

PROPULSION MOTORS FOR COMBAT VEHICLES

Jerzy Walentynowicz

*Military University of Technology
Faculty of Mechanics
Ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw Poland
tel./fax: +48 22 683956
e-mail: jwalentynowicz@wme.wat.edu.pl*

Abstract

Goals and requirements for engines for today's fighting vehicles were presented in this paper. First of all they are apply to compactness of engines and all propulsion systems enabling decreasing armoured volume of fighting vehicles. Characteristics of combustion engines, turbine engines and electric motors were described. The ways of increasing of specific power piston engines were analysed taking following methods results from useable power formula into consideration: engine supercharging application, increasing engine speed, engine capacity, cylinders number and number of strokes during one cycle of engine work. Examples of engines having this methods were described. Turbine engines used for vehicle propulsion including new turbine engine LV100-5 as a next engine instead of AGT-1500 turbine engine were presented. Applications of electric motors for propulsion fighting vehicles were described at length. History of electric propulsion systems for fighting vehicles were presented. Types of electric motors used in today's vehicles were characterised. Properties of electric motors with permanent magnets which make possible to get high level of motor torque and energy recuperation during breaking with engine aid were described. These motors are using in propulsions systems of contemporary wheeled and tracked vehicles. They are mounted directly in the wheels of wheeled vehicles. In tracked wheel electric motors are used in electromechanical propulsion systems often.

Keywords: *transport, combustion engines, turbine engines, electric motors, fighting vehicles*

SILNIKI NAPĘDOWE WOZÓW BOJOWYCH

Streszczenie

W referacie przedstawiono zadania i wymagania stawiane silnikom współczesnych wozów bojowych. Dotyczy one przede wszystkim zwartości silników i całych zespołów napędowych, umożliwiających zmniejszenie objętości opancerzonej wozu bojowego. Opisano charakterystyki tłokowych silników spalinowych, silników turbinowych i silników elektrycznych. Przeanalizowano możliwe sposoby zwiększenia mocy właściwej silników tłokowych wynikające z zależności na moc użyteczną silnika, w tym: doładowanie silnika, wzrost jego prędkości obrotowej, objętości skokowej, liczby cylindrów i liczby suwów na obieg pracy silnika. Przedstawiono przykłady silników mających te rozwiązania. Opisano rozwiązania silników turbinowych, w tym nowego silnika turbinowego LV100-5, który ma zastąpić silniki AGT-1500. Szerzej opisano zastosowanie silników elektrycznych do napędu wozów bojowych. Przedstawiono historię napędów elektrycznych tych wozów. Scharakteryzowano rodzaje silników elektrycznych stosowanych we współczesnych pojazdach. Opisano właściwości silników z magnesami trwałymi, które umożliwiają uzyskanie dużego właściwego momentu obrotowego silnika oraz odzyskiwanie energii podczas hamowania silnikiem. Silniki takie są one stosowane do napędu współczesnych pojazdów kołowych i gąsienicowych. W pojazdach kołowych silniki te są montowane najczęściej w kołach pojazd. W pojazdach gąsienicowych są one często stosowane w elektromechanicznych zespołach napędowych.

Słowa kluczowe: *transport, silniki spalinowe, silniki turbinowe, silniki elektryczne, wozy bojowe*

1. Wstęp

O powodzeniu działań wozów bojowych na polu walki decydują trzy podstawowe czynniki:

- uzbrojenie, obejmujące siłę i precyzyjne rażenie oraz zdolność do wykrycia celu,
- odporność na uderzenie pocisków i działanie innych środków rażenia przeciwnika,
- zdolność do szybkiej zmiany miejsca postoju utrudniającą wykrycie i trafienie przez przeciwnika po wykryciu.

W referacie skoncentrowano się nad problemami związanymi z trzecim z wyżej wymienionych czynników. Obecnie wszystkie seryjnie produkowane wozy bojowe są napędzane tłokowymi silnikami spalinowymi, a tylko nieliczne pojazdy mają silniki turbinowe. Jednocześnie prowadzone są prace nad nowymi technologiami do silników wozów bojowych przyszłości [6, 8, 11]. Ich wdrożenie zależy od czynników technicznych i ekonomicznych.

Biorąc pod uwagę zadania wozów bojowych ich zespoły napędowe muszą spełniać wiele szczególnych wymagań. Do najważniejszych zalicza się:

- 1) dużą wartość siły napędowej podczas ruszania pojazdu,
- 2) dużą wartość momentu oraz mocy gabarytowej i jednostkowej silnika (stosunek momentu obrotowego i mocy silnika do jego wymiarów gabarytowych oraz masy silnika),
- 3) niskie zużycie paliwa przez pojazd,
- 4) dużą niezawodność i trwałość zespołu napędowego.

Duża wartość siły napędowej pojazdu zapewnia zdolność do szybkiej zmiany jego położenia oraz do pokonywania trudnych przeszkód terenowych. Jednocześnie istotny jest przebieg tej siły w funkcji prędkości pojazdu. Ponieważ tłokowe silniki spalinowe charakteryzują się nieciągłością momentu obrotowego przy małej prędkości obrotowej, dlatego mogą być obciążane dopiero po przekroczeniu pewnej prędkości obrotowej. Opóźnia to istotnie czas niezbędny na rozpędzenie pojazdu po bezpośrednim wykryciu przez przeciwnika, a większa emisja hałasu podczas pracy silnika ułatwia wykrycie pojazdu podczas zmiany miejsca postoju.

Istotna jest także wartość wskaźnika momentu gabarytowego silnika (mocy gabarytowej), albowiem zbyt rozbudowane zespoły napędowe wymagają zwiększonej przestrzeni opancerzonej pojazdu, a tym samym wpływają na wzrost masy pojazdu i pogorszenie jego właściwości trakcyjnych. Stąd koncepcja zintegrowanych zespołów napędowych, które łącząc w sobie silnik, układy dolotu powietrza i wylotu spalin oraz układ przeniesienia napędu, zmniejszają istotnie objętość zespołów napędowych, a tym samym objętość opancerzoną pojazdu (rys. 1) [2].



Rys. 1. Objętość zespołu napędowego czołgu Leopard po zastosowaniu zintegrowanego zespołu z silnikiem MT 883 [9]

Fig. 2. Volume of propulsion system of tank Leopard powered with integrated power pack with engine MT883 [9]

Obniżenie zużycia paliwa przez silnik jest związane z mniejszym obciążeniem łańcucha dostaw logistycznych transportem dużej ilości paliwa na potrzeby walczących wojsk, które w warunkach współczesnych działań wojennych może stanowić 40% dostarczanego zaopatrzenia.

Wszystkie te wymagania w połączeniu z dużą niezawodnością i trwałością silnika są bardzo trudne do jednoczesnego spełnienia i wymagają ciągłego poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. W dalszej części referatu zostaną przedstawione wybrane problemy bieżącego rozwoju zespołów napędowych wozów bojowych.

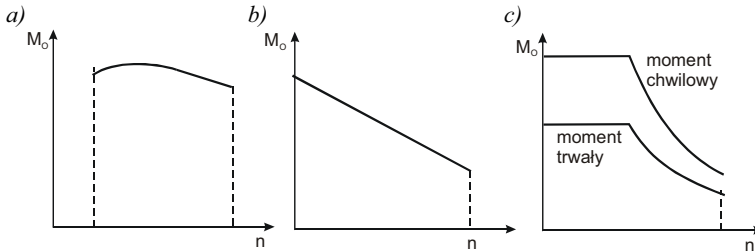
2. Silniki stosowane do napędu wozów bojowych

Do napędu wozów bojowych są stosowane trzy rodzaje silników:

- tłokowe silniki spalinowe,
- turbinowe silniki spalinowe,
- silniki elektryczne.

Tłokowe silniki spalinowe są obecnie masowo stosowane do napędu wozów bojowych. Jednak ich charakterystyki są najmniej korzystne w porównaniu z charakterystykami dwóch pozostałych silników. Mają one nieciągłość momentu przy małej prędkości obrotowej, co wymaga stosowania sprzęgieł oraz kół zamachowych niezbędnych do ruszania i zmiany biegów. Zmniejsza to ich niezawodność i wydłuża czas rozpędzania pojazdu.

Charakterystyki pozostałych dwóch rodzajów silników są dużo korzystniejsze, a maksymalna wartość momentu przy silniku o zatrzymanym wale napędowym ($n=0$) umożliwia szybki start i rozpędzanie pojazdu, aczkolwiek ograniczony zakres prędkości obrotowej wymaga również zastosowania skrzyń przekładniowych, jednak o mniejszej liczbie przełożeń (rys. 2).



Rys. 2. Charakterystyki silników do napędu wozów bojowych: a – tłokowego, b – turbinowego, c – elektrycznego
 Fig. 2. Characteristics of engines used for fighting vehicle propulsion: a – piston, b – turbine, c – electric

2.1. Tłokowe silniki spalinowe

W przypadku wozów bojowych konieczne jest uzyskanie jak największej koncentracji mocy silników z jednostki ich objętości gabarytowej oraz zadowalającej trwałości i niezawodności przy stosunkowo niskich kosztach produkcji i eksploatacji. Dlatego od wielu dziesięcioleci dążono do zwiększenia mocy jednostkowej tłokowych silników spalinowych wozów bojowych. Osiągnano to różnymi sposobami, które wynikają z ogólnej zależności na moc użyteczną silnika

$$N_e = \frac{p_e n V_{ss} L}{60\tau}, \quad (1)$$

gdzie:

p_e – średnie ciśnienie użyteczne, które zależy od przebiegu ciśnienia wewnątrz cylindra,

n – prędkość obrotowa silnika,

V_{ss} – objętość skokowa silnika,

L – liczba cylindrów,

τ – współczynnik określający liczbę obrotów wału korbowego na jeden obieg pracy ($\tau = 1$ dla silników dwusuwowych, $\tau = 2$ dla silników czterosuwowych).

Zwiększenie średniego ciśnienia użytecznego jest najczęściej stosowaną metodą zwiększenia mocy jednostkowej silnika. Uzyskuje się to głównie stosując doładowanie silnika, co umożliwia zagęszczenie ładunku powietrza w cylindrze i wtrysk większej dawki paliwa, a w rezultacie powoduje zwiększenie ciśnienia spalania. Jednak konieczność przyjęcia odpowiednio dużego stopnia sprężania, zapewniającego pewny rozruch silnika, a z drugiej strony granica wytrzymałości stosowanych materiałów konstrukcyjnych i olejów silnikowych powodująca ograniczenie maksymalnego ciśnienia spalania do około 15 MPa zmuszają do ograniczenia stopnia doładowania, względnie do optymalizacji tych parametrów.



Rys. 3. Silnik Perkins CV12 (moc 1120kW)
Fig. 3. Perkins engine CV12 (power 1120kW)



Rys. 4. Silnik UDV 8x1500 (moc 1120kW)
Fig. 4. Engine UDV8x1500 (power 1120kW)

Z tych względów w silnikach Perkins serii CV12 napędzających czołgi Wielkiej Brytanii obniżono stopień sprężania do możliwej wartości $\varepsilon = 14,5$. Umożliwiło to zwiększenie ciśnienia doładowania, a tym samym wzrost mocy silnika do 1120kW przy objętości gabarytowej silnika $1,1\text{m}^3$, aczkolwiek trzeba było dopracować rozruch silnika (rys. 3). Najniższy stopień sprężania $\varepsilon=7,8$ mają silniki UDV 8x1500 opracowane do napędu do czołgu Leclerc (rys. 4). Przy bardzo wysokim doładowaniu tego silnika uzyskano bardzo duży wskaźnik mocy jednostkowej. Jednak silnik ten wymaga rozbudowanych układów wspomagających rozruch i pracę przy małym obciążeniu co znacznie zwiększa zużycie paliwa.

Bardzo dobre rezultaty uzyskano stosując zmienny stopień sprężania w silniku AVCR-1360, będącym wersją rozwojową silnika czołgowego AVDS-1790. Wysoki stopień sprężania podczas rozruchu silnika ($\varepsilon = 22$) i obniżony podczas pełnego obciążenia ($\varepsilon = 10$) umożliwił wysokie doładowanie i blisko dwukrotny wzrost mocy w porównaniu z silnikiem AVDS-1790. Silnik był przeznaczony do napędu czołgu M1, jednak ostatecznie zastosowano w nim silnik turbinowy.

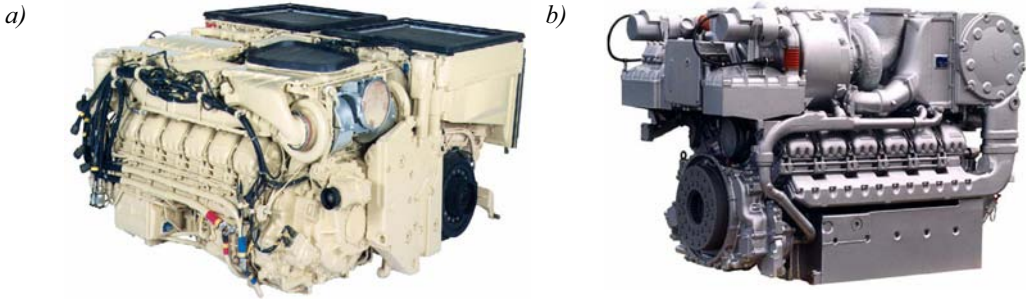
Przykładem silników, które oprócz wysokiego doładowania rozwijają także stosunkowo dużą prędkość obrotową, są silniki MTU serii 880 o maksymalnej prędkości obrotowej $n=3000\text{obr/min}$ (rys. 5a) [7, 10]. Produkowane jako rodzina silników 8V, 10V lub 12V, o średnicy cylindra 144mm i skoku 140mm rozwijają odpowiednio moc 880, 1100 i 1320kW.

Specjalną odmianą tego silnika jest 12-cylindrowy silnik do napędu amfibii AAAV, który rozwija moc 2016kW (2740KM) przy prędkości 3300obr/min (rys. 5b). Uzyskano to dzięki dwustopniowemu sprężaniu powietrza, odpowiedniemu układowi chłodzenia oraz systemowi wtrysku typu Common Rail. Osiągnięto moc właściwą $0,91\text{kW/kg}$, a moc gabarytową 1150kW/m^3 , przy jednostkowym zużyciu paliwa 220g/kWh [9].

Jeszcze większą prędkość obrotową rozwijają najnowsze silniki serii 890, będące czwartą generacją silników czołgowych MTU (rys. 6). Te bardzo nowoczesne silniki tworzą rodzinę silników rzędowych (4L i 5L) oraz widlastych (4V, 6V, 8V, 10V i 12V).

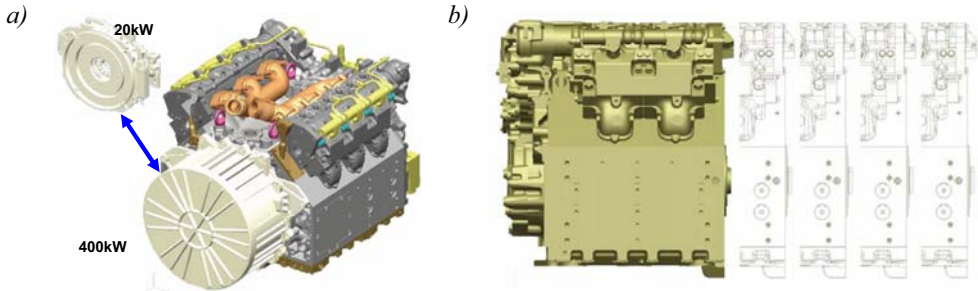
Mają one jednakowy skok tłoka 107mm, natomiast średnica cylindrów w wersji V wynosi 109mm, a w silnikach rzędowych 115mm. Są to silniki z aluminiowym, zintegrowanym, blokiem cylindrów, wysokociśnieniowym układem wtryskowym Common Rail, zwiększoną temperaturą

plynu chłodzącego, turbosprężarka o zmiennej geometrii oraz elektroniczne sterowanie (rys. 7). Rozwijają prędkość obrotową 4250obr/min i mają pojemnościowy wskaźnik mocy 92kW/dm³.



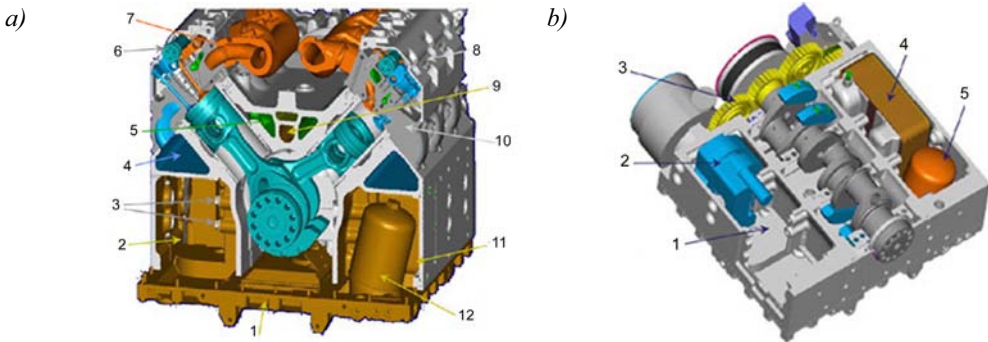
Rys. 5. Silniki serii 880: a – silnik MT883 w zintegrowanym zespole napędowym (moc 1200kW), b – silnik MT883Ka-524EFV do napędu amfibii (mocy 2000kW)

Fig. 5. Series 880 engines: a – engine MT883 with integrated power pack (power 1200kW), b – engine MT883 Ka524 for propulsion amphibious (power 2000 kW)



Rys. 6. Silniki 890: a – silnik 6V z generatorem-rozrusznikiem 400kW (lub 20kW), b – silniki serii 890 V-90

Fig. 6. Engines series 890: a – engine 6V with generator-starter 400kW (or 20kW), b – engines series 890 V-90



Rys. 7. Przekroje silnika 890:

a) układu tłokowo-korbowego: 1 – płyta dolna, 2 – przestrzeń olejowa, 3 – ściagi poprzeczne, 4 – kolektor dolotowy, 5 – kanał chłodzenia, 6 – wałek rozrządu, 7 – kolektor wylotu spalin, 8 – układ rozrządu, 9 – główny kanał olejowy, 10 – głowica, 11 – zbiornik oleju, 12 – filtr oleju, b) układu smarowania: 1 – przestrzeń olejowa, 2- pompa olejowa, 3 – przekładnie, 4 – chłodnica oleju, 5 – filtr oleju

Fig. 7. Cross section of the engine 890:

a) crank - piston system: 1 – lower crankcase, 2 – oil volume, 3 – cross tie bolts, 4 – air intake manifold, 5 – cooling channel, 6 – camshaft, 7 – exhaust line, 8 – camshaft housing, 9 – main oil channel, 10 – cylinder head, 11 – integrated oil volume, 12 – integrated oil filter, b) oil system: 1 – oil volume, 2 – oil pump, 3 – drive train, 4 – oil heat exchanger, 5 – oil filter

Silniki dziesięciocylindrowe serii 890 stanowią podstawowy zespół napędowy nowego bojowego wozu piechoty PUMA (rys. 8). Są to zespoły testowane w dwóch wersjach: o mocy 920kW do elektrycznego układu przeniesienia napędu oraz mocy 800kW do układu mechanicznego. Silniki mają zintegrowany zespół koła zamachowego i rozrusznika o masie całkowitej 150kg i momencie bezwładności $1,1\text{kgm}^2$.

Ciecz chłodząca wypływająca z silnika ma temperaturę 130°C i po schłodzeniu do temperatury 79°C jest kierowana do chłodzenia powietrza za turbosprężarką oraz do chłodnicy oleju.



Rys. 8. Zintegrowany zespół napędowy wozu bojowego PUMA z silnikiem MT-892
Fig.8. Power pack for fighting vehicle PUMA with engine MT-892



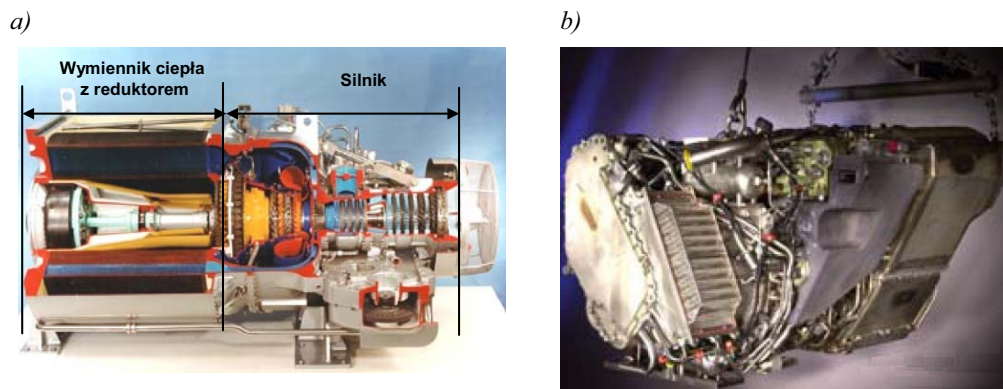
Rys. 9. Silnik z tłokami przeciwbieżnymi 6DT-2
Fig 9. Engine 6DT-2 with opposite pistons

Zwiększenie mocy silnika z tej samej objętości skokowej (i gabarytowej) można uzyskać stosując silniki dwusuwowe. Poprzez zmniejszenie liczby obrotów silnika na obieg pracy silnika, a tym samym wartości mianownika we wzorze (1), można teoretycznie zwiększyć moc silnika dwukrotnie, aczkolwiek w praktyce wzrost ten jest mniejszy na skutek obniżonej sprawności wymiany ładunku. Silniki dwusuwowe konsekwentnie stosują Japończycy w czołgach typu 74 i 80. Silnik L60 o tłokach przeciwbieżnych zastosowano w czołgu Chieftain, aczkolwiek lepszy rezultat uzyskano w silniku ukraińskim 6DT-2, który ma pojemnościowy wskaźnik mocy $67,7\text{kW/dm}^3$ (rys. 9).

Do silników, które rozwijają znaczną moc użyteczną dzięki dużej objętości skokowej należy silnik W46 i jego późniejsze wersje rozwojowe. Przy objętości skokowej $38,8\text{dm}^3$ uzyskano moc 750kW w silniku S-1000. Jednak jego dolny wzrost mocy ograniczony jest małą sztywnością i wytrzymałością dzielonego kadłuba oraz głowicy ze stopów lekkich, połączonych długimi ściągamami.

2.2. Silniki turbinowe

Silniki turbinowe zastosowano do napędu dwóch czołgów: M1 (silnik AGT1500) oraz T80 (silnik GTD1000) [1]. Silniki te mają maksymalny moment obrotowy przy zatrzymanym wirniku turbiny napędowej, co umożliwia uzyskanie dużego przyspieszenia z położenia zatrzymanego. Jednak napęd taki ma kilka wad, a w tym także duże zużycie paliwa w nieustalonych stanach pracy, spowodowane stromą charakterystyką sprawności ogólnej silnika. Konieczność dokładnej filtracji kilkakrotnie większej ilości powietrza w stosunku do silnika tłokowego oraz duża wrażliwość na warunki otoczenia (ciśnienie, temperaturę i wilgotność powietrza) pogarszają ich parametry. Silnik turbinowy jest stosunkowo mały, ale zastosowanie w nim wymiennika ciepła, niezbędnego do zmniejszenia zużycia paliwa oraz dużych filtrów powietrza zwiększa jego objętość gabarytową (rys. 10). W wyniku tego znacznie wzrasta objętość przedziału napędowego pojazdu, a tym samym objętość opancerzona pojazdu.



Rys. 10. Silniki turbinowe: a – AGT 1500, b – LV100-5
 Fig 10. Turbine engines: a – AGT 1500, b – LV110-5

Silnik AGT1500 został opracowany w latach sześćdziesiątych i wykorzystano w nim technologii z tego okresu. Obecnie firmy GE oraz Haneywell opracowały jego nową wersję oznaczonego symbolem LV100-5, który ma być montowany w czołgach M1 (od 2002 roku) oraz haubicach samobieżnych Crusader. Silniki LV100-5 charakteryzują się blisko czterokrotnie większą trwałością i niezawodnością w porównaniu z silnikami AGT1500, mają o 43% mniejszą liczbę części, a zużycie paliwa jest mniejsze o 33%, (na biegu jałowym nawet o 50%). Zasięg czołgu M1 na zbiornikach wynosi około 115km.

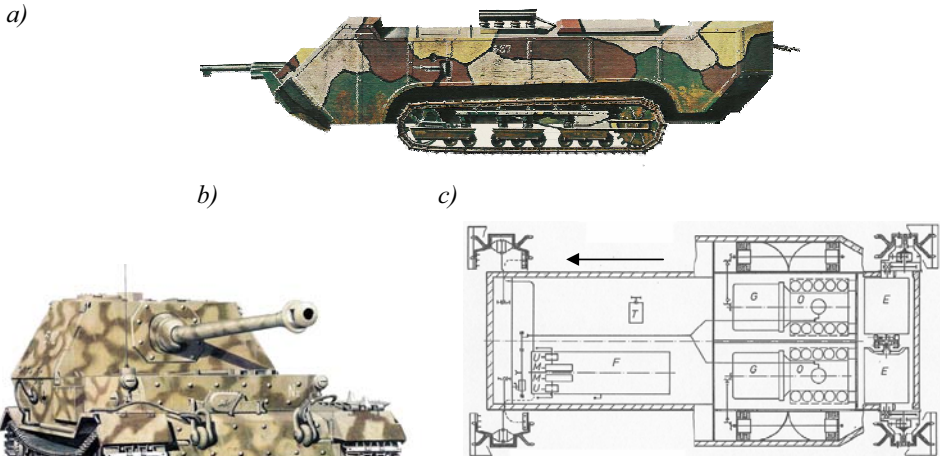
2.3. Silniki elektryczne

Najbardziej perspektywicznymi obecnie silnikami do napędu wozów bojowych przyszłości wydają się silniki elektryczne, które mają szereg istotnych zalet trakcyjnych:

- bardzo duży moment obrotowy przy ruszaniu i małej prędkości obrotowej,
- możliwość krótkotrwałego przeciążenia silnika nawet dwukrotnie,
- możliwość odzyskiwania energii podczas hamowania pojazdu,
- możliwość zasilania elektrycznej sieci pokładowej wozu bojowego oraz innych odbiorników energii elektrycznej, w tym systemów rozpoznawania, łączności i dowodzenia oraz aktywnej ochrony pojazdu z tego samego źródła.

Nad zastosowaniem napędów elektrycznych w pojazdach mechanicznych pracowano już dawno. W czasie I Wojny Światowej wyprodukowano we Francji około 400 czołgów z napędem elektryczno-spalinowym o masie 23 ton i uzbrojonych w działa 75mm (rys. 11a). Były one napędzane silnikiem Panhard o mocy 90KM. Podczas II Wojny Światowej, w roku 1942 profesor Porsche opracował 57 tonową wersję Tygrysa z napędem elektryczno-spalinowym wyprodukowaną w ilości 90 sztuk. Zastosowano w nim dwa silniki o zapłonie iskrowym Maybach HL120 o mocy 300KM każdy (rys. 11b). Pojazd miał długolufową armatę 88 mm. Pojazdy te były dość zawodne, co spowodowało ich ograniczone zastosowanie.

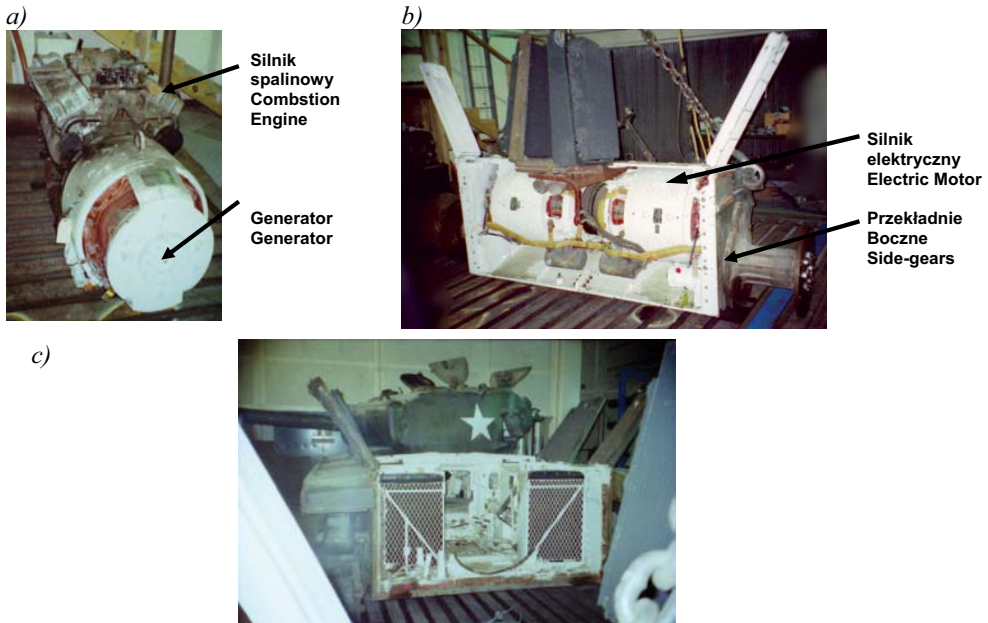
Napęd elektryczno-spalinowy opracowano także dla czołgów amerykańskich. W roku 1940 opracowano prototyp czołgu amerykańskiego T-26 z napędem elektryczno-spalinowym składającym się z jednego silnika o zapłonie iskrowym w układzie V-8, z generatorem prądu i dwóch silników elektrycznych, napędzających poszczególne gaśienice (rys. 12).



G – generator, O – silnik o zapłonie iskrowym, E – silniki elektryczne, F – nastawnik jazdy, T – napęd wieży
 G – generator, O – spark combustion engine, E – electrical engines, F – drive control system, T – turret propulsion

Rys. 11. Czołgi z napędem elektryczno – spalinywym: a – czołg francuski z I Wojny Światowej, b – czołg niemiecki Tygrys, c – zespół napędowy czołgu Tygrys

Fig. 11. Tanks with electro-combustion propulsion systems: a – French tank from First World War, b – German's tank Tiger, c – propulsion system for tank Tiger



Rys. 12. Elektryczno – spalinywym napęd czołgu amerykańskiego: a – silnik spalinowy z generatorem prądu, b – elektryczne silniki napędowe z przekładniami bocznymi, c – przedział napędowy czołgu

Fig. 12. Electro-combustion propulsion system for American tank: a – combustion engines with generator, b – electrical motors with one side gears, c – propulsion system room

We współczesnych układach napędowych wozów bojowych silniki elektryczne są wykorzystywane zarówno do przyspieszania, utrzymania zadawanej prędkości jazdy oraz do hamowania pojazdu. Ich duża sprawność i duży moment obrotowy już przy małej prędkości obrotowej są liczącymi się zaletami. W celu zwiększenia sprawności silników oraz zmniejszenia natężenia prądu elektrycznego, a tym samym przekrojów przewodów elektrycznych, stosuje się zwiększone napięcie w takich układach.

Do napędu pojazdów stosowane są dwa podstawowe rodzaje silników elektrycznych - silniki prądu przemiennego i stałego. W silnikach indukcyjnych prądu przemiennego (AC) prąd elektryczny jest wykorzystywany do wytworzenia zmiennego pola magnetycznego, które powoduje obrót wirnika.

W obecnie stosowanych pojazdach są stosowane głównie silniki prądu stałego (DC) z magnesami trwałymi. Ten typ silnika ma generalnie trójfazowe uzwojenie stojana i moduł przełączający sekwencyjnie przepływa prądu elektrycznego do każdego uzwojenia. Do synchronizacji stałego pola magnetycznego wirnika i zmiennego pola magnetycznego stojana, konieczny jest układ mierzący bieżące położenie wirnika i odpowiednio sterujący przepływem prądu elektrycznego z przetwornika mocy do poszczególnych uzwojeń silnika. Silniki te mogą pracować także jako generatory prądu podczas hamowania pojazdu.

Jakkolwiek rozwiązania silników na prąd zmienny są bardziej proste i dużo tańsze niż silników na prąd stały to silniki bezkomutatorowe prądu stałego (Brushless DC – BLDC) z magnesami trwałymi są bardziej efektywne, zwarte oraz dużo lżejsze. Są to jednak silniki znacznie droższe, co wynika z ceny magnesów trwałych i konieczności ich dodatkowego chłodzenia.

Najbardziej efektywne materiały do produkcji tych magnesów pochodzą z pierwiastków ziem rzadkich. Pierwszy rodzaj magnesów trwałych nowej generacji, samarowo-kobaltowych (SmCo5) został opracowany w latach 60-tych i od lat 70-tych jest produkowany seryjnie. Jego właściwości magnetyczne maleją ze wzrostem temperatury, a maksymalna temperatura pracy wynosi 250-300oC.

Magnesy neodymowe (neodymowo – żelazowo – borowe NdFeB) stanowią drugą generację magnesów o dużo lepszych właściwościach magnetycznych niż samarowo-kobaltowe, ale właściwości te mają w temperaturze pokojowej. Przebieg ich linii demagnetyzacji wskazuje na szybkie obniżanie właściwości magnetycznych w funkcji wzrostu temperatury. Dopuszczalna temperatura pracy wynosząca początkowo 150oC została ostatnio znacznie podwyższona, a także została znacznie zwiększona odporność tego materiału na korozję.

Zależność właściwości magnetycznych tych materiałów od temperatury powoduje konieczność stosowania specjalnych układów chłodzenia, aby ich właściwości magnetyczne były utrzymane na wysokim poziomie co komplikuje ich zastosowanie. Zależność parametrów silnika Magnet Motor MM typu M59 od rodzaju chłodzenia przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Porównanie parametrów silnika M59 przy chłodzeniu wodą i olejem

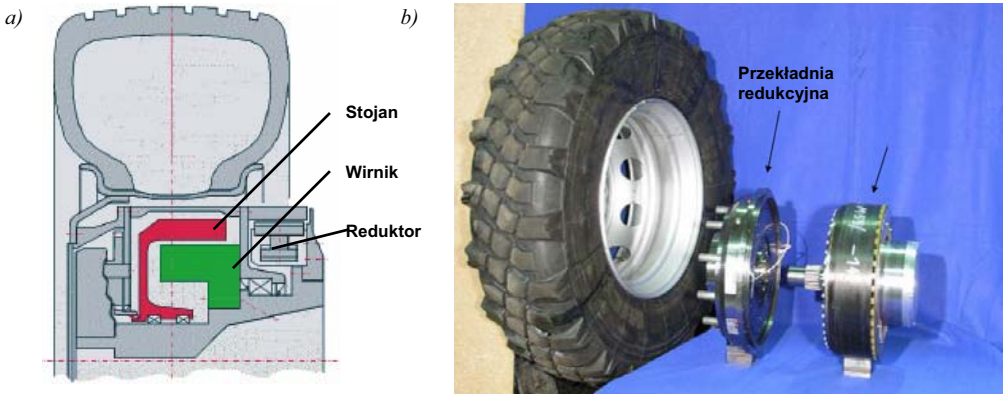
Tab. 1. Comparison of engine M59 parameters by water and oil cooling

Lp.	Parametr	Czynnik chłodzący	
		woda	olej
1	Maksymalny moment obrotowy:		
	– chwilowy, Nm,	1700	1330
	– ciągły, Nm,	1000	1050
2	Moc silnika	890	752
3	Maksymalna prędkość obrotowa, obr/min	5400	5400
4	Szerokość, mm	156	144
5	Średnica, mm	450	430

Jednak bardzo dobre parametry porównawcze tych silników, które na przykładzie silnika M57 firm MM wynoszą:

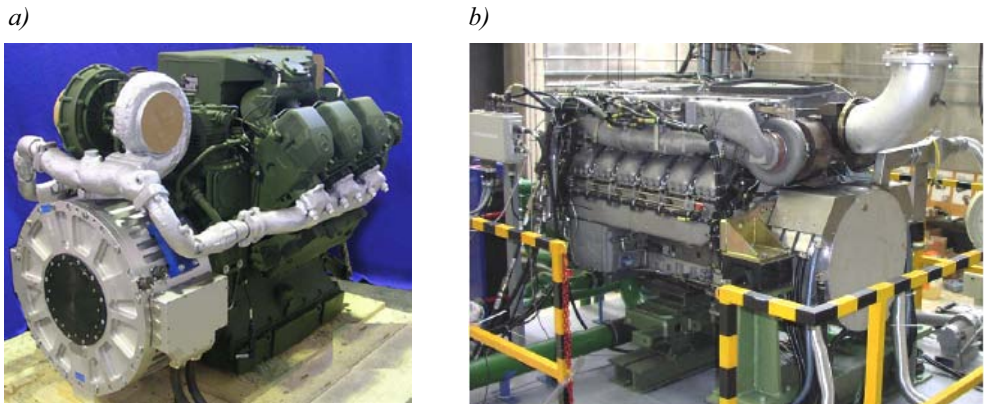
- moment jednostkowy: 16,6Nm/kg i
- moment objętościowy: 50,3Nm/dm³

powodują, że silniki z magnesami trwałymi są powszechnie stosowane w obecnie opracowywanych lub badanych demonstratorach technologii hybrydowej (rys. 13) [3]. Są to głównie rozwiązania z silnikami umieszczonymi w kołach pojazdów, aczkolwiek stosuje się również pojedyncze silniki elektryczne z klasycznym układem przeniesienia napędu za pomocą wałów napędowych. Zmniejsza to masę nieresorowaną pojazdu i jej oddziaływanie na nawozie.



Rys. 13. Koło firmy MM: a – przekrój, b – zespoły koła z silnikiem M-59
 Fig. 13. The MM Wheel: a – cross section, b – main parts of the wheel with M-59 motor

Znaczny postęp w technologii napędów elektrycznych, w tym opracowanie bardzo wydajnych magnesów trwałych, spowodował zmniejszenie wymiarów i masy silników elektrycznych oraz generatorów prądu przy porównywalnej ich mocy. Zmiany te są szczególnie dobrze widoczne jeżeli porówna się generatory z magnesami trwałymi, zblokowane z silnikami spalinowymi o porównywalnej mocy (rys. 14). Gabaryty tych generatorów jest blisko kilkakrotnie mniejsza od objętości generatora podczas gdy dawniej objętość ta była porównywalna z objętością silnika (por. rys. 11c).

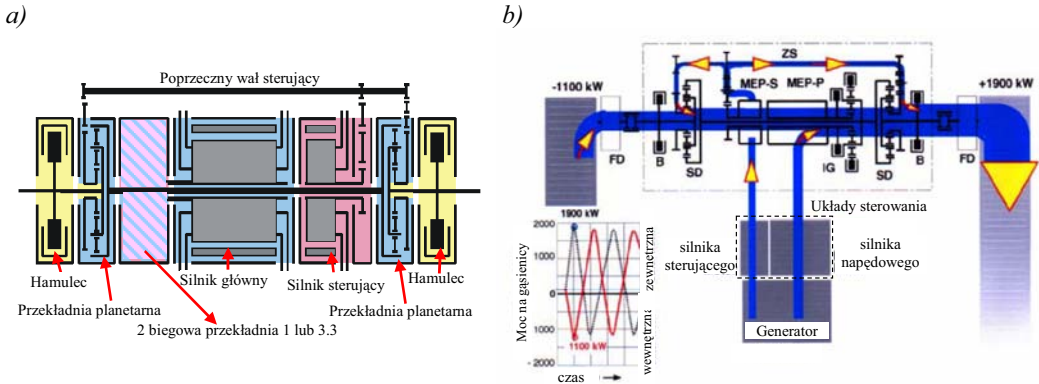


Rys. 14. Generatory z magnesami trwałymi: a – z silnikiem MTU6V199, b – z silnikiem MT883
 Fig. 14. Permanent magnet generators: a – with the engine MTU6V199, b – with the engine MT883

Do zalet silników i generatorów z magnesami trwałymi można zaliczyć:

- maksymalny moment i moc szczytowa jest większa 4-10 razy w porównaniu z parametrami silników konwencjonalnych,
- łatwość zamontowania silników w pojazdach dzięki ich małym wymiarom,
- duża sprawność w różnych warunkach pracy,
- bezobsługowa eksploatacja,
- łatwe sterowanie.

W pojazdach gašienicowych silniki elektryczne mogą być stosowane w dwóch konfiguracjach układów napędowych: z dwoma silnikami, z których każdy napędza jedną gašienicę pojazdu lub z jednym silnikiem głównym i drugim silnikiem sterującym (rys. 15a).



Rys. 15. Zespół napędowy RENK EMT 100: a – schemat, b – działanie podczas skrętu
 Fig 15. Electromechanical propulsion system RENK EMT 100: a – scheme, b – operation during turning

Elektromagnetyczny zespół napędowy RENK EMT100 opracowany do czołgu 60t charakteryzuje się dużą zwartością oraz bardzo korzystnym przebiegiem momentu obrotowego przy tylko dwóch przełożeniach w układzie przeniesienia napędu (rys. 15a). Możliwość odzyskania energii podczas hamowania pojazdu jedną gašienicą i skierowania jej na drugą gašienicę (zabiegająca) pozwala na zwiększenie mocy do 1900kW przy znamionowej mocy generatora 1100kW (rys. 15b).

Stosowane obecnie bezkomutatorowe silniki elektryczne prądu stałego z magnesami trwałymi są nadal bezkonkurencyjne pod względem jednostkowego momentu obrotowego i gabarytów. Jednak są wrażliwe na temperaturę, a także stosunkowo drogie, dlatego nie można wykluczyć w przyszłości rozwoju silników indukcyjnych, które zastąpią silniki prądu stałego.

3. Podsumowanie

1. Podstawowymi silnikami do napędu wozów bojowych są nadal silniki o zapłonie samoczynnym. Są coraz bardziej zaawansowane technologicznie, a możliwość tworzenia całych rodzin silników z segmentów dopracowanego „pojedynczego cylindra” umożliwia znacznie obniżenie kosztów produkcji. Silniki te są wyposażone w wysokociśnieniowe układy wtryskowe, ułatwiające optymalne sterowanie spalaniem oraz znaczne zwiększenie mocy i prędkości obrotowej silników. Na umiarkowaną cenę wpływają również powszechnie dostępne materiały konstrukcyjne do ich produkcji.
2. Trudno liczyć na szeroki powrót silników turbinowych do bezpośredniego napędu wozów bojowych. Aczkolwiek opracowano nowoczesny silnik turbinowy LV 100 do napędu czołgów,

który zastąpiłby dotychczas stosowany silnik ADT 1500 czołgu M1, jednak jego wdrożenie się opóźnia.

3. Trwające obecnie intensywne prace nad nowymi wozami bojowymi w ramach ogólnego kierunku „All Electric Combat Vehicle” wskazują na szybki wzrost liczby silników elektrycznych zastosowanych do napędu tych pojazdów w przyszłości. Mają one bardzo korzystny przebieg momentu w funkcji prędkości obrotowej silnika, co zapewnia duże przyspieszenie pojazdów, a możliwość akumulacji i odzysku energii powoduje zmniejszenie zużycia paliwa przez pojazdy z takimi układami. Jednak jako podstawowe źródło prądu elektrycznego będą stosowane przez długi czas silniki spalinowe, które w przyszłości mogłyby być zastąpione przez inne źródła energii – przede wszystkim przez ogniwa paliwowe.

Literatura

- [1] Armoured *Fighting Vehicle Engines and Powerpack*, Jane’s “Armour and Artillery” 1985/86.
- [2] Bollmann, S., *Technology of Modern Transmission Systems*, Sympozjum nt. „Nowoczesne systemy napędowe MTU/ZF do pojazdów kołowych i gąsienicowych”, WAT, Warszawa 1998.
- [3] Ehrhart, P., *Permanent Magnetic Motors for Vehicle Hybrids*, International Symposium „Hybrid Technology for Military Tracked Vehicles” Augsburg, 2006.
- [4] German, J.M., *Hybrid Powered Vehicles*, SAE International (T-119), Warrendale, PA, 2003.
- [5] Hanselman, D., *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, The Writers’ Collective, Cranston, Rhode Island, 2003.
- [6] Hilmes, R., *Aspects of Future MBT Conception*, Military Technology, Vol XXIII, 6/1999.
- [7] Kiefer, G., *Features of MTU Tank Engines*, Sympozjum nt. „Nowoczesne systemy napędowe MTU/ZF do pojazdów kołowych i gąsienicowych” WAT, Warszawa 1998.
- [8] Kiefer, G., *Future trend of Tank Propulsion systems*, Sympozjum nt. „Nowoczesne systemy napędowe MTU/ZF do pojazdów kołowych i gąsienicowych”, WAT, Warszawa 1998.
- [9] Kiefer, G., *HPD Engines for Hybrid Electrical Drives*, Int. Symposium in “Hybrid Technologies for Military Tracked Vehicles” Augsburg 2006.
- [10] Müller, K., *MTU Tank Diesel Engines and their Traditional Applications*, Sympozjum nt. „Nowoczesne systemy napędowe MTU/ZF do pojazdów kołowych i gąsienicowych”, WAT, Warszawa 1998.
- [11] Ogorkiewicz, R. M., *Electric Drive GD’s Novel EVTB*, International Defence Review, 10/1990.