

# XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2024

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

### Porównanie właściwości maszyn AC i DC do napędu pojazdów specjalnych

Filip Polak<sup>1</sup>, Mirosław Karczewski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Pojazdów i Transportu, Wojskowa Akademia Techniczna  
email: [filip.polak@wat.edu.pl](mailto:filip.polak@wat.edu.pl), [miroslaw.karczewski@wat.edu.pl](mailto:miroslaw.karczewski@wat.edu.pl)

**STRESZCZENIE:** Artykuł przedstawia porównanie właściwości wybranych maszyn AC i DC do napędu pojazdów specjalnych, w tym pojazdów gaśnicowych. Celem pracy była próba analizy, który z typów silników spełni się lepiej jako źródło energii elektrycznej w układzie generatora spalinowego (GenSet) do wojskowego pojazdu z hybrydowym układem napędowym typu Range Extender. W ramach prowadzonych w WAT prac rozwojowych dotyczących nowoczesnych napędów pojazdów wojskowych podjęto prace nad możliwością zastosowania różnego typu silników w ramach optymalnego rozwiązania napędu hybrydowego, który może być zastosowany w wozach bojowych pojazdów. Wymagania stawiane układom napędu hybrydowego dedykowanym dla pojazdów wojskowych znacznie różnią się od wymagań cywilnych. Te i inne bardziej szczegółowe wymagania stanowiły podstawę doprowadzonych prac, których efektem końcowym jest wskazanie optymalnego rozwiązania w zakresie stosowanych silników elektrycznych jako element specjalizowanego hybrydowego układu napędowego.

**SŁOWA KLUCZOWE:** maszyna DC, Maszyna AC, Generator spalinowy, GenSet, napęd hybrydowy

#### 1. Wstęp

Wymagania cywilne dla silników spalinowych pojazdów skupiają się głównie na spełnieniu obowiązujących norm emisji spalin, zmniejszeniu kosztów eksploatacji, czy na zmniejszaniu opłat i umożliwieniu wjazdu do niektórych stref, np. Strefy Czystego Transportu.

Z kolei wymagania wojskowe koncentrują się na poprawie właściwości dynamicznych pojazdu poprzez wydajniejsze sterowanie charakterystyką momentu napędowego, co prowadzi do zwiększenia możliwości trakcyjnych pojazdu (jego mobilności a także dzielności terenowej), redukcji zużycia paliwa (w szczególności pod kątem zaopatrzenia logistycznego), większej wytrzymałości czy też możliwości redukcji masy i objętości układu napędowego. Paliwa kopalne są cały czas szeroko wykorzystywane do zasilania środków walki na współczesnym polu walki [1]. W celu zagwarantowania bezpieczeństwa dostaw zasadnym wydaje się zastosowanie alternatywnych dotychczas źródeł energii, które są coraz częściej wykorzystywane [2].

Innymi, często nie mniej ważnymi aspektami, są takie czynniki jak redukcja hałasu, ze względu na mniejszą jego emisję przez silniki elektryczne, a także mniejsza emisja promieniowania podczerwonego, która towarzyszy pracy silnika spalinowego. Dodatkowo dochodzi kwestia zapotrzebowania na energię elektryczną coraz większej ilości osprzętu (elektryczna stabilizacja uzbrojenia, łączność, systemy radarowe, systemy zapobiegające skutkom użycia broni ABC, itp.), który wymaga ciągłego i stabilnego źródła zasilania, zarówno podczas wykonywania misji jak i w trakcie codziennej eksploatacji czy w procesie szkolenia.

Spełnienie powyższych wymagań przy obecnie dostępnych źródłach magazynowania energii możliwe jest

między innymi poprzez zastosowanie napędu hybrydowego – spalinowo elektrycznego.

Ze względu na sposób współpracy elementów układu napędowego, rozróżnia się trzy rodzaje napędów hybrydowych:

- napęd szeregowy (S-HEV),
- napęd równoległy (P1-HEV, P2-HEV),
- napęd szeregowo-równoległy (SP-HEV).

#### 2. Problem badawczy

Analizując możliwość zastosowania w pojeździe wojskowym hybrydowego układu napędowego, należy uwzględnić jego strukturę, która w głównej mierze będzie bazować na rozwiązaniach spotykanych w pojazdach cywilnych (hybryda szeregową, równoległą, mieszaną) jednak zarówno złożoność konstrukcji (pojazdy 6x6, 8x8 oraz gaśnicowe) oraz inny rodzaj podejścia w zastosowaniu wojskowym, będą charakteryzowały się nieco odmiennymi rozwiązaniami.

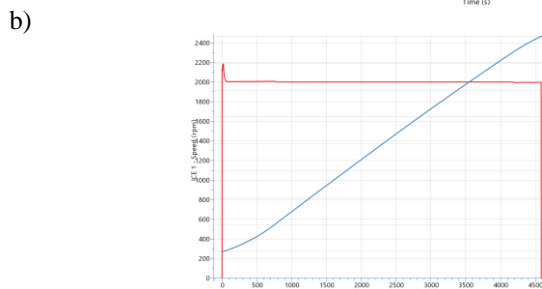
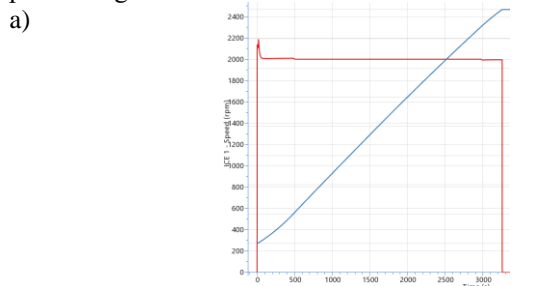
W przypadku doboru mocy użytecznej silnika spalinowego i elektrycznego, rozwiązanie równoległe charakteryzuje się użyciem silnika elektrycznego głównie jako wspomaganie pracy silnika spalinowego w wybranych punktach jego pracy. Silnik elektryczny w tym rozwiązaniu pełni głównie funkcje pomocnicze i w takim podejściu nie zapewnia pojazdowi wykorzystanie np. trybu pracy cichej w szerokim zakresie prędkości ze względu na niewielką moc. Mechanizm łączenia mocy pochodzącej z silnika elektrycznego oraz spalinowego jest skomplikowanym urządzeniem, wymagającym bardzo dużej precyzji w predykcji potrzebnej mocy do zapewnienia płynnego ruchu pojazdu oraz odpowiedniego jej doboru z uwzględnieniem różnych czasów odpowiedzi silnika elektrycznego i spalinowego. Napęd hybrydowy w konfiguracji szeregowej

może być nieznacznie cięższy od rozwiązania równoległego, co będzie przekładało się na nieznacznie większe zużycie paliwa względem hybrydy równoległej, jednakże jeśli docelowo priorytetowe ze względu na funkcje pojazdu, są jego właściwości trakcyjne, ten typ jest rozwiązaniem lepszym. Rozwiązanie szeregowe umożliwia rezygnację ze skomplikowanego układu przeniesienia napędu. Dotyczy to braku wałów napędowych, skrzyń rozdzielczych i blokad mechanizmów międzyosiowych na rzecz układu w którym napęd elektryczny przekazuje moment napędowy w sposób bezpośredni. Taki sposób przekazania napędu, bezpośrednio na koło napędowe, w moście napędowym lub do napędu gąsienicy, zmniejsza masę tego układu w porównaniu do wersji spalinowej. Dodatkowo zapewnia lepszą kontrolę nad trakcją i dostarcza odpowiednio dużą moc na poszczególne koła napędowe układu znacznie szybciej i płynniej niż przy wykorzystaniu silnika spalinowego.

W analizowanym rozwiązaniu tłokowy silnik spalinowy wspólnie z generatorem prądu elektrycznego tworzy zespół prądotwórczy/generatorowy, którego zadaniem jest dostarczenie energii elektrycznej do napędu pojazdu i układów zabudowanych w pojeździe – odbiorników energii elektrycznej oraz do ładowania baterii akumulatorów. Energia elektryczna wytworzona przez generator gromadzona jest w akumulatorze, skąd zasila silniki trakcyjne sterowane falownikami.

### 3. Wyniki badań

Przeprowadzono badania modelowe na stworzonym modelu zawierającym kompletny zespół spalinowo-elektryczny, tzw. GenSet. Do badań wykorzystano szereg charakterystyk silnika spalinowego (mocy użytecznej, momentu obrotowego, godzinowego zużycia paliwa) oraz wybranych silników elektrycznych o mocach dostosowanych do opracowanego rozwiązania. W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych uzyskano przebiegi charakterystyk m.in. zapotrzebowania na moc silników elektrycznych oraz zespołu spalinowo-elektrycznego oraz czasu ładowania i zużycia paliwa potrzebnego do naładowania akumulatora.



Rys. 1. Charakterystyka ładowania akumulatora litowego NMC w konfiguracji 216s2p: a) przez zespół z maszyną AC, b) przez zespół z maszyną DC

Zastosowanie maszyny elektrycznej, zarówno stałoprądowej jak i zmiennoprądowej wymaga każdorazowo ustawienia modelu silnika spalinowego w innym punkcie pracy ze względu na osiągnięcie najkorzystniejszych parametrów pracy jak maksymalna osiągniata moc lub minimalne zużycie paliwa przez zespół.

Analizując takie parametry jak czas ładowania akumulatora do pełnego stanu naładowania, w wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych stwierdzono, że czas dla generatora z maszyną DC jest dłuższy od generatora AC o około 20 min. Wymaga do dodatkowych ilości paliwa dla silnika spalinowego pracującego każdorazowo 20 min dłużej. Biorąc pod uwagę inne aspekty takie jak efektywność ładowania, dostępna moc oraz masa i zajmowana objętość zespołów, korzystniejsze jest zastosowanie rozwiązania bazującego na maszynie AC, nawet uwzględniając straty na urządzeniach towarzyszących takich jak zespół prostownikowy generujący napięcie umożliwiające naładowanie akumulatora i konieczność zabezpieczenia przed wpływem impulsu elektromagnetycznego lub ochroną przed zakłóceniami elektromagnetycznymi.

### 4. Podsumowanie

1) Postępująca elektryfikacja w obszarze motoryzacyjnym wymusza zmiany również w projektowaniu pojazdów specjalnych jakimi są pojazdy wojskowe.

2) Zastosowanie napędu hybrydowego wymusza zastosowanie układu, w którym silnik spalinowy pracuje z maszyną elektryczną jako pierwotne źródło energii elektrycznej.

3) W prezentowanym rozwiązaniu, silnik spalinowy napędzający maszynę prądu przemiennego o mocy 120 kW był w stanie naładować pakiet akumulatorów NMC 60 Ah w konfiguracji 216s2p w czasie około 56 min a w identycznych warunkach ładowanie akumulatora przy wykorzystaniu wybranej maszyny DC trwało 76 min.

4) W wyniku przeprowadzonej analizy oraz badań symulacyjnych stwierdzono, że w układach generatorowych pojazdów specjalnych optymalnym pod względem gabarytów, parametrów elektrycznych oraz sprawności mechanicznej, korzystnym jest zastosowanie maszyn synchronicznych z magnesami stałymi.

### Literatura

- [1] Worldwide Fuel Charter. Gasoline and diesel fuel, sixth edition, Worldwide Fuel Charter Committee, 2019.
- [2] U.S. Energy Information Administration International Energy Outlook 2016 International Energy Outlook: 2016 with Projections To 2040, <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>
- [3] Next-Generation X-In-1 Electric Powertrain Innovation [www.nissan-global.com](http://www.nissan-global.com)
- [4] Petroleum Committee vision on future fuels, NATO Fuels And Lubricants Working Group, 2020.
- [5] F. Badin, F. Le Berr, and E. Condemine. Evaluation of EVs energy consumption influencing factors, driving conditions, auxiliaries use, drivers aggressiveness. In *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*. IEEE, nov 2013. doi: 10.1109/evs.2013.6914723.
- [6] Barney Richard, Henning Lohse-Busch Carlson, Jeremy Diez, Jerry Gibbs, The measured impact of vehicle mass on road load forces and energy consumption for a BEV, HEV, and ICE vehicle, SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2 (1) (apr 2013), pp. 105-114 doi: 10.4271/2013-01-1457