

Robert SOSNOWICZ*
Przemysław WACHOWIAK
Maciej DORCZUK

KONCEPCJA ELEKTROMECHANICZNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO DO POJAZDU GĄSIENICOWEGO MT-LB

Praca przedstawia analizę możliwości wykorzystania elektromechanicznego układu napędowego do pojazdu gąsienicowego MT-LB.

Słowa kluczowe: układ napędowy, napęd elektromechaniczny, pojazdy gąsienicowe, MT-LB

WSTĘP

Eksploatowane w Siłach Zbrojnych RP szybkobieżne pojazdy gąsienicowe napędzane są tłokowymi silnikami spalinowymi o zapłonie samoczynnym. Silniki te rozwijają dużą moc przy małych objętościach gabarytowych oraz małej masie. Moment obrotowy z wału korbowego silnika jest przekazywany na koła napędowe gąsienicowego układu bieżnego poprzez układ napędowy. W pojazdach konstrukcji rosyjskiej są to mechaniczne układy napędowe, a w pojazdach konstrukcji zachodniej hydromechaniczne. Zalety hydromechanicznych układów napędowych sprawiły, że takie układy są obecnie standardem niemal na całym świecie.

Obecnie bardzo intensywnie prowadzone są prace nad całkowitą elektryfikacją pojazdów gąsienicowych. Potrzeba rozwijania tego kierunku została podkreślona w raporcie NATO „Land Operation in the Year 2020”. Całkowita elektryfikacja pojazdów obejmuje: elektromechaniczne układy napędowe, elektryczne układy naprowadzania uzbrojenia, działo elektromagnetyczne i układy aktywnej ochrony wnętrza pojazdu.

Biorąc powyższe pod uwagę, celowa jest analiza możliwości wykorzystania elektromechanicznych układów napędowych, na przykładzie eksploatowanych w SZ RP pojazdów gąsienicowych MT-LB.

* dr inż. Robert SOSNOWICZ, mgr inż. Przemysław WACHOWIAK, mgr inż. Maciej DORCZUK - Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej

1. WYBÓR ELEKTROMECHANICZNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

Obecne ograniczenia techniczne w magazynowaniu odpowiednio dużej ilości energii elektrycznej w urządzeniach (np. akumulatorach, kondensatorach) o stosunkowo małej objętości i masie powodują, że pojazdy z elektromechanicznymi układami napędowymi nie posiadają odpowiedniej autonomii. Jej brak związany jest głównie z takimi osiąganiami pojazdu, jak zasięg i zdolność do przyspieszeń. W rezultacie dobrym i być może wcale nie przejściowym rozwiązaniem jest elektromechaniczny układ napędowy, którego źródło zasilania stanowi generator napędzany silnikiem spalinowym.

Do napędu wojskowego szybkobieżnego pojazdu gaśnicowego MT-LB wybrano elektromechaniczny układ napędowy ze względu na:

- prowadzenie prac nad całkowitą elektryfikacją pojazdów, określonych w raporcie NATO „Land Operation in the Year 2020”;
- masę pojazdu wynoszącą około 10 000 kg;
- ograniczoną objętość kadłuba do zabudowy silnika i układu napędowego;
- wymagany minimalny i maksymalny zakres prędkości pojazdu;
- możliwość równomiernego rozłożenia zespołów w pojeździe, co jest bardzo istotne podczas jego pływania;
- możliwość wyeliminowania w przyszłości silnika spalinowego i generatora, w wyniku ewentualnego opanowania technologii magazynowania odpowiednio dużej ilości energii elektrycznej w urządzeniach (np. akumulatorach, super kondensatorach,) lub jej wytwarzania (np. ogniwa paliwowe, w których w wyniku reakcji wodoru z tlenem powstaje prąd elektryczny);
- mniejszą liczbę podzespołów układu napędowego w pojeździe w porównaniu do hybrydy równoległej;
- dużą masę akumulatorów (około 1 700 kg) i znaczną ich objętość (ponad 1 m³) w przypadku zastosowania hybrydy szeregowej z elektromechanicznym układem napędowym.

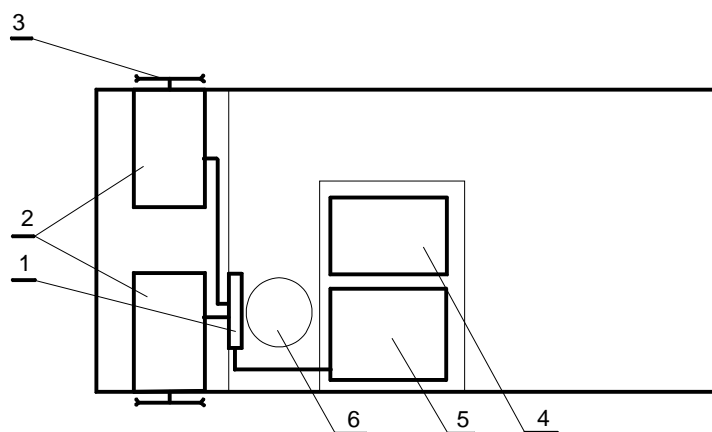
2. PROJEKT KONCEPCYJNY ELEKTROMECHANICZNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO DO POJAZDU GAŚNICOWEGO MT-LB

Przystępując do opracowania projektu koncepcyjnego elektromechanicznego układu napędowego do pojazdu gaśnicowego MT-LB, przyjęto założenia, że:

- właściwości dynamiczne pojazdu z elektromechanicznym układem napędowym powinny być co najmniej takie same, jak w pojeździe z dotychczasowym silnikiem napędowym JAMZ–238W oraz mechanicznym układem napędowym;
- wykorzystane zostaną istniejące na rynku silniki elektryczne przeznaczone do napędu różnych pojazdów, np. trolejbusów, tramwajów, autobusów szynowych;
- do napędu generatora zostanie wykorzystany dostępny na rynku silnik spalinowy.

Podczas opracowywania koncepcji elektromechanicznego układu napędowego do pojazdu gaśnicowego MT-LB, rozważano kilka wariantów zabudowy pojazdu, które pokazano poniżej.

Pierwszy wariant pojazdu z elektromechanicznym układem napędowym przewidywał zastosowanie dwóch napędowych silników elektrycznych (lewego i prawego) i zamocowanie bezpośrednio na wałach wyjściowych tych silników kół napędowych. Wariant ten poglądowo pokazano na rysunku 1.

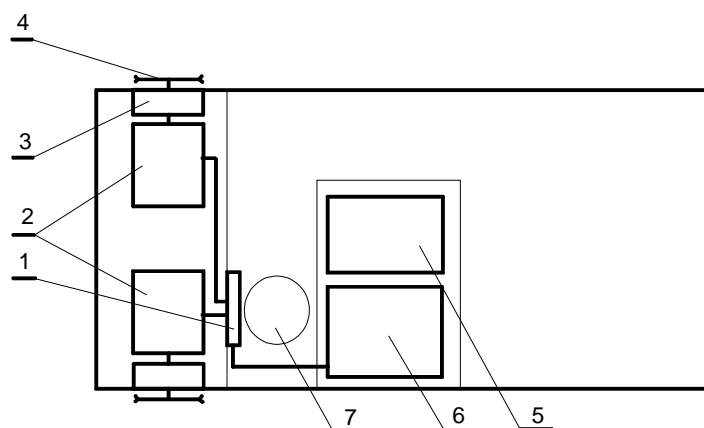


Rys. 1. Schemat elektromechanicznego układu napędowego pojazdu gaśnicowego MT-LB z dwoma silnikami elektrycznymi: 1 – układ sterowania; 2 – napędowe silniki elektryczne; 3 – koło napędowe; 4 – silnik spalinowy; 5 – generator; 6 – przedział kierowania

Źródło: Opracowanie własne

Przedstawione na rysunku 1 rozwiązanie konstrukcyjne elektromechanicznego układu napędowego, zmniejsza do niezbędnego minimum liczbę zastosowanych zespołów, co może pozwolić na obniżenia masy całego układu napędowego. Takie rozwiązanie konstrukcyjne układu napędowego wymusza konieczność spełnienia przez silniki elektryczne dwóch funkcji: napędowej pojazdu i mechanizmu skrętu. Pierwsza funkcja wymaga silników elektrycznych o odpowiedniej charakterystyce momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej, a druga funkcja - precyzyjnego sterowania ich prędkością obrotową w celu zapewnienia wymaganych promieni skrętu pojazdu przy zmiennych prędkościach obrotowych i oporach skrętu pojazdu.

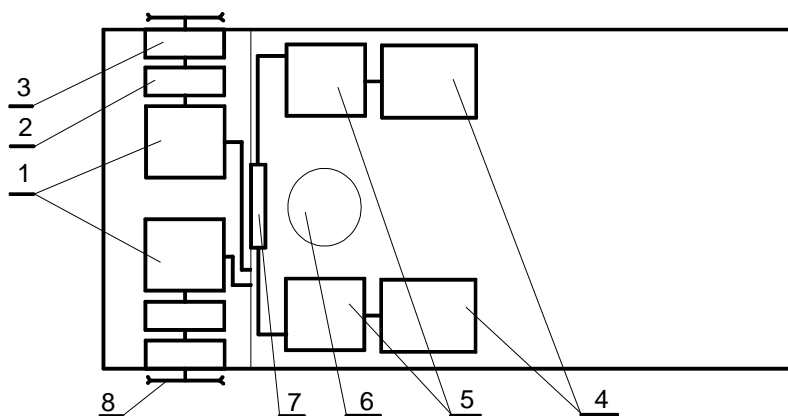
Drugi wariant elektromechanicznego układu napędowego przewidywał zastosowanie dwóch napędowych silników elektrycznych (lewego i prawego) i wykorzystanie już istniejących w pojeździe gaśnicowym MT-LB dwóch przekładni bocznych i układu hamulcowego (rys. 2). Takie rozwiązanie umożliwia wykorzystanie napędowych silników elektrycznych o mniejszej mocy, ale większej prędkości obrotowej. Pozostaje jednak problem precyzyjnego sterowania prędkością obrotową wałów napędowych silników elektrycznych przy zmiennych oporach skrętu, w celu zapewnienia wymaganych promieni skrętu.



Rys. 2. Schemat układu napędowego pojazdu gaśnicowego MT-LB z dwoma silnikami elektrycznymi: 1 – układ sterowania; 2 – silniki elektryczne; 3 – przekładnia boczna; 4 – koło napędowe; 5 – silnik spalinowy; 6 – generator; 7 – przedział kierowania

Źródło: Opracowanie własne

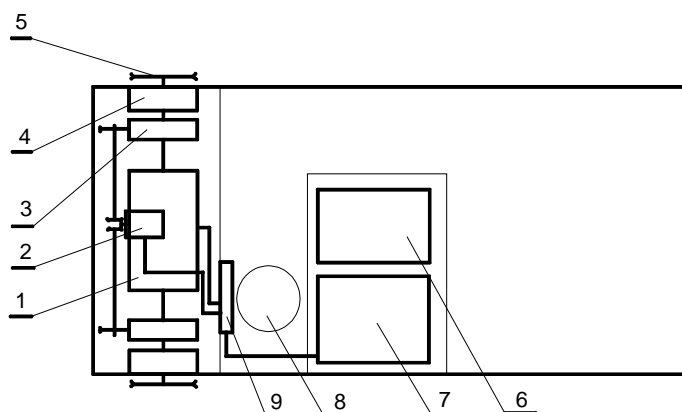
Trzeci wariant elektromechanicznego układu napędowego przewidywał zastosowanie dwóch napędowych silników elektrycznych (lewego i prawego), dwóch przekładni stopniowych za silnikami elektrycznymi i wykorzystanie już istniejących w pojeździe gaśnicowym MT-LB dwóch przekładni bocznych i układu hamulcowego (rys. 3). Takie rozwiązanie umożliwi wykorzystanie napędowych silników elektrycznych o mniejszej mocy i prędkości obrotowej. Pozostaje jednak problem precyzyjnego sterowania prędkością obrotową wałów napędowych silników elektrycznych przy zmiennych oporach skrętu, w celu zapewnienia wymaganych promieni skrętu.



Rys. 3. Schemat projektu koncepcyjnego układu hybrydowego napędu pojazdu gaśnicowego MT-LB: 1 – silniki elektryczne; 2 – przekładnia stopniowa; 3 – przekładnia boczna; 4 – silnik spalinowy; 5 – generator; 6 – przedział kierowania; 7 – układ sterowania; 8 – koło napędowe

Źródło: Opracowanie własne

Czwarty wariant elektromechanicznego układu napędowego przewidywał zastosowanie jednego napędowego silnika elektrycznego, dwóch planetarnych rzędów sumujących i jednego elektrycznego silnika skrętu (rys. 4). Przedstawione rozwiązanie konstrukcyjne układu napędowego rozdziela funkcje napędu pojazdu i mechanizmu skrętu na dwa niezależne silniki elektryczne. Silnik elektryczny napędu powoduje ruch prostoliniowy pojazdu, a silnik elektryczny skrętu wraz z planetarnymi rzędami sumującymi umożliwia osiągnięcie wymaganych wartości promieni skrętu pojazdu.



Rys. 4. Schemat układu napędowego pojazdu gaśnicowego MT-LB z jednym silnikiem elektrycznym: 1 – silnik elektryczny napędowy; 2 – silnik elektryczny skrętu; 3 – planetarny rząd sumujący; 4 – przekładnia boczna; 5 – koło napędowe; 6 – silnik spalinowy; 7 – generator; 8 – przedział kierowania; 9 – układ sterowania

Źródło: Opracowanie własne

Zgodnie z drugim przyjętym założeniem, co do elektromechanicznego układu napędowego pojazdu gaśnicowego MT-LB, przewidziano zastosowanie istniejących na rynku silników elektrycznych przeznaczonych do napędu różnych pojazdów np. trolejbusów, tramwajów, autobusów szynowych. Silniki przeznaczone do zastosowań w napędach o regulowanej prędkości obrotowej, np. w pojazdach mechanicznych, powinny cechować się wysoką sprawnością, dużą przeciążalnością, momentem oraz szerokim zakresem regulacji prędkości obrotowej. Wymagania te spełniają silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, zaprojektowane do pracy z dwustrefową regulacją prędkości obrotowej.

Uzyskanie pożądanych parametrów ruchu pojazdu, takich jak np. czas rozpędzenia do określonej prędkości, prędkość maksymalna w określonych warunkach ruchu (dla danego rodzaju podłoża, warunków atmosferycznych, masy pojazdu) wymaga dostarczenia określonych wartości momentu obrotowego do kół napędowych w funkcji ich prędkości obrotowej, niezależnie od zastosowanego układu: przetwarzania energii i napędowego. Zatem zgodnie z przyjętym pierwszym założeniem, elektromechaniczny układ napędowy powinien dostarczać do kół napędowych co najmniej takie same wartości momentu obrotowego w funkcji ich prędkości obrotowej, jak układ mechaniczny. Dlatego punktem wyjścia do doboru silników elektrycznych elektromechanicznego układu napędowego stały się parametry konstrukcyjne zespołów pojazdu gaśnicowego MT-LB, takie jak np. charakterystyka momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika JAMZ–238W, przełożenia układu napędowego i jego sprawność.

Po analizie dostępnej na rynku oferty silników synchronicznych z magnesami trwałymi, zaprojektowanymi do pracy z dwustrefową regulacją prędkości obrotowej okazało się, że nie ma takich silników, które pozwoliłyby zbudować pierwszy, drugi i czwarty wariant elektromechanicznego układu napędowego do pojazdu gąsienicowego MT-LB. Według producentów takie silniki mogłyby być zaprojektowane i wyprodukowane na specjalne zamówienie, co jest sprzeczne z przyjętym założeniem.

Zbudowanie trzeciego wariantu elektromechanicznego układu napędowego do pojazdu gąsienicowego MT-LB umożliwiłyby, ze względu na wymiary gabarytowe, masę i pożądaną charakterystykę momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wału, silniki HPM150 (rys. 5). Zastosowane w silnikach chłodzenie zewnętrzne pozwala zmniejszyć ich wymiary gabarytowe.

Silniki elektryczne HPM150 przeznaczone do napędu pojazdu mogą również pełnić rolę generatora. W tym przypadku silnik spalinowy napędza jeden silnik elektryczny - 5 (rys. 3), który pełni rolę generatora. Generator poprzez układ sterowania zasila energią elektryczną drugi silnik elektryczny - 1, który napędza pojazd. Takie rozwiązanie pozwala zunifikować zespoły elektryczne w pojeździe. Firma UQM posiada również w swojej ofercie układ sterowania DD45-500L silnika elektrycznego HPM150 (rys. 6).



Rys. 5. Widok silnika elektrycznego HPM150 do napędu pojazdów firmy UQM

*Źródło:[online] [dostęp:4.02.2010]. Dostępny w Internecie:
http://www.uqm.com/propulsion_specs.php*

Podstawowe dane techniczne silnika HPM150 i układu sterowania DD45-500L przedstawiono w tabeli 1. Charakterystyką momentu obrotowego i mocy silnika HPM150 w funkcji prędkości obrotowej wału ilustrują rysunki 7 ÷ 9. Dodatkowo na wykresach zaznaczone są linie łączące punkty o jednakowej wartości sprawności silników elektrycznych.



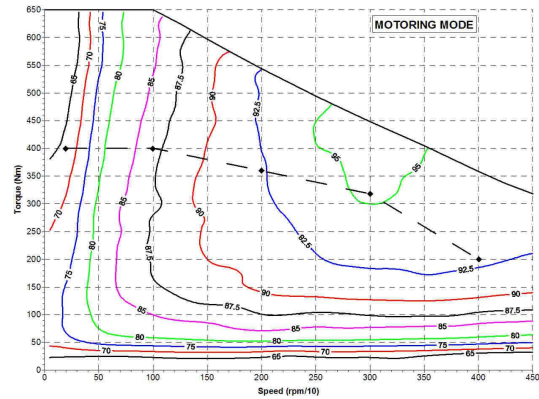
Rys. 6. Układ sterowania DD45-500L silnika elektrycznego HPM150 firmy UQM do napędu pojazdów

Źródło:[online] [dostęp: 4.02.2010]. Dostępny w Internecie:
http://www.uqm.com/propulsion_specs.php

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne silnika HPM150 i układu sterowania DD45-500L

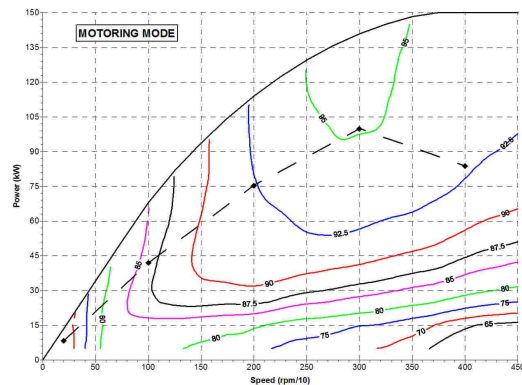
Silnik elektryczny/generator HPM150	
Gabaryty	
Długość	241 mm
Średnica	405 mm
Waga	91 kg
Osiągi	
Moc silnika	150 kW
Moment obrotowy silnika	650 Nm
Moc odzyskiwana	150 kW
Moment obrotowy odzyskiwany	650 Nm
Maksymalna prędkość obrotowa	5000 obr/min
Masowy wskaźnik mocy	1,65 kW/kg
Falownik/kontroler DD45-500L	
Gabaryty	
Długość	380 mm
Szerokość	365 mm
Wysokość	119 mm
Waga	91 kg
Parametry wejściowe	
Nominalne napięcie wejściowe	320 – 376 V (DC)
Napięcie pracy	300 – 420 V (DC)
Minimalne napięcie	180 V (DC)
Maksymalny pobierany prąd	550 A
Pobierana moc w stanie czuwania	17 W
System chłodzenia cieczą	
Minimalny przepływ cieczy chłodzącej	8 l/min
Temperatura załączania chłodzenia	55 °C
Średnica przewodu doprowadzającego czynnik chłodzący	16 mm
Maksymalne ciśnienie w układzie chłodzenia	0,7 bar
Cyfrowy przetwornik sygnału TI2812	
Napięcie nominalne	12 V (DC)
Wejściowe napięcie zasilacza (zakres)	8 – 15 V (DC)
Pobór prądu zasilacza (zakres)	0,3 – 0,5 A

Źródło: Opracowanie własne



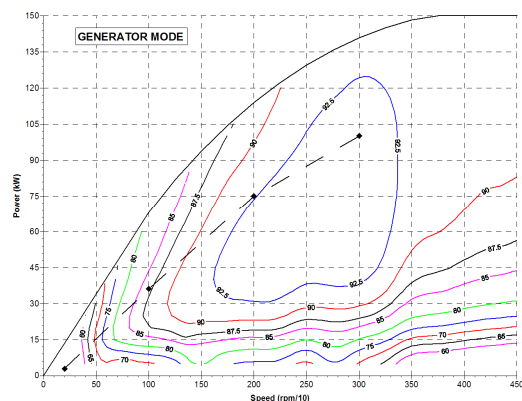
Rys. 7. Charakterystyka momentu obrotowego silnika HPM150 w funkcji prędkości obrotowej wału silnika

Źródło:[online] [dostęp: 04.02.2010]. Dostępny w Internecie:
http://www.uqm.com/propulsion_specs.php



Rys. 8. Charakterystyka mocy silnika HPM150 w funkcji prędkości obrotowej wału silnika

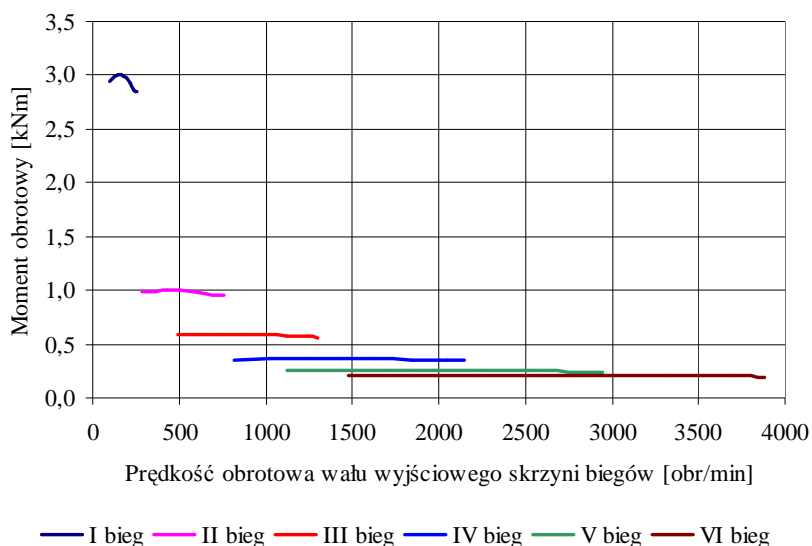
Źródło:[online] [dostęp: 4.02.2010]. Dostępny w Internecie:
http://www.uqm.com/propulsion_specs.php



Rys. 9. Charakterystyka mocy silnika HPM150 w funkcji prędkości obrotowej wału silnika (w trybie pracy jako generator)

Źródło:[online] [dostęp: 04.02.2010]. Dostępny w Internecie:
http://www.uqm.com/propulsion_specs.php

Trzeci wariant elektromechanicznego układu napędowego do pojazdu gąsienicowego MT-LB (rys. 3), przewiduje pozostawienie oryginalnych przekładni bocznych wraz z układem hamulcowym oraz zastosowanie za dwoma silnikami elektrycznymi HPM150, dwóch nowo zaprojektowanych, przekładni stopniowych. Ponieważ w pojeździe gąsienicowym MT-LB (z mechanicznym układem napędowym) podczas ruchu prostoliniowego moment obrotowy na wyjściu układu napędowego rozkłada się na lewe i prawe koło napędowe, to wartości momentu obrotowego na wyjściu jednej strony skrzyni biegów w funkcji prędkości wału wyjściowego przyjmują wartości przedstawione na rysunku 10. Z porównania charakterystyki momentu obrotowego na wyjściu jednej strony skrzyni biegów w funkcji prędkości obrotowej wału wyjściowego (rys. 10) i charakterystyki silnika HPM150 (rys. 7) wynika, że silnik HPM150 nie posiada wymaganej wartości momentu obrotowego. Dlatego zaproponowane przez autorów artykułu rozwiązanie konstrukcyjne elektromechanicznego układu napędowego przewiduje zastosowanie za silnikami elektrycznymi dodatkowych przekładni stopniowych w celu uzyskania wymaganych charakterystyk momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wału.



Rys. 10. Charakterystyka momentu obrotowego na wyjściu jednej strony skrzyni biegów w funkcji prędkości obrotowej wału wyjściowego

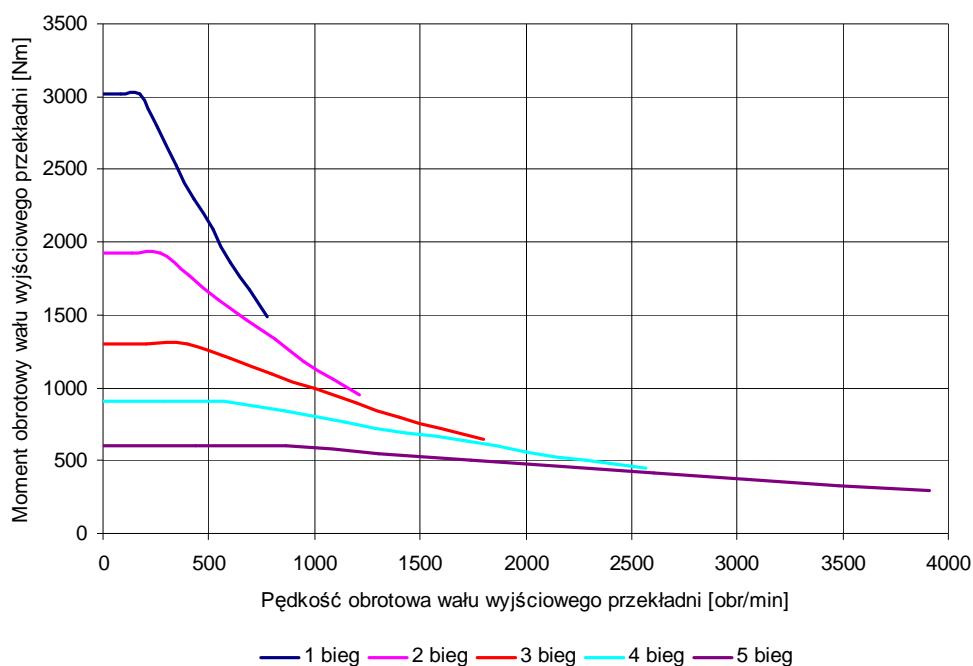
Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń przyjęto przełożenia przedstawione w tabeli 2 oraz sporządzono charakterystykę momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wału wyjściowego przekładni pięciostopniowej (rys. 11). W obliczeniach uwzględniono sprawność przekładni wynoszącą 0,8.

Tabela 2. Przełożenia przekładni 5 stopniowej

Bieg	Przełożenie przekładni
1	5,8
2	3,7
3	2,5
4	1,5
5	1,15

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 11. Charakterystyka momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wału wyjściowego przekładni pięciostopniowej

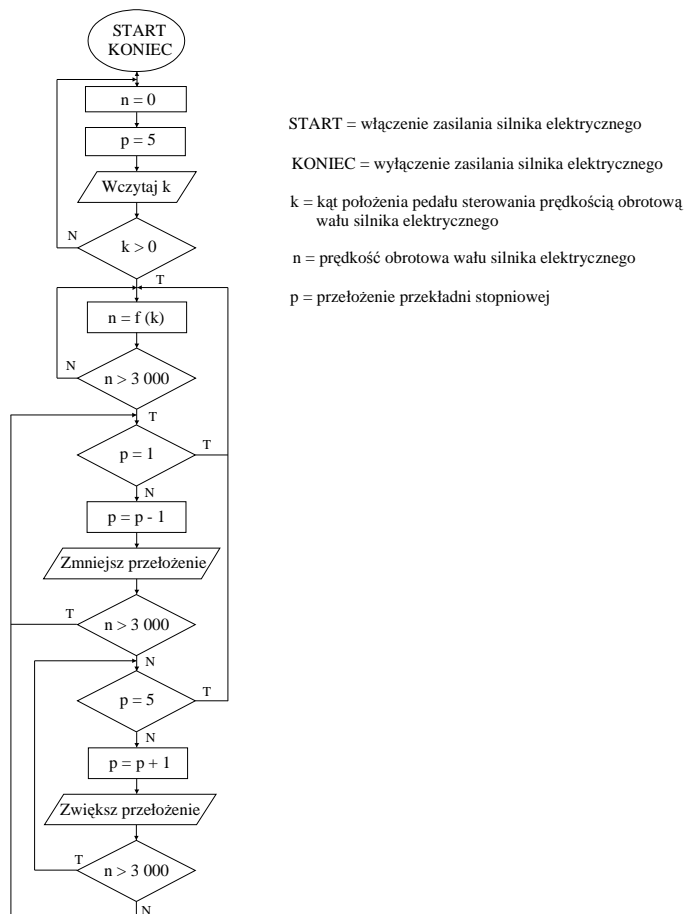
Źródło: Opracowanie własne

Z porównania wymaganej charakterystyki silników elektrycznych (rys. 10) i charakterystyki momentu obrotowego wału wyjściowego przekładni pięciostopniowej (rys. 11) wynika, że silniki elektryczne HPM150 i przekładnie pięciostopniowe zapewniłyby uzyskanie przez pojazd gąsienicowy MT-LB wymaganych prędkości ruchu i właściwości dynamicznych. Bieg pierwszy przekładni pięciostopniowej zapewnia użytkowanie pojazdu w szczególnych sytuacjach, np. pokonywanie wzniesień, trudnego terenu. Bieg drugi zapewnia o około 90% większy moment obrotowy w stosunku do drugiego biegu mechanicznego układu napędowego, co powinno znacznie poprawić właściwości dynamiczne pojazdu podczas ruszania. Bieg drugi służy do ruszania pojazdu w warunkach normalnych. Bieg trzeci i czwarty przekładni pięciostopniowej zapewnia większe wartości momentu obrotowego od wymaganego. Bieg piąty przekładni zapewnia uzyskanie wartości momentu obrotowego o około 5% większego od wymaganego.

W opracowanej koncepcji elektromechanicznego układu napędowego, do napędu generatorów HPM150, należy zastosować dwa silniki spalinowe, każdy o mocy co najmniej 160 kW. Z dostępnej na rynku oferty handlowej wybrano silnik spalinowy IVECO tector F4A E3681B*R o mocy 160 kW (217 KM). Tector F4A E3681B*R jest silnikiem z zapłonem samoczynnym, 6 cylindrowym, rzędowym.

Zaletą opracowanej koncepcji elektromechanicznego układu napędowego jest również to, że podczas wykonywania pojazdem manewrów niewymagających dużych wartości momentu obrotowego na kole napędowym może pracować tylko jeden silnik spalinowy i generator.

W celu uzyskania jak największej sprawności całego napędu hybrydowego wskazane byłoby zastosowanie automatycznego (bez udziału kierowcy) sterowania przekładnią pięciostopniową. Opracowany algorytm automatycznego sterowania przełożeniami przekładni pięciostopniowej przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Algorytm automatycznego sterowania przekładnią pięciostopniową

Źródło: Opracowanie własne

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy możliwości wykorzystania elektromechanicznego układu napędowego do pojazdu gąsienicowego MT-LB, można stwierdzić, że:

1. Obecne ograniczenia techniczne w magazynowaniu odpowiednio dużej ilości energii elektrycznej w urządzeniach (np. akumulatorach, kondensatorach) o stosunkowo małej objętości i masie powodują, że pojazdy z elektromechanicznymi układami napędowymi nie posiadają odpowiedniej autonomii.
2. Brak wymaganej autonomii związany jest głównie z takimi osiąganiami pojazdu, jak zasięg i zdolność do przyspieszeń. W rezultacie dobrym i wcale nie wiadomo, czy przejściowym rozwiązaniem jest elektromechaniczny układ napędowy, którego źródłem zasilania jest generator napędzany silnikiem spalinowym.

3. Zastosowanie istniejącego na rynku silnika HPM150 z magnesami trwałymi i chłodzeniem zewnętrznym, do napędu pojazdu gąsienicowego MT-LB, wymaga użycia dodatkowych przekładni za silnikami elektrycznymi (rys. 3).
4. Zaproponowane przez autorów artykułu rozwiązanie konstrukcyjne elektromechanicznego układu napędowego pojazdu gąsienicowego MT-LB powinno poprawić jego właściwości dynamiczne.
5. Przyjęte w NATO kierunki rozwoju, dotyczące zastosowań napędów elektrycznych w pojazdach gąsienicowych, sugerują potrzebę podjęcia prac nad elektromechanicznymi układami napędowym w Polsce, np. w ramach projektów badawczo – rozwojowych.

LITERATURA

- [1] *Dokumentacja konstrukcyjna pojazdu gąsienicowego MT-LB.*
- [2] *Lekki gąsienicowy transporter – ciągnik MTLB, opis techniczny*, Szefostwo Służby Czołgowej – Samochodowej, Warszawa 1981.

CONCEPT OF ELECTROMECHANICAL DRIVE SYSTEM FOR MT-LB TRACKED VEHICLE

Summary

The article presents an analysis of the potential use of the electromechanical drive system for a MT-LB tracked vehicle.

Key words: *power transmission system, electro-mechanical power transmission, tracked vehicles, MT-LB*

Artykuł recenzował: dr hab. inż. Andrzej KAŻMIERCZAK, prof. nadzw. PWr