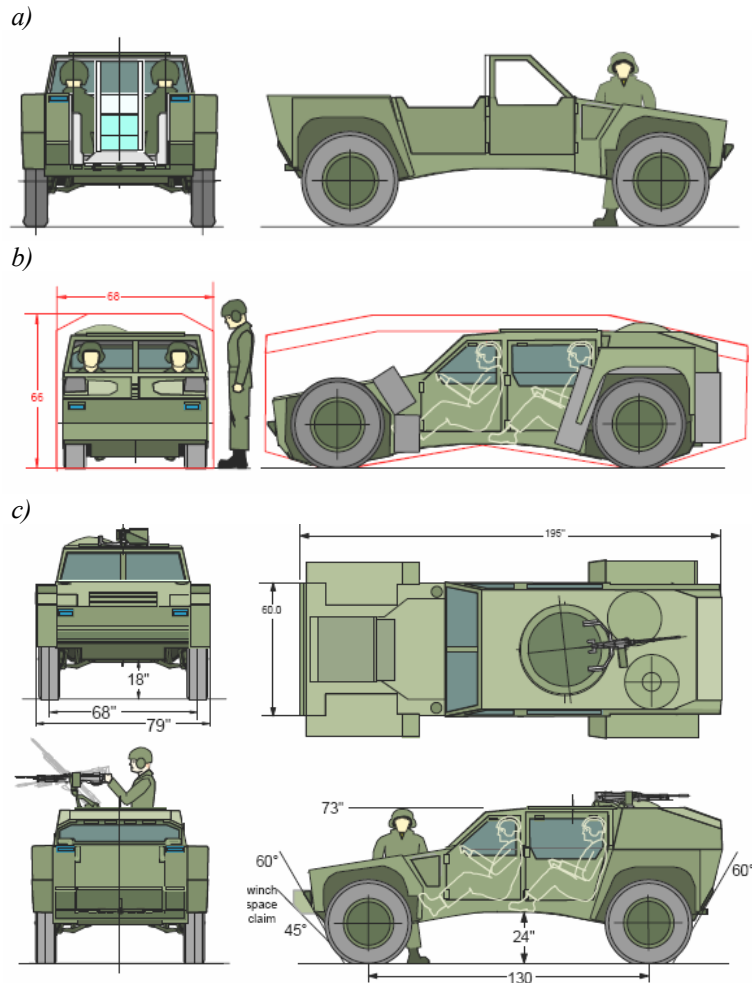
Do lekkich pojazdów wielozadaniowych można zaliczyć pojazd RST-V, opracowany początkowo jako wóz rozpoznawczy który mógłby działać kilka dni za linią frontu dzięki napędowi hybrydowemu. Jest to pojazd czterokołowy z napędem na wszystkie koła za pomocą silników elektrycznych z magnesami stałymi umieszczonymi w kołach pojazdu, opracowany przez niemiecką firmę Magnet Motor GmbH (rys. 3).

W ostatnio prezentowanej wersji pojazd ma 2,8 litrowy silnik z bezpośrednim wtryskiem paliwa o mocy 120kW, który napędza generator z magnesami trwałymi o mocy 110kW, wytwarzający prąd o wysokim napięciu w układzie napędowym - 240V...750V i niskim napięciu 28V w instalacji elektrycznej pojazdu.



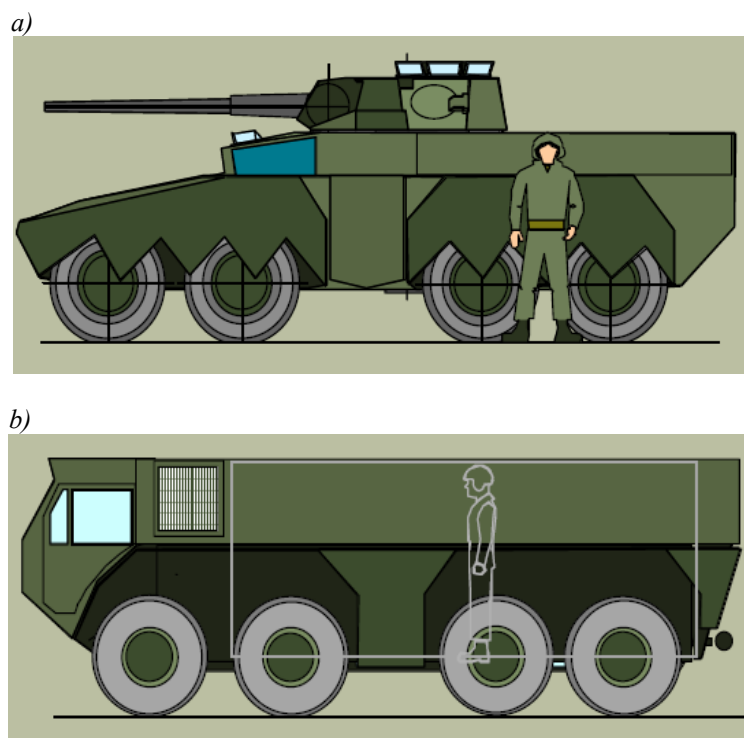
Rys. 3. Pojazd RST-V: a – widok pojazdu, b – podstawowe zespoły: 1 – układ sterowania, 2 – wymiennik ciepła, 3 – wentylator, 4 – silnik spalinowy, 5 – akumulatory, 6 – zbiornik paliwa, 7 – koła z silnikami elektrycznymi.

Fig. 3. Vehicle RST-V: a – recognise version, b – main vehicle sets: 1 – control system, 2 – heat exchanger, 3 – fan, 4 – combustion engine, 5 – batteries, 6 – fuel tank, 7 – wheels with electric motors.



Rys. 4. Wersje samochodu RST-V; a – podstawowa, b – wersja wąska (jeep), c – pojazd patrolowy.

Fig. 4. Versions of the vehicle RST-V: a – basic, b – narrow version (jeep), c – patrol version.



Rys. 5. Pojazd AHED: a – pojazd bojowy, b – pojazd transportowy.
 Fig. 5. Vehicle AHED: a – combat vehicle, b – track.

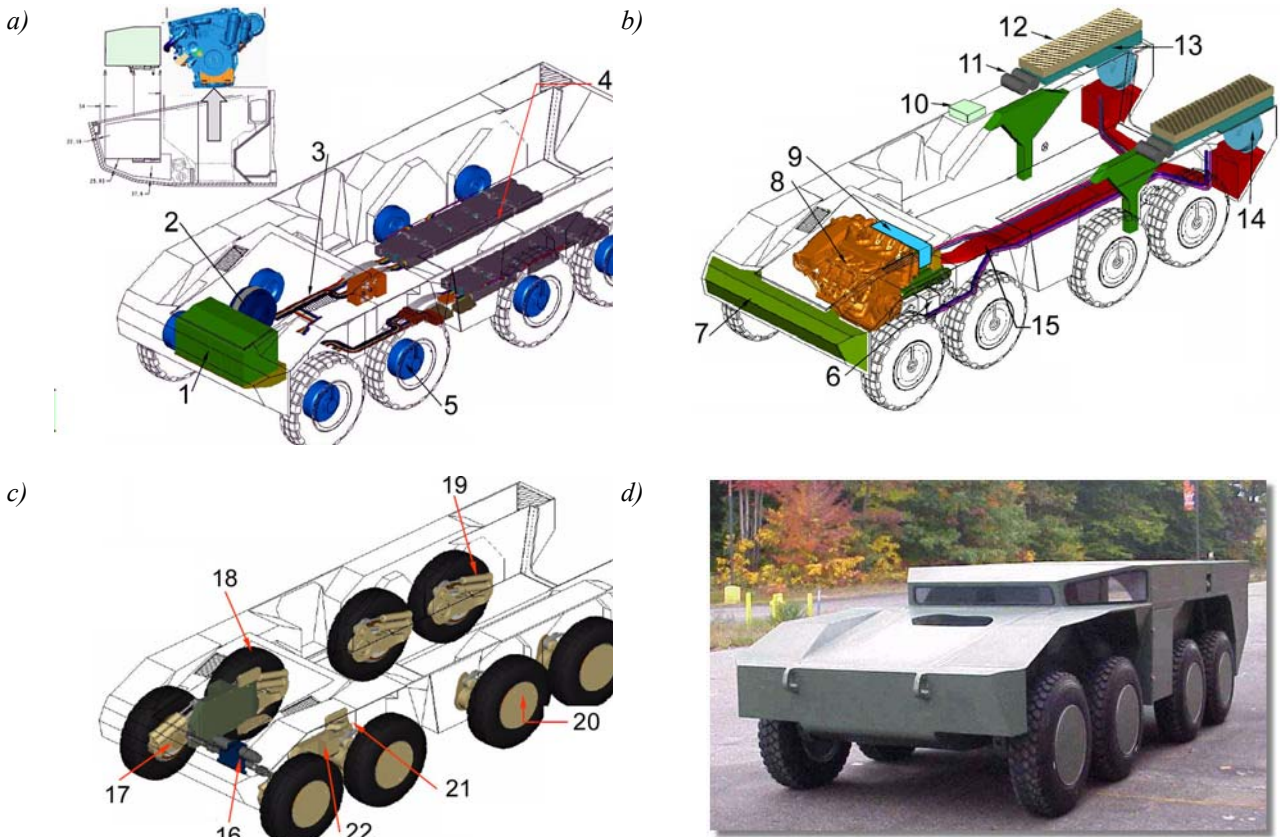
Prąd o mniejszym napięciu zasila m.in. oświetlenie pojazdu oraz układy nawigacji, rozpoznania i łączności. Energia elektryczna jest gromadzona w bateriach. Napęd kół stanowią cztery silniki z magnesami trwałymi M-57 oraz reduktorami o przełożeniu 5:1. Pojazd jako demonstrator technologii jest intensywnie badany na poligonach. Opracowano także jego inne wersje, w tym jako pojazd dyspozycyjny, patrolowy i transportowy (rys. 4). Nie jest wykluczone, że będzie on rozpatrywany jako następca popularnego obecnie pojazdu HMMWV.

Pojazd AHED 8x8 jest większym, wielozadaniowym pojazdem z napędem na wszystkie koła. Nadwozie bazowe zostało opracowane w dwóch wersjach: platformy do transportu uzbrojenia i piechoty (obniżony kadłub, siedzenie kierowcy umieszczone za silnikiem, układ chłodzenia w komorze silnikowej (rys. 5a) oraz transportera siedzenie kierowcy z przodu pojazdu przed silnikiem, układ chłodzenia za kabiną kierowcy, podwyższone nadwozie o dużej przestrzeni ładunkowej (rys. 5b) [7].

Jest to pojazd w dużym stopniu technologicznie kompatybilny z pojazdem RST-V. Zastosowano w nim silnik MTU o mocy 400kW z generatorem prądu 360kW. Przekształtniki prądu umieszczono z przodu pojazdu (rys. 6a). Silniki elektryczne MM o mocy 110kW każdy z magnesami trwałymi umieszczono w każdym kole pojazdu, a pod jego podłogą znajdują się akumulatory Li-Ion.

Spaliny z silnika przepływają do układu rozpraszania ciepła w tylnej części pojazdu i wypływają na zewnątrz. Jednocześnie z tyłu pojazdu znajdują się wymienniki ciepła cieczy chłodzącej silnik spalinowy i zespoły elektroniczne (rys. 6b). Uzyskano w ten sposób maksymalne zmniejszenie śladu cieplnego pojazdu.

Koła są resorowane za pomocą wysokociśnieniowych układów pneumatycznych (rys.6c). Zmiana kierunku jazdy odbywa się za pomocą skretu kół przednich, przy czym po dwa koła przednie każdej strony są mocowane do jednego wahacza i obracane wspólnie na jednej zwrotnicy. Ogranicza to niewątpliwie promień skretu, ale wzmacnia jednocześnie podwozie z dużo większą masą nieresorowaną. Pojazdy te są badane w różnych warunkach terenowych i klimatycznych (rys. 6d).

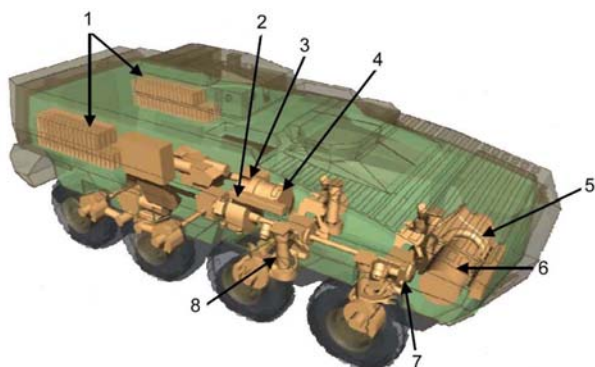


Rys. 6. Pojazd AHED 8x8: a – system napędowy, b – urządzenia zasilania silnika, c – podwozie, d – pojazd badawczy, 1 – sterowniki silników, 2 – generator, 3 – przewody elektryczne, 4 – akumulatory, 5 – silniki elektryczne, 6 – przewody chłodzenia silników w kołach, 7 – zbiornik paliwa, 8 – silnik spalinowy, 9 – filtr powietrza, 10 – przekształtnik niskiego napięcia, 11 – pompy układu chłodzenia, 12 – żaluzje, 13 – chłodnica, 14 – wentylator, 15 – kanał wylotu spalin, 16 – nastawnik kół, 17 – osłona, 18 – koło, 19 – wysokociśnieniowe zawieszenie pneumatyczne, 20 – silnik elektryczny z reduktorem i hamulcem, 21 – oś zwrotnicy, 22 – belka zwrotnicy.

Fig. 6. Vehicle AHED8x8: a – propulsion system, b – propulsion auxiliaries, c – suspension, d – investigation vehicle, 1 – plug-in motor controller, 2 – generator, 3 – power distribution, 4 – batteries, 5 – in-hub electric motor, 6 – coolant lines, 7 – fuel, 8 – diesel engine, 9 – air filtration, 10 – low voltage converter, 11 – coolant pumps, 12 – grille, 13 – cooler, 14 – cooling fan, 15 – sub-flour engine exhaust, 16 – steer actuator, 17 – leading arm, 18 – tire, 19 – high pressure air suspension, 20 – motor, gear reduction and brakes, 21 – steering beam pivot, 22 – steering beam.

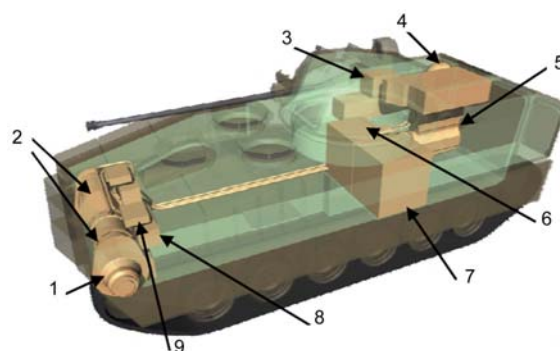
Inną koncepcję napędu hybrydowego do pojazdów wojskowych zastosowano w pojazdach: kołowym Pegasus i gaśnicowym Lancer, prezentowanych przez United Defence [7]. Są to lekkie pojazdy, które mogą być transportowane za pomocą samolotów C130, o dużej zgodności wzajemnej wielu układów w systemach sterowania, jednak zdecydowanie różniące się rozwiązaniami całych pojazdów. Wykonane są z materiałów tytanowych, wysokoodpornego aluminium, kompozytów polimerowych, mają ceramiczne pancerze co zwiększa ich odporność na polu bitwy, a jednocześnie obniża masę.

W pojeździe Pegasus zastosowano jeden elektryczny silnik napędowy z klasycznym przeniesieniem napędu za pomocą wałów i mechanizmów różnicowych. Po raz pierwszy zastosowano w tego typu pojeździe silnik turbinowy o mocy 300kW pracujący z prędkością 48000obr/min, który napędza generator prądu przemiennego o mocy 300kW i prędkości 12000obr/min (rys. 7). Centralnie umieszczony w pojeździe silnik elektryczny jest chłodzony olejem. Pojazd ma półaktywne zawieszenie i osiąga prędkość 110km/h po równej drodze i 70km/h w terenie. Zasilany z baterii może przejechać 11km z prędkością 32km/h w jeździe cichej (zasilanie z akumulatorów), a rozpędzanie do prędkości 48km/h trwa 8,6 sekundy.



Rys. 7. Pojazd Pegasus: 1 – akumulatory, 2 – przekształtnik silnika elektrycznego, 3 – dwustopniowa przekładnia, 4 – elektryczny silnik trakcyjny, 5 – silnik turbinowy, 6 – generator, 7 – mechanizm różnicowy

Fig 7. Wheeled vehicle Pegasus: 1 – batteries, 2 – traction motor inverter, 3 – 2-speed gearbox, 4 – traction drive motor, 5 – turbine engine, 6 – generator, 7 - differential



Rys. 8. Pojazd gąsienicowy Lancer: 1 – przekładnia boczna z hamulcami, 2 – silniki elektryczne, 3 – akumulatory, 4 – wentylator, 5 – generator, 6 – konwertor mocy, 7 – zbiornik paliwa, 8 – przekształtnik mocy, 9 – kontroler

Fig. 8. Tracked vehicle Lancer: 1 – final drive with integral backup brake, 2 – traction motors, 3 – batteries, 4 – cooling fan, 5 – generator, 6 - converter, 7 – fuel tank, 8 – traction motor inverter, 9 – motor controller

a)



b)



Rys. 9. Koła gąsienicy stalowej (a) i gumowej (b)
Fig. 9. Link Track Sprocket (a) and Band Track Sprocket (b)

Pojazd gąsienicowy Lancer jest napędzany silnikiem o zapłonie samoczynnym i mocy 300kW z generatorem prądu przemiennego o mocy 300kW przy prędkości 2800obr/min (rys. 8). Dwa silniki elektryczne, napędzające gąsienice są chodzone olejem. Możliwa jest jazda z prędkością 89km/h po drodze równej i 64km/h w terenie. Pojazd rozpędza się do prędkości 48km/h w czasie 8,3 sekundy oraz może przejechać 3,6km z prędkością 32km/h przy zasilaniu z baterii Li-Jon.

Pojazd został wyposażony w hydropneumatyczne zawieszenie i gumowe gąsienice, co zdecydowanie zmniejszyło hałas podczas jazdy (rys. 15).

2.2. Pojazdy Niemiec

Firmy niemieckie uczestniczą w wielu programach rozwojowych napędów elektrycznych i hybrydowych w zastosowaniach cywilnych oraz wojskowych. Technologie dotyczące tych napędów pochodzą głównie z firmy L-3 Motor Magnet GmbH, która jest jednym z największych

producentów silników i generatorów z magnesami trwałymi, a także ich układów sterowania i magazynowania energii [8]. Są one stosowane zarówno w pojazdach kołowych i gąsienicowych.

Silniki elektryczne umieszczone w kołach tworzą zespół składający się z silnika, reduktora oraz hamulców. Sam silnik może być hamulcem, jednak gdy trzeba większej siły hamowania, wtedy włączany jest hamulec cierny. Takie rozwiązanie ma zalety, a przede wszystkim:

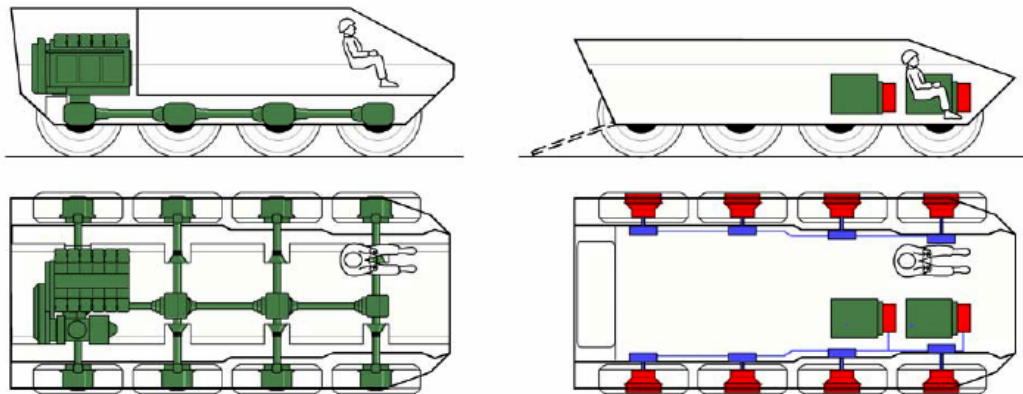
- obniżenie płyty dolnej pojazdu i zwiększenie przestrzeni użytkowej pojazdu,
- zmniejszenie masy całkowitej,
- łatwiejszy dostęp do przestrzeni ładunkowej;
- zwiększony zakres ruchu kół podczas jazdy terenowej, nie ograniczony długością wałów napędowych (obecnie do 100 cm).

Wadą natomiast jest konieczność doprowadzenia cieczy chłodzącej do silnika i zwiększenie masy nieresorowanej pojazdu o ok. 40...50%.

a)



b)



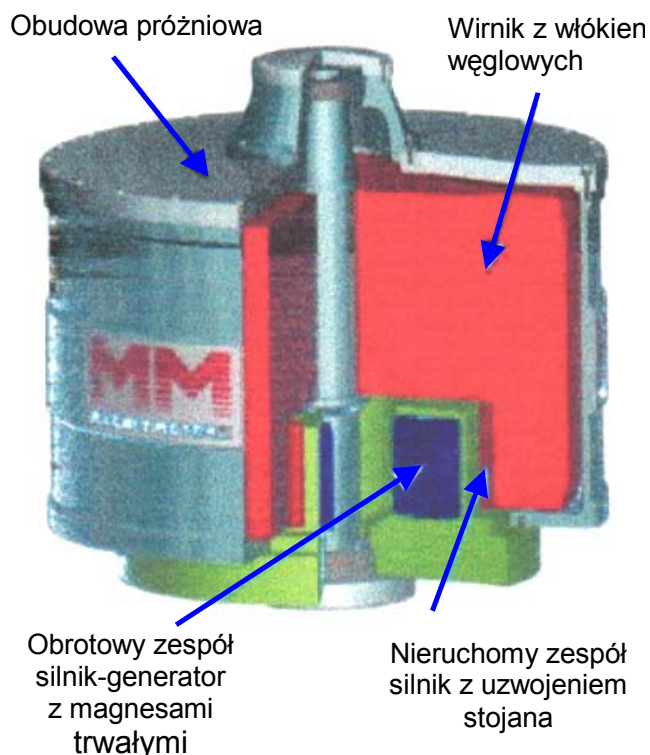
Rys. 10. Pojazdy 8x8: a – demonstrator technologii z 600kW układem spalinowo – elektrycznym firmy MM,

b – porównanie 8x8 elektrycznego układu napędowego z konwencjonalnym napędem mechanicznym

Rys. 10. Vehicles 8x8: a – demonstrator 8x8 vehicle with 600kW Diesel electric propulsion system from MM,

b – Comparison of 8x8 electric propulsion system with a conventional mechanical drive

Napęd elektryczny opracowano do niemieckiego pojazdu kołowego 8x8 klasy 32t, z silnikami umieszczonymi w kołach (rys. 10a). Pojazd napędzany silnikiem o zapłonie samoczynnym o mocy 600kW osiągnął prędkość 100km/h. Umieszczenie silników napędzanych w kołach spowodowało znaczne obniżenie wysokości pojazdu oraz zwiększenie przestrzeni ładunkowej w porównaniu z klasycznym układem napędowym (rys. 10b).



Rys. 11. Bezwładnikowy akumulator energii
Fig. 11. Magnetodynamic storage system

Firma opracowała też bezwładnikowy akumulator energii zastosowany w wielu pojazdach [9]. Wirnik, wykonany z włókien węglowych, obraca się wewnątrz cylindrycznej obudowy, w której znajduje się próżnia uzyskiwana za pomocą oddzielnej małej pompy (rys. 11). Wewnątrz wirnika umieszczono bardzo zwarty zespół silnik-generator. Opracowano kilka odmian takich akumulatorów o różnej mocy, z których wiele było stosowanych w autobusach miejskich. Maksymalna moc akumulatorów bezwładnikowych MDS K6 i MDS M1 wynosiła odpowiednio 500 i 900kW przy masie 400 i 600kg.

W roku 1986 opracowano w firmie MM napęd hybrydowy do wozu bojowego Marder z bezwładnikowym układem magazynowania energii. Pojazd o masie 30t osiągał prędkość 72km/h. Napędzany był silnikiem spalinowym MB833Ea 500 z generatorem prądu elektrycznego 440kW, a poszczególne taśmy gąsienic były napędzane przez dwa silniki MM o momencie obrotowym 8320kN każdy (rys. 12a). Silniki elektryczne były jednocześnie hamulcami, zapewniającymi odzyskiwanie energii podczas hamowania

Następnym pojazdem był lekki transporter uzbrojenia Wiesel, który przy masie 2,8t osiągał prędkość 75km/h (rys. 12b). Był wyposażony w generator MM 65kW napędzany silnikiem spalinowym, a w kołach tylnych umieszczono dwa silniki elektryczne o momencie obrotowym 900Nm każdy. Na postoju pojazd mógł być dodatkowo zasilany z dostępnej sieci elektrycznej 230/400VAC50Hz.

a)



b)

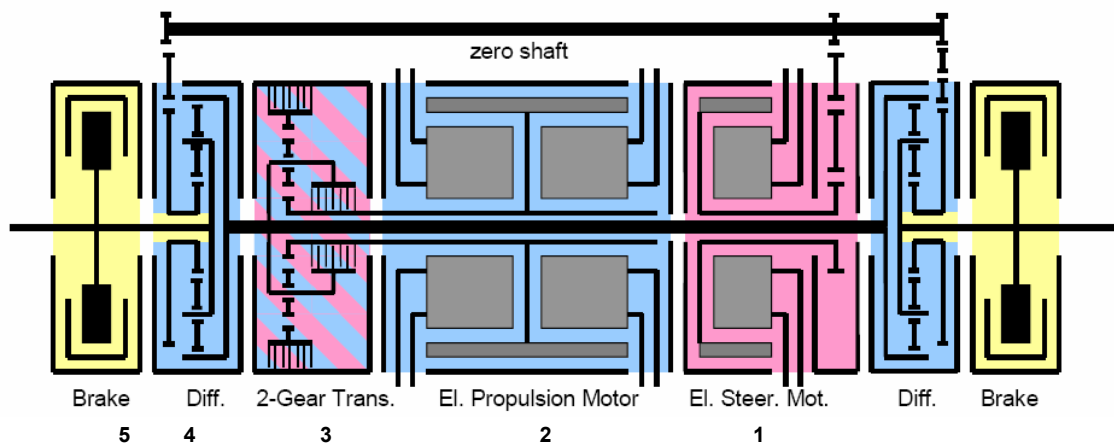


Rys. 12. Niemieckie pojazdy gąsienicowe z napędami hybrydowymi MM: a – Marder, b – Wiesel
Fig. 12. Germans tracked vehicles with hybrid propulsion systems MM: a – Marder, b – Wiesel

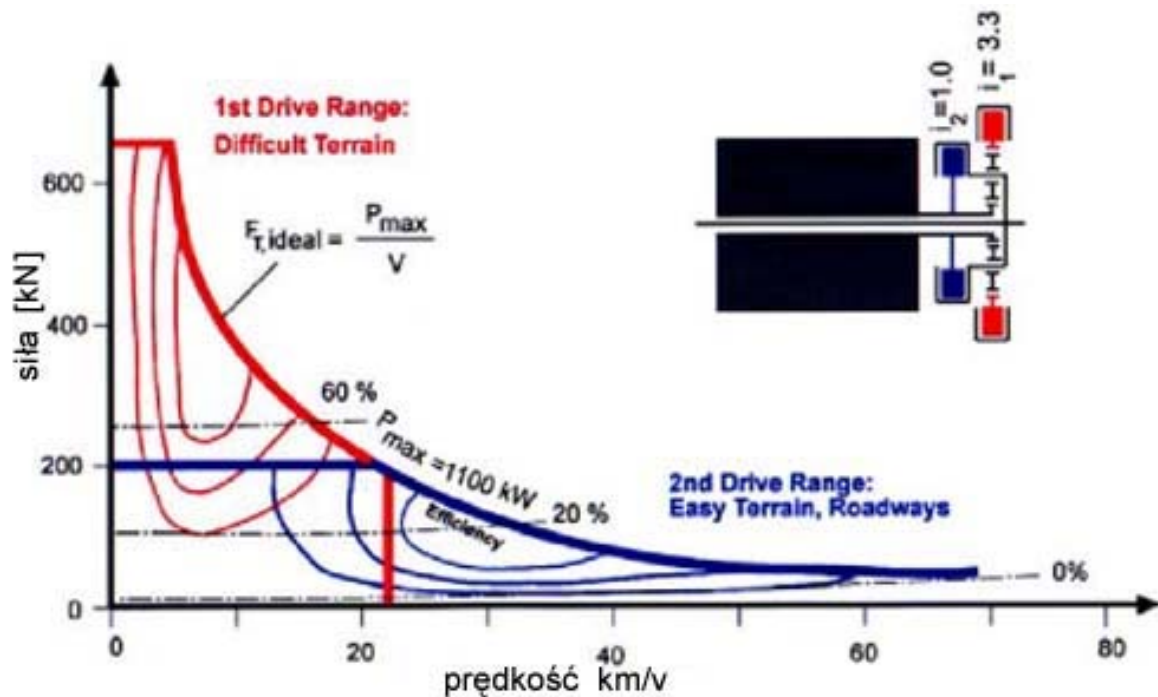
Alternatywnym rozwiązaniem do układu napędowego z dwoma silnikami, napędzającymi lewą i prawą gąsienicę jest zaproponowany przez firmę RENK elektromechaniczny układ przeniesienia mocy jednym silnikiem napędowym i silnikiem sterującym (rys. 13). W układzie tym znajduje się elektryczny silnik napędowy 2 połączony przez planetarną przekładnię dwustopniową 3 z głównym wałem zespołu [10]. Przy zahamowanym kole epicyklicznym uzyskuje się maksymalną siłę napędową podczas ruszania pojazdu, a przy sprzęgniętym wale silnika i wale głównym możliwe jest uzyskanie maksymalnej prędkości pojazdu. Przekładnia ta umożliwia zmniejszenie objętości silników elektrycznych i układów sterowania tymi silnikami. Wał sterujący łączy dwie planetarne przekładnie boczne i jest napędzany od silnika sterującego 1. Przy jeździe na wprost wał jest nieruchomy, natomiast przy skręcie pojazdu obracający się wał sterujący, połączony z przekładnią nawrotną (z prawej strony) powoduje zmianę kierunku obrotu kół słonecznych przekładni bocznych. Zmniejszenie prędkości wału wyjściowego jednej przekładni powoduje wzrost prędkości wału drugiej przekładni, a tym samym zmianę prędkości przewijania gąsienic.

W porównaniu z dwusilnikowym układem napędowym, system EMT jest mniejszy, bezpieczniejszy oraz nie wymaga dokładnej synchronizacji prędkości obrotowej dwóch niezależnych silników elektrycznych.

a)



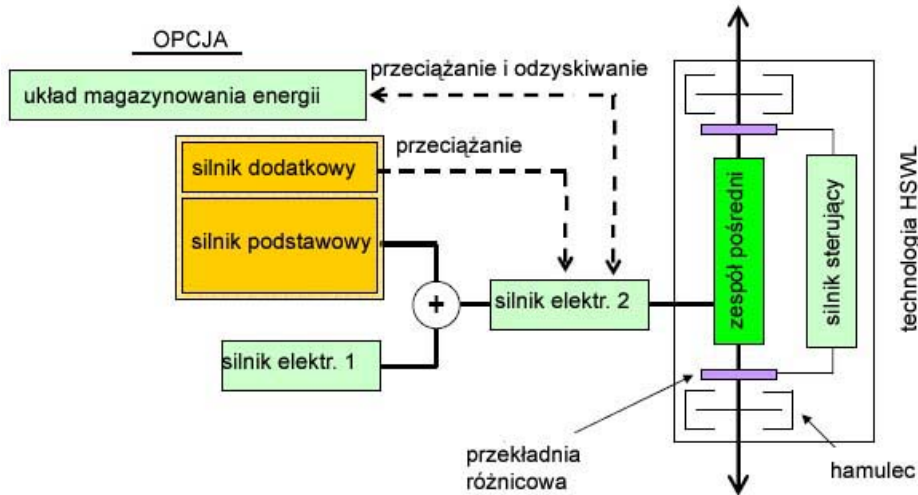
b)



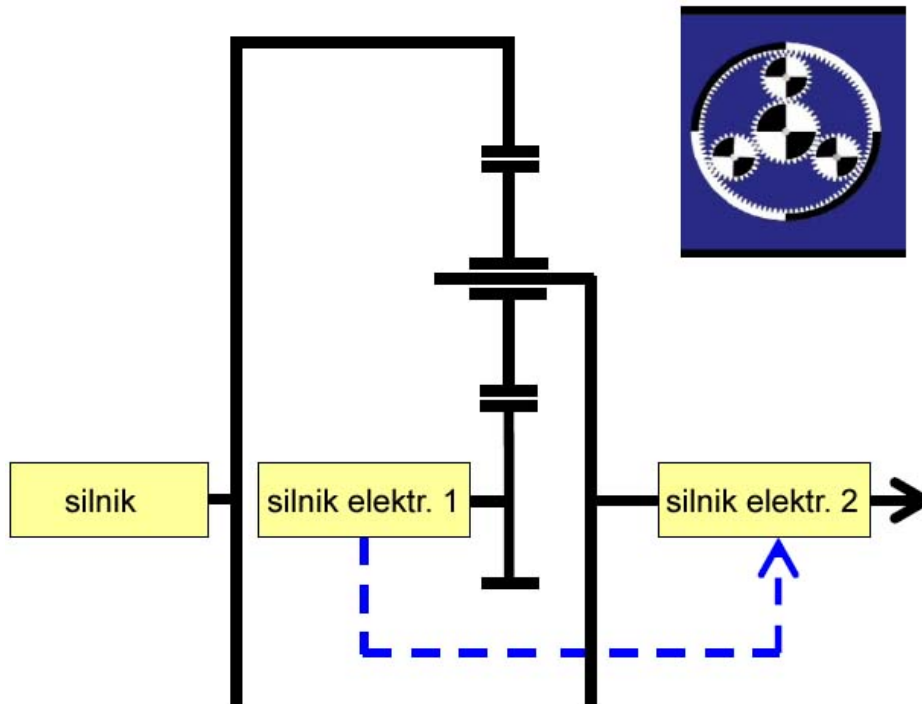
Rys. 13. Elektromechaniczny układ przeniesienia napędu EMT-100: a – schemat, b – charakterystyka trakcyjna, 1 – silnik sterujący, 2 – silnik napędowy, 3 – przekładnia dwustopniowa, 4 – przekładnie planetarne, 5 – hamulec
 Fig. 13. Electro-Mechanical Transmission system EMT-100: a – scheme, b - drive characteristics, 1 – steering motor, 2 – propulsion motor, 3 – 2gear transmission, 4 – differential transmission, 5 – brake

Kolejnym rozwiązaniem układu z łączącego właściwości różnych silników i przekładni planetarnych jest układ „RENK X Drive” do wozu bojowego PUMA (rys. 14a). Wykorzystano w nim skrzynię przekładniową HSWL, a między tę skrzynię i silnik spalinowy MTU 892 wstawiono zespół dwóch silników elektrycznych z magnesami trwałymi: silnik 1 połączony był z kołem słonecznym przekładni planetarnej, a silnik 2 osadzony na wale przekazującym napęd na skrzynię biegów z jednej strony i satelitami przekładni z drugiej strony (rys. 14b). Całkowitą moc układu napędowego 549kW podzielono między silnik podstawowy 370kW oraz wspomagający o mocy 160kW, z którego był zasilany silnik elektryczny 2. Silnik wspomagający może być zastąpiony przez układ magazynowania energii [11].

a)



b)

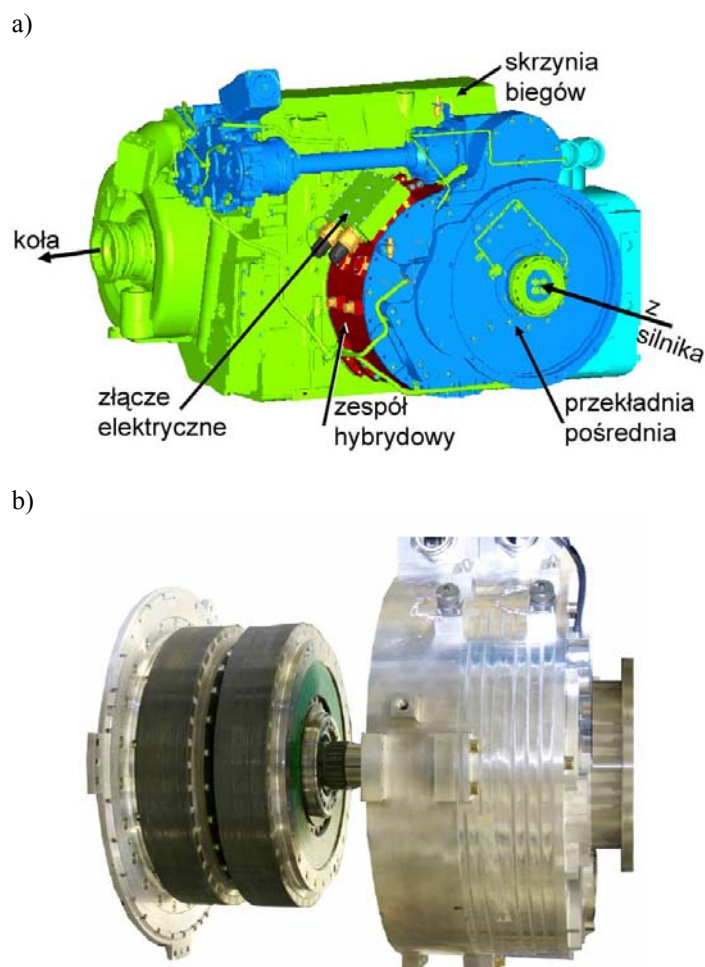


Rys. 14. Zespół napędowy REX: a – schemat działania, b – połączenia silników
 Fig. 14. Propulsion system REX: a – scheme of operation, b – motors connection

Z analizy warunków pracy silnika wynika, że przez 65% czasu pracy zespołu napędowego wystarczy moc 160kW z silnika pomocniczego, przez 30% czasu pracy wymagana jest moc silnika podstawowego (do 370kW), a jedynie przez 5% potrzeba na napęd pojazdu powyżej 370kW. Dlatego w dużym stopniu w pojeździe będzie wykorzystywany silnik pomocniczy, a jego zastosowanie spowoduje zmniejszenie hałasu pojazdu (mniejszy ślad akustyczny), a także obniżenie zużycia paliwa. W przypadku konieczności szybkiej zmiany miejsca postoju można szybko wykorzystać pełną moc pojazdu, a także wykorzystać energię hamowania silnika 1 do dodatkowego zasilenia silnika 2 (rys. 14b).

Na rysunku 16 pokazano najważniejsze zespoły systemu napędowego do bojowego wozu piechoty PUMA. Silniki elektryczne są umieszczone między skrzynią biegów, a silnikiem

spalinowym (rys.16a). Stanowią one zblokowany zespół dwóch silników we wspólnej obudowie (rys. 16b i 16c).



Rys. 16. Zespół napędowy REX: a – skrzynia biegów z układem hybrydowym, b – wirniki
Fig 16. Propulsion system REX: a – transmission with hybrid unit, b – rotors

3.3. Pojazdy Wielkiej Brytanii

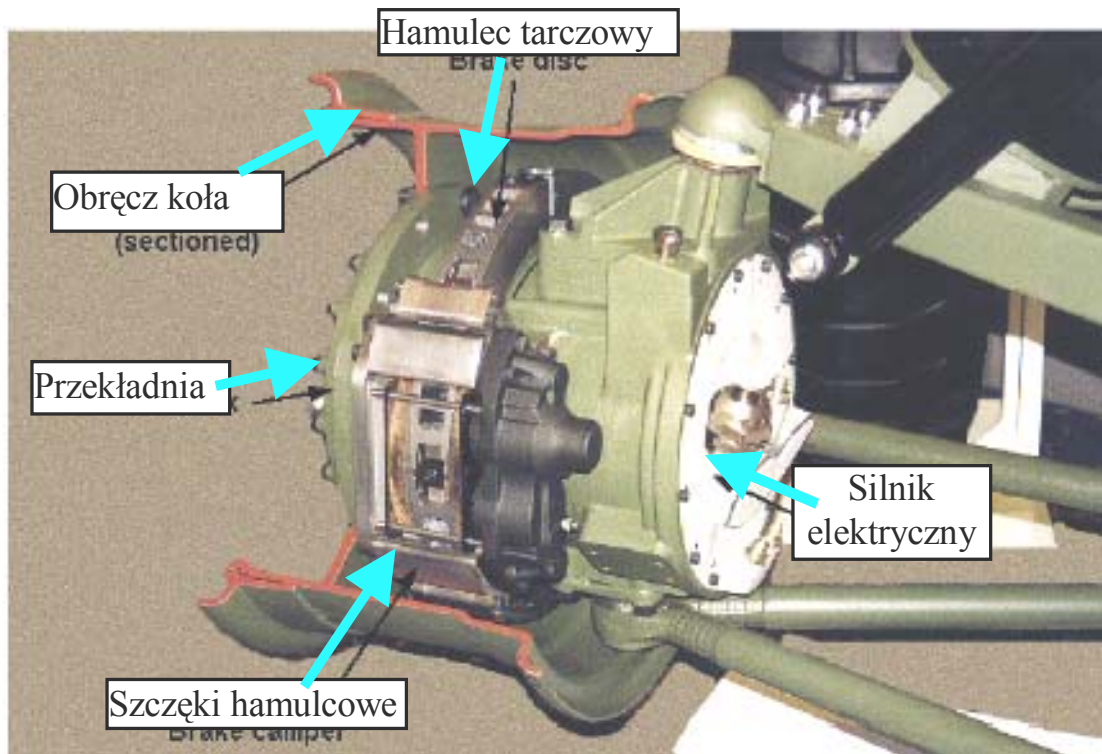
Stanowisko Wielkiej Brytanii w zakresie zastosowania hybrydowych napędów pojazdów jest oparte na zasadzie spełniania potrzeb operacyjnych formułowanych przez użytkowników, nie precyzując jakie technologie muszą być zastosowane. Dlatego nad napędem hybrydowym, a dokładniej nad kierunkiem AECV powinno się pracować jako nad jednym z rozwiązań, które mogłyby być zastosowane o ile będzie dość efektywne do wdrożenia.

Prace nad napędami hybrydowymi prowadzone są w ramach programu Ministerstwa Obrony Wielkiej Brytanii [13]. Głównym wykonawcą jest Instytut QinetiQ współpracujący z firmami: Magnetic System Technology, Multidrive i Alvis Vickers Ltd. Prace koncentrujące się nad pojazdami kołowymi podzielono na projekty techniczne obejmujące: rozwiązanie napędu elektrycznego pojedynczego koła (HMED); układ sterowania poszczególnymi kołami pojazdu (IWSC); wysokotemperaturowe akumulatory ZEBRATM, budowa demonstratora (HERO); badania symulacyjne pojazdu (HVSIMTM); badania studyjne elektrycznego napędu gaśnicowego.

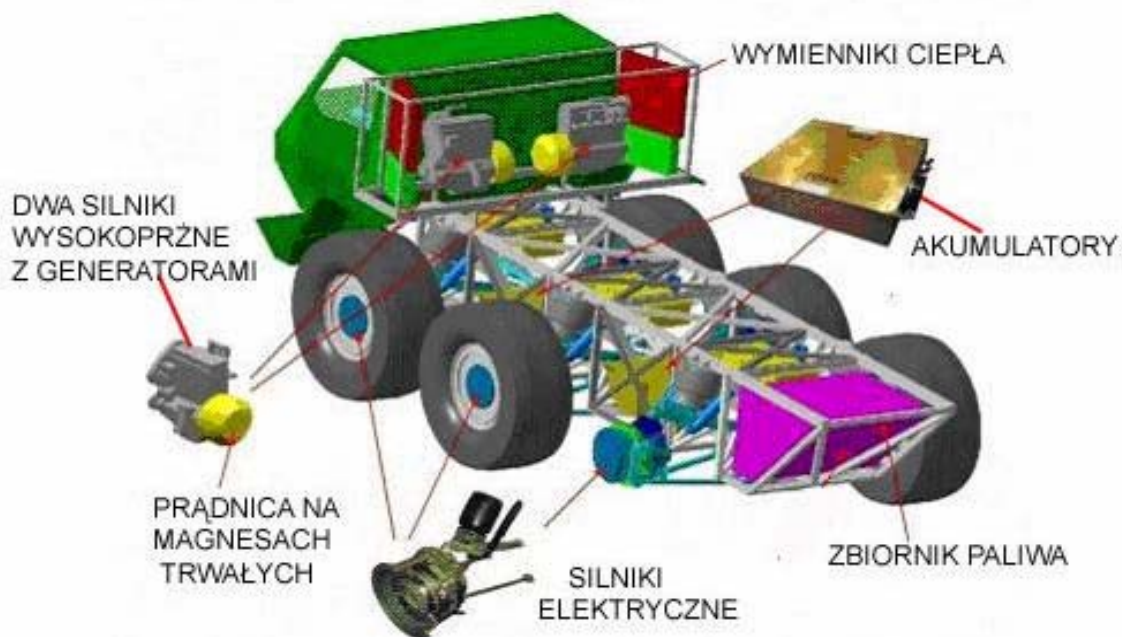
Napęd elektryczny pojedynczego koła został opracowany przez QinetiQ przy współpracy z MST (rys. 16a) [14]. Koło ma 25” obręcz, możliwość obciążenia do 3t, maksymalny moment

20kNm, moc chwilową 100kW (ciągłą 50kW), reduktor i hamulec cierny oraz zapewnia jazdę z prędkością 120km/h. Demonstrator technologii o masie 19 ton ma dwa silniki spalinowe o pojemności 2,5dm³ i mocy 98kW z generatorami prądu elektrycznego, 6 kół napędzanych oraz dwie baterie ZEBRA (rys. 16b). Podczas badań stwierdzono 28% zmniejszenie zużycia paliwa przez pojazd hybrydowy i zmniejszenie wykrywalności cieplnej o ok. 18%.

a)



b)



Rys. 16. Pojazd demonstracyjny 6x6: a - przekrój koła, b - zespoły pojazdu
 Fig. 16. Demonstrator 6x6: a – wheel cross section, b – vehicle units

Drugim pojazdem pokazowym z napędem hybrydowym jest samochód zbudowany na nadwoziu LRDetender z wykorzystaniem standardowego układu przeniesienia mocy. Między sprzęgło a skrzynię przekładniową wbudowano zespół „silnik-generator” z magnesami trwałymi i zamontowano dodatkowy akumulator ZEBRA. Uzyskano istotne lepsze przyspieszenie pojazdu oraz zmniejszenie zużycia paliwa.

Kolejne studium opracowane przez Quinetiq oraz Alvis Vickers Ltd dotyczy zespołu napędowego do istniejącego średniego wozu bojowego. Zblokowany zespół napędowy znajdował by się w tylnej części pojazdu, a załoga z przodu. Przeanalizowano warianty pojazdu napędzanego z silnikiem 6 cylindrowym Caterpillar C9 o mocy 410kW przy 2300obr/min w układzie rzędownym i pojemności 8,8dm³ oraz z silnikiem MTU serii 890 w układzie V6, o mocy 550kW przy 4250obr/min. Napędzały one generator z magnesami trwałymi. Brano pod uwagę akumulatory wysokotemperaturowe ZEBRA (52kW, 12kWh, 174kg i 113dm³) oraz akumulatory SAFT litowo-jonowe o dużej energii. Parametry symulacji Porównywano z parametrami pojazdu napędzanego silnikiem MTU6V199 o mocy 400kW ze skrzynią biegów Allison X3004B.

Zastosowanie silnika C9 pozwoliło na zmniejszenie masy pojazdu o 281kg oraz czasu przyspieszania do 90km/h z 92sek do 37sek. Zużycie paliwa zmalało o 40%. Silnik MTU umożliwił zmniejszenie masy pojazdu o 1397kg, skrócenie pojazdu o jedno koło jezdne (z sześciu kół jezdnych wystarczyło tylko pięć kół), a czas rozpędzania pojazdu do 90km/h zmalał blisko pięciokrotnie (z 92sek do 19sek). Zużycie paliwa zmalało o 10% [15].

3.4. Pojazdy Francji

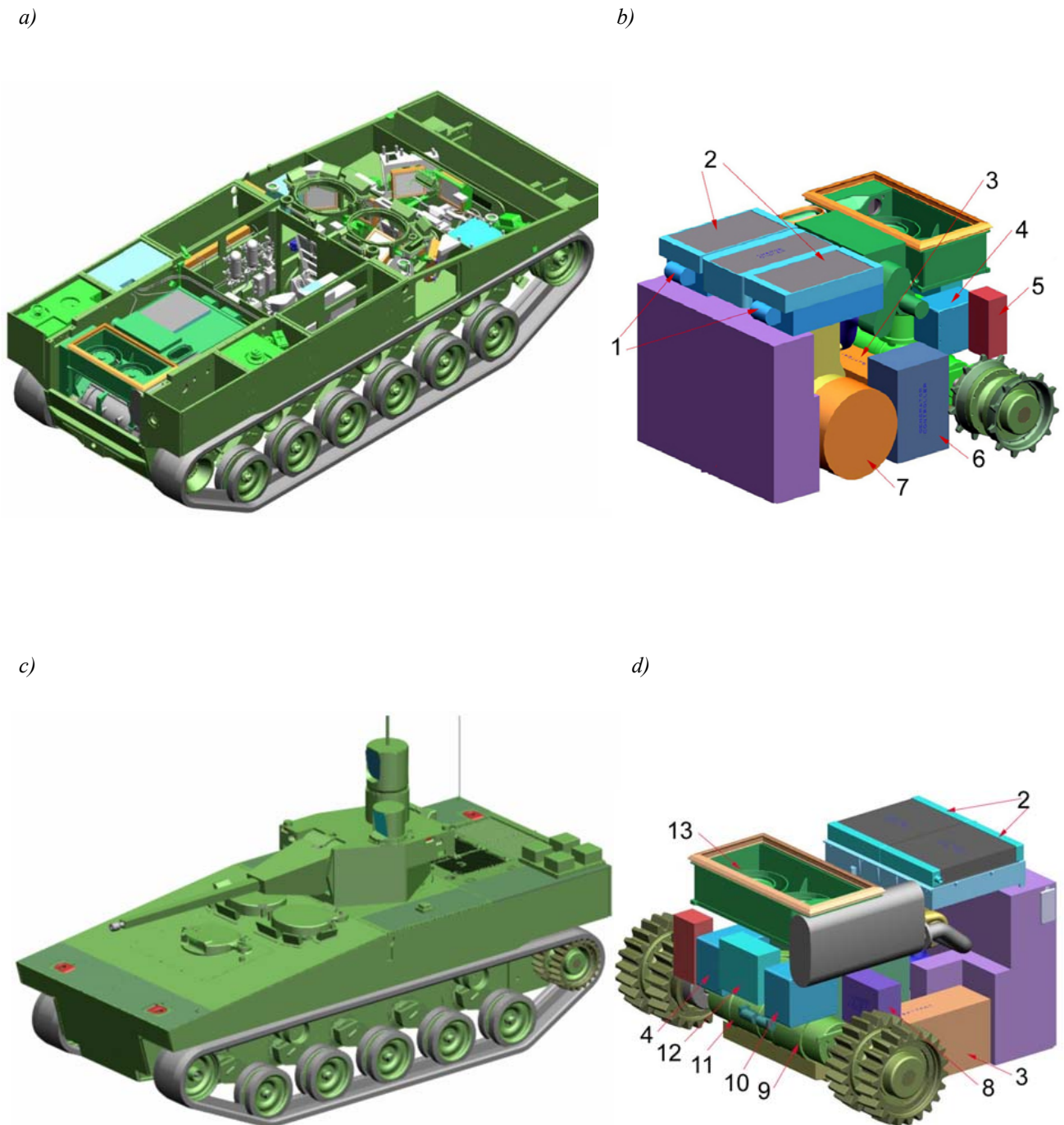
Prace francuskie są ukierunkowane na opracowanie demonstratora technologii o masie poniżej 20t w układzie 6x6. Wcześniej zastosowano doświadczalny napęd hybrydowy w małym samochodzie rozpoznawczym Panhard oraz zbudowano doświadczalny pojazd 4x4. W roku 2002 firma Panhard.

Obecnie Firma Giat Industries pracuje na zlecenie DGA nad pojazdem hybrydowym o masie 18t i układzie 6x6 (rys. 18) [16]. Pojazd prototypowy ma silnik MTU6v199TE20 o mocy 450kW napędzający generator MM 425kW. Silniki elektryczne MM Motor M60 o mocy 60kW umieszczone są w kołach pojazdu, gdzie znajdują się także reduktory o przełożeniu $i=9,34$. Zapewniają one prędkość trwałą 90km/h, a chwilowo prędkość pojazdu może wzrosnąć do 110km/h, przy czym ograniczenie prędkości jest spowodowane wydajnością układu chłodzącego silniki elektryczne w kołach.

Pojazd ma cztery akumulatory 28V do zasilania sieci pokładowej oraz akumulatory trakcyjne 120kW (NiMH, lub Li-Ion), umieszczone pod siedzeniem desantu (4-8 żołnierzy). Napięcie w układzie napędowym pojazdu wynosi 300-750 V. Koła są zawieszane na wahaczach ze sprężynami śrubowymi i olejowo-gazowymi amortyzatorami.

Bardzo starannie opracowano metody redukcji śladu cieplnego. Powietrze dopływające do pojazdu otworami z boku kadłuba na wysokości kierowcy jest rozprowadzane kanałami wzdłuż pojazdu, a po zmieszaniu ze spalinami jest rozpraszane za tylną ścianą pojazdu.

Prowadzone są również prace nad hybrydowym demonstratorem gaśnicowym o masie 20t z jednolitymi gumowymi gaśnicami. Pozwolą one na jazdę z prędkością 100km/h, a więc zbliżoną do prędkości pojazdu kołowego, natomiast zachowają właściwości pojazdu gaśnicowego na bezdrożach. Prowadzone są obecnie badania gaśnic gumowych na transporterze AMX10P w zakresie stabilności przy dużej prędkości i aktywnego napinania gaśnic (rys. 20). Demonstrator powinien być zbudowany w latach 2006-2007 [17].



Rys. 17. Studium pojazdu gaśnicowego: a – pojazd podstawowy, b – zespół napędowy z silnikiem C-9, c – pojazd skrócony, d – zespół napędowy z silnikiem MTU,

1 – chłodnice wysokotemperaturowe, 2 – chłodnice niskotemperaturowe, 3 – akumulator ZEBRA, 4 – sterownik silnika LH, 5 – sterownik wentylatora, 6 – sterownik generatora, 7 – generator, 8 – opornik 200kW, 9 – silnik RH, 10 – sterownik silnika RH, 11 – silnik LH, 12 – sterownik silnika sterującego, 13 – wentylatory

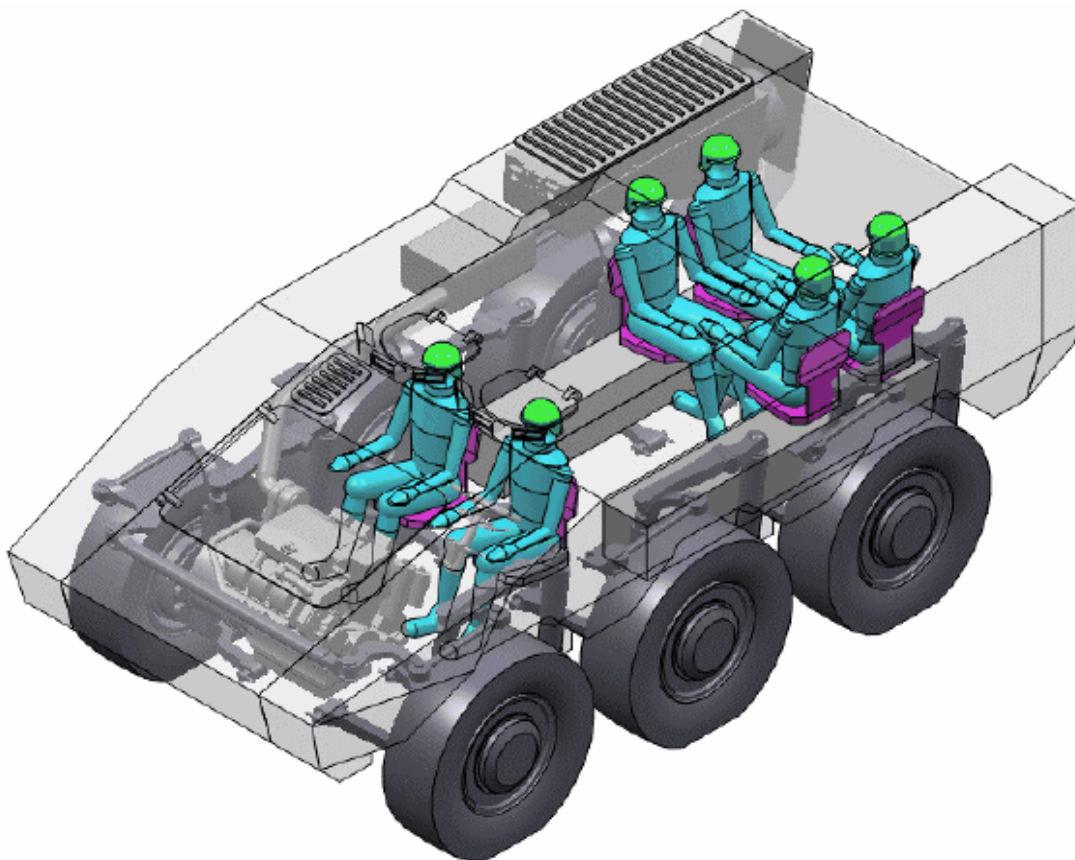
Fig. 17. Stadium of the track vehicle: a – basic vehicle, b – propulsion system with the C-9 engine, c – shorter vehicle, d – propulsion system with the MTU engine

1 – high temperature coolers, 2 – low temperature coolers, 3 – batteries ZEBRA, 4 – controller LH motor, 5 – fan controller, 6 – generator controller, 7 – generator, 8 – 200kW resistor, 9 – RH Motor, 10 – RH motor controller, 11 – LH motor, 12 – steer motor controller, 13 – fans

a)

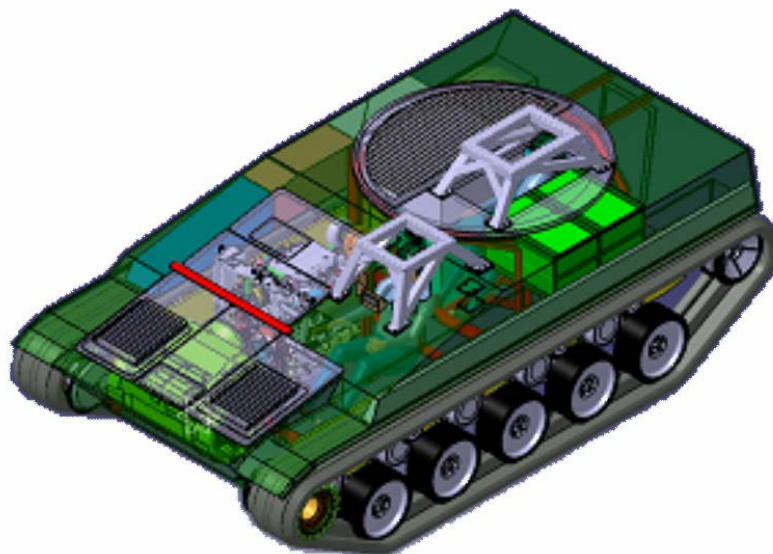


b)



Rys. 19. Pojazd firmy Giat Industries; a – demonstrator, b – rozmieszczenie załogi
Fig. 19. Vehicle from Giat Industries: a – demonstrator, b – crew persons location

a)



b)



Rys. 20. Francuski hybrydowy pojazd gąsienicowy: a – koncepcja ogólna, b – koło zębate gumowej gąsienicy
 Fig 20. French hybrid tracked demonstrator: a – general concept, b – rubber track sprocket

3.5. Pojazdy Republiki Południowej Afryki

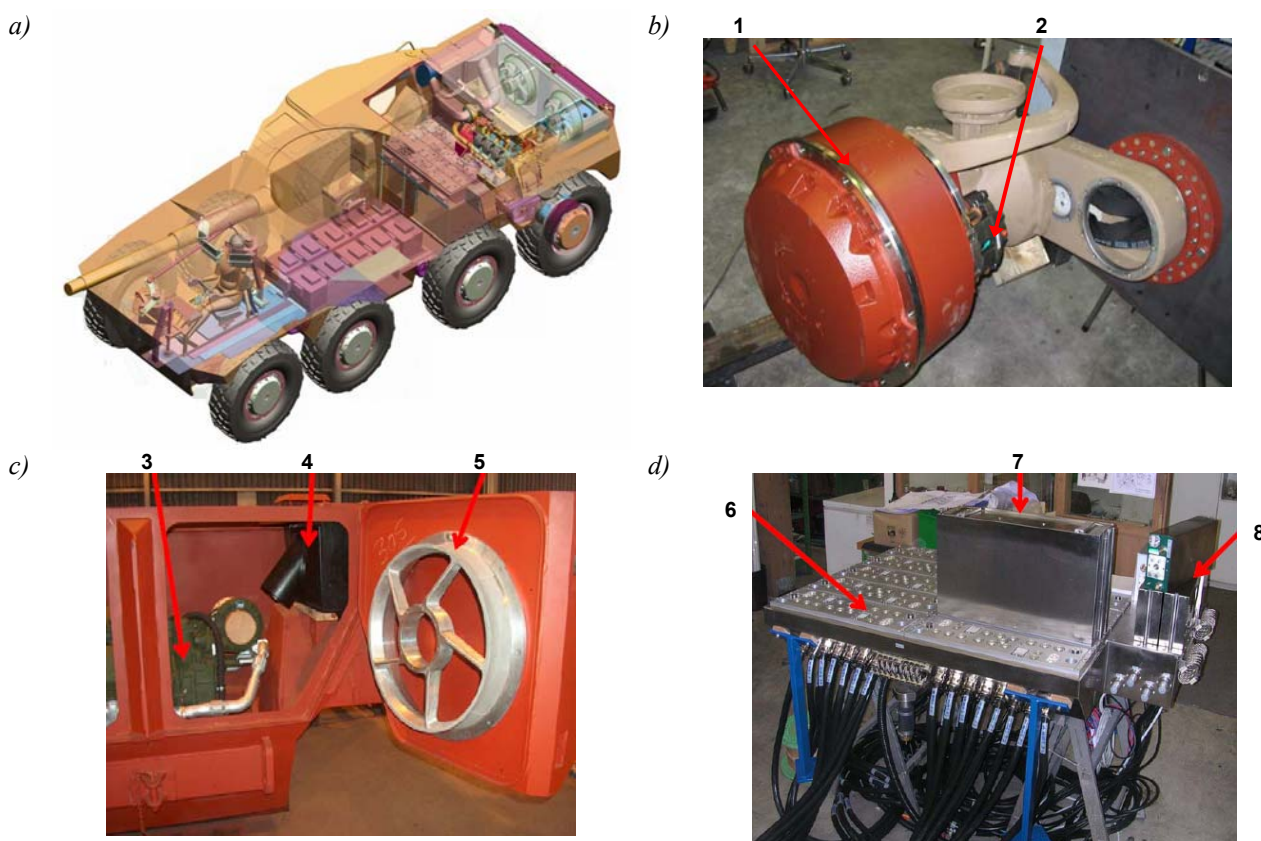
W Republice Południowej Afryki realizowane są dwa programy z wykorzystaniem pojazdów demonstracyjnych: samochodu ciężarowego badawczego z napędem elektrycznym 8x8 (program ETD) oraz wozu bojowego z napędem elektrycznym 8x8 – program CVED.

Program ETD zrealizowano na samochodzie terenowym 8x8 firmy MAN, przystosowanym przez firmę MM do napędu hybrydowego. Generator o mocy 360kW jest napędzany silnikiem o zapłonie samoczynnym. Każdy z silników elektrycznych umieszczonych w kołach pojazdu ma moc 75kW i moment obrotowy 1300Nm, który przez przekładnię planetarną koła jest zwiększony do 16kNm. Pojazd ma bezwładnościowy akumulator energii.

Bazując na doświadczeniach programu ETD realizowany jest program CVED, który zakłada całkowitą przebudowę opancerzonego pojazdu bojowego ROOIKAT w pojazd hybrydowy, z wykorzystaniem zespołów układu napędowego pochodzących z firmy MM (rys. 21a)[18]. W pojeździe zastosowano silnik MTU6V199 o mocy 450kW/2400 obr/min z generatorem prądu

elektrycznego 425kW ulokowanym wzdłuż tylnej ściany pojazdu (rys. 21c) oraz silniki umieszczone w każdym z jego ośmiu kół (rys. 21b). W kołach pojazdu znajdują się silniki M67 o maksymalnym momencie 2250Nm i mocy ciągłej 80kW. Pojazd o masie 28t osiąga prędkość maksymalną 120km/h (ciągłą 90km/h), do prędkości 60km/h przyspiesza w ciągu 20s, pokonuje zbocza 70% i przy zasilaniu z akumulatorów może pokonać 5km.

Do końca 2007 roku planowane są badania demonstratora celem porównania jego parametrów z pojazdem napędzanym z silnikiem spalinowym i mechanicznym układem przeniesienia napędu.



Rys. 21. Pojazd ROOIKAT z napędem hybrydowym i jego zespoły: a – rozmieszczenie zespołów, b – pojedyncze koło, c – przedział napędowy, d – zespół elektrycznego sterowania,

1 – koło z reduktorem, 2 – hamulec, 3 – silnik z generatorem, 4 – filtr powietrza, 5 – położenie wentylatora, 6 – zespół przyłączeniowy, 7 – sterownik silnik/generator, 8 – konwerter ładowania

Fig. 21. ROOIKAT hybrid vehicle and its components: a – component distribution, b – wheel set, c – propulsion room, d – electric drive connector,

1 – wheel station, 2 – brake, 3 – diesel/generator, 4 – air filter, 5 – cooling fan position, 6 – connection set, 7 – motor/generator controller, 8 – charge converter

3.6. Pojazdy Szwecji

Bardzo ambitny program napędu hybrydowego pojazdów kołowych i gąsienicowych został zaakceptowany przez WEAG i oznaczony symbolem RTP16.02. Miał być kierowany przez Szwecję przy udziale Finlandii, Holandii, Włoch, Grecji i Turcji. Obejmował zarówno pojazdy kołowe jak również pojazdy gąsienicowe o wymiennym module użytkowym, napędzane podobnymi układami napędowymi [23]. Problemy finansowe spowodowały rozpad zespołu.

Prototyp pojazdu gąsienicowego powstał najwcześniej. Oznaczony symbolem B13 jest napędzany dwoma silnikami o mocy 230kW z generatorami prądu elektrycznego (rys. 22a). Silniki umieszczone są z przodu pojazdu wzdłuż jego burt, obok siedzenia kierowcy i dysponenta.

Każda gąsienica gumowa jest napędzana za pomocą dwóch zablokowanych silników elektrycznych. Pojazd ma trójmodułową konstrukcję z przedziałami: napędowym i kierowania, użytkowym z tyłu pojazdu oraz podwozia.

Pojazd kołowy jest opracowywany w ramach trzech programów SEP (S), FRES (WB) oraz FSC (US). W wersji przedstawionej przez firmę MST Ltd pojazd ma dwa zespoły prądotwórcze umieszczone równoległe do burt pojazdu podobnie jak pojazd gąsienicowy. Dwa silniki spalinowe o mocy 170kW napędzają generatory zasilające koła oraz akumulatory położone wzdłuż osi pojazdu, pod podłogą. W 24" kołach zamontowano silniki elektryczne (moc chwilowa 125kW i stała 50kW każdego), dwustopniową przekładnię planetarną i hamulce cierne. Pojazd rozwija maksymalną prędkość 110km/h. Moc hamowania elektrycznego to 360kW, natomiast moc całkowita hamulców wynosi 2940kW, z tego na koła przednie przypada 1616kW.

a)



b)



Rys. 22. Demonstratory szwedzkie Hagglunds; a – pojazd gąsienicowy B13, b – pojazd kołowy
Fig 22. Swedish demonstrators of Hagglunds: a – tracked vehicle B13, b – wheeled vehicle

4. Podsumowanie

Zarówno prognozy dotyczące przyszłego pola walki jak również zakres prowadzonych prac naukowo – badawczych, a także utrwalające się tendencje w budowie hybrydowych pojazdów mechanicznych dla potrzeb wojska pozwalają na stwierdzenie, że koncepcja „All Electric Combat

Vehicle” staje się coraz bardziej realna. Konieczne jest jednak rozwiązanie wielu problemów, które zwiększą sprawność takich pojazdów, a także obniżą ich koszt.

Niżej przedstawiono kilka wniosków uogólniających, dotyczących przedstawionych koncepcji wojskowych pojazdów hybrydowych, pomijając wiele problemów związanych z akumulacją energii, armatą oraz elektrycznie wspomaganą osłoną pancerza wozu bojowego.

1. Istotne zalety napędów hybrydowych, w tym mniejsze zużycie paliwa, korzystna charakterystyka trakcyjna pojazdu, duża siła napędowa podczas ruszania oraz możliwość cichej jazdy przy małym śladzie cieplnym powodują utrzymujące się zainteresowanie tymi pojazdami i realizację coraz bardziej zaawansowanych technologicznie projektów.
2. Demonstratory dużych kołowych pojazdów bojowych mają na ogół silniki elektryczne z magnesami trwałymi w kołach pojazdów. Takie rozwiązanie powoduje zwiększenie przestrzeni ładunkowej pojazdu i zmniejszenie masy pojazdu. Jego wadą jest zwiększenie masy nieresorowanej (nawet do ok. 50 %), co powoduje zwiększone obciążenia dynamiczne kół i ich zawiesznień. Dlatego mają one wzmocnione zwieszzenia oraz specjalne mechanizmy skrętu.
3. Hybrydowy układ napędowy pojazdu gąsienicowego w połączeniu z gumowymi gąsienicami daje bardzo cichy pojazd o bardzo dobrych właściwościach terenowych i dużej prędkości jazdy, nie ustępującej pojazdom kołowym.
4. Intensywnie pracuje się nad sposobami akumulacji energii, elektroniką układów sterowania pojazdami. Prowadzone są intensywne prace nad rozwojem ogniów paliwowych do pojazdów mechanicznych jako podstawowych źródeł napędu zamiast silników spalinowych.

Literatura

- [1] *Land Operation in the Year 2020*, RTO TR 8 (AC/323(SAS)TP/5, 03.1999.
- [2] *Life Cycle Cost of All Electric Combat Vehicle*, RTO TR13 (AC/323(SAS)TP/10,03.1999.
- [3] Scarlett, M., *Polluting the ICE to benefit the environment*. Engine Technology International, No 5/1998.
- [4] Freeman, M., *US Army Science & Technology Power and Energy Update*, 6th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Bath, 2005.
- [5] Trzaska, T., *Electric Drive Reconnaissance, Surveillance and targeting Vehicle (RST_V) Development Update* 6th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Bath, 2005.
- [6] Stephens, M., *Advanced Hybrid Electric Drive (AHED) 8x8: Development Update*, 6th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Bath, 2005.
- [7] Hammond, S., *Tracked and Wheeled Combat Vehicles with Common Electric Drive Components*, . 5th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Angers, 2003.
- [8] Ehrhart, P., *Permanent Magnetic Motors for Vehicle Hybrids*, International Symposium „Hybrid Technology for Military Tracked Vehicles“ Augsburg, 2006.
- [9] Reiner, G., Ehrhart, P.: *MDS Flywheel Storage System in a 25 t 8x8 Wheeled Electric Vehicle*, 4th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Noordwijkerhout, 2001.
- [10] Naunheimer, H., *Technology of Future Tank Transmissions*. Symp. N-T nt. *Układy przeniesienia napędu RENK do wojskowych pojazdów*, WAT Warszawa 16.02.1999.
- [11] Dobereiner, R., *New Developments of EMT Drive Systems*, 6th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Bath, 2005.
- [12] Grodeck, M., *New High Power Density Engine and Hybrid Propulsion Concepts*, 6th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Bath, 2005.
- [13] Andrews, G.J., *UK Requirements*, 6th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Bath, 2005.
- [14] Geeves, M., *The UKMOD Hybrid electric Drive Evaluation Programme*. 5th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Angers, 2003.

- [15] Jenkins, M., *Hybrid Electric Drivetrain for Wheeled Military Vehicles – Components and Systems*, 6th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Bath, 2005.
- [16] Moreno, R., *Electric Propulsion Demonstrator*, International Symposium „Hybrid Technology for Military Tracked Vehicles“ Augsburg, 2006.
- [17] Moreno, R., *Rubber Tracked Demonstrator*, International Symposium „Hybrid Technology for Military Tracked Vehicles“ Augsburg, 2006.
- [18] Avenant, W .P., van der Merwe, C. J., *Progress of the Combat Vehicle Electric Drive Program* 6th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Bath, 2005.
- [19] Lindstrom, R. O., Falk, A., *RTP 16.02 All Electric Vehicle*. 5nd Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Angers, 2003.
- [20] Jenkins, M., *Hybrid Electric Drive Trains for Wheeled Military Vehicles*, 6th Int. Conf. On All-Electric Combat Vehicles, Bath, 2005.