

Jarosław Załęski, Michał Dadana, Paweł Młodzikowski¹⁾, Michał Twerd²⁾

¹⁾ Politechnika Warszawska, Warszawa, ²⁾ ZE TWERD, Toruń

PRZEKSZTAŁNIKOWY NAPĘD SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO

CONVERTER DRIVE FOR AN ELECTRICAL VEHICLE

Streszczenie: Artykuł ma za zadanie przybliżyć opracowany w firmie ZE TWERD prototyp przekształtnika przystosowanego dla elektrycznego samochodu dostawczego działającego w warunkach miejskich. Przedstawiono charakterystyczne właściwości jakie powinna posiadać konstrukcja falownika pracującego w pojeździe o napędzie elektrycznym, a także zabezpieczenia sprzętowe i programowe. Pokróćce omówiono algorytm sterowania bazujący na utrzymywaniu maksymalnego ilorazu momentu elektromagnetycznego i prądu stojana. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych.

Abstract: This paper describes a prototype developed by TWERD Power Electronics of an automotive converter intended for use in a light delivery van operating in an urban environment. Desired features of a such inverter were listed along with proper construction and software safety features. Control method - a variation of maximum torque per amper control (MTPA) was briefly discussed. Experimental results were given.

Słowa kluczowe: pojazdy elektryczne, silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, optymalny wektor prądu
Keywords: electric vehicle, automotive converter, interior permanent magnet synchronous machine (IPMSM), maximum torque per amper (MTPA)

1. Wstęp i założenia konstrukcyjne

Pojazdy o napędzie elektrycznym ostatnimi laty zdobyły bardzo wielu zwolenników ze względu na m.in. niski koszt eksploatacji, dynamikę tego rodzaju napędu zwłaszcza w przedziale niskich prędkości obrotowych, cichą pracę itp. [1]
Za główne przeszkody w upowszechnieniu się tego typu środków transportu można uznać:

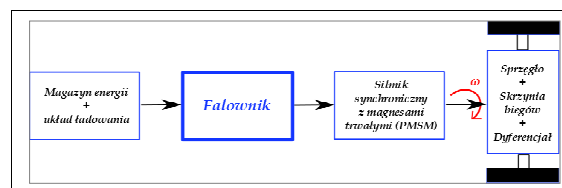
- ograniczony zasięg,
- długi czas ładowania akumulatorów oraz brak dedykowanej do tego celu infrastruktury,
- cenę pojazdu.

Ze względu na ograniczony zasięg, a także konieczność inwestycji w odpowiednie stanowisko do ładowania, codzienna eksploatacja tego rodzaju pojazdów przez prywatne osoby wydaje się być kłopotliwa.

Najkorzystniejszym zastosowaniem obecnie może stać się praca w warunkach miejskich grupy pojazdów korzystających ze wspólnej stacji bazowej (np. grupa pojazdów dostawczych dla sieci sklepów detalicznych w dużej aglomeracji). Z myślą o takim właśnie przeznaczeniu powstał opisywany falownik, który według założeń powinien charakteryzować się:

- tolerancją dla krótkotrwałych przeciążeń,
- odpowiednimi zabezpieczeniami programowymi,
- odpowiednią klasą szczelności,
- kompaktową budową.

Ze względu na pewne preferencje firmy zainteresowanej wdrożeniem prototypu wybrano wariant pojedynczego centralnego falownika (Rys.1) sterującego silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi.



Rys. 1. Blokowy schemat układu napędu samochodu elektrycznego

Za problem ładowania, wyrównywania napięć na akumulatorach, komunikację z użytkownikiem, a także obsługę procedury uruchomienia pojazdu odpowiada nadrzędny sterownik. Rozwiązania konstrukcyjne zostały przygotowane w oparciu o wskazane w dyrektywie 2004/104/WE normy [2],[3] regulujące kwestie bezpieczeństwa oraz kompatybilności elektro-

magnetycznej urządzeń „automotive” tzn. przeznaczonych do użytku w pojazdach, a także m.in. normy krajowe[4-6].

2. Opis konstrukcji

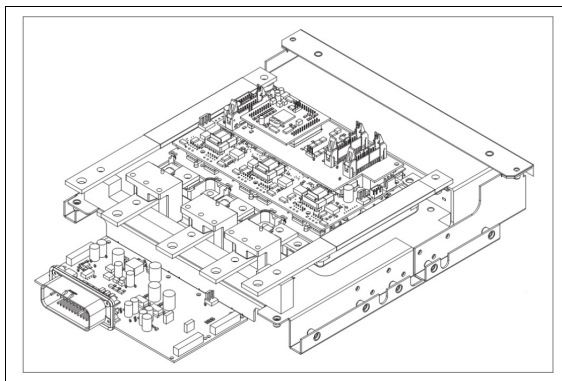
2.1. Część elektryczna

Do budowy części silnoprądowej wykorzystane zostały moduły *insulated bipolar junction transistor* (IGBT) zawierające po dwa tranzystory mocy (o parametrach znamionowych $I_n=600A$, $U_n=1200V$) wraz z diodami zwrotnymi w konfiguracji „half-bridge”. Za wyborem tego rozwiązania przemawia wiele czynników:

- wygodna konstrukcja o obniżonych indukcyjnościach pasożytniczych,
- duże gęstości prądu,
- umiarkowany poziom strat,
- stosunkowo łatwa dostępność i cena.

Z uwagi na występowanie silnych źródeł zakłóceń elektromagnetyczne jakimi są kluczujące tranzystory IGBT falownika oraz silnik elektryczny zasilany z przekształtnika wszelkie przewody silnoprądowe (zasilające falownik oraz wyjściowe do silnika) są przewodami jednożyłowymi w ekranie. Wejścia do obudowy prowadzone są przez dławice EMC.

Część sterująca składa się z płyty z układami zabezpieczeń, pomiarowymi i obwodami sterującymi tranzystorami IGBT Trójwymiarowa wizualizacja projektu części elektronicznej przedstawiona jest poniżej (Rys. 2.).

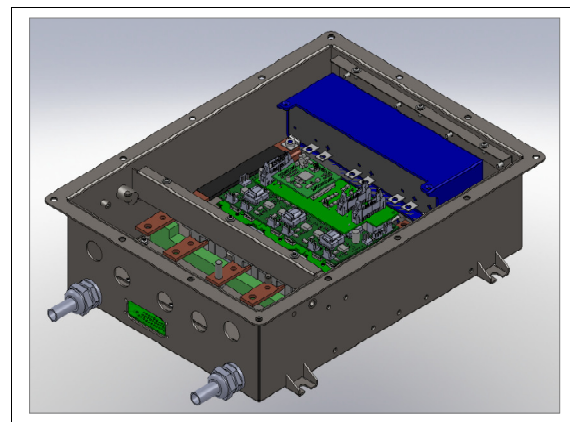


Rys. 2. Projekt części elektronicznej

Na płycie sterującej znajdują się ponadto interfejs do obsługi magistrali Controller Area Network (CAN) oraz izolowany interfejs enkodera inkrementalnego i absolutnego. Połączenia taśmowe prowadzono z wykorzystaniem ferrytowych rdzeni EMC.

2.2. Część mechaniczna

Kompletne urządzenie zaprojektowano jako jeden blok o wymiarach nie wykraczających poza prostopadłościan o gabarytach 500x350x150 mm. Falownik przystosowany jest do chłodzenia cieczą (mieszaniną glikolu i wody). Radiator do modułów IGBT jest wykonany w postaci bloku aluminiowego, w którym zostały wyfrezowane ścieżki dla medium chłodzącego. Miejsca obróbki zostało zaślepione pokrywką mocowaną poprzez napaianie materiału. Trójwymiarowa wizualizacja projektu części mechanicznej przedstawiona jest poniżej (Rys. 3.).



Rys. 3. Projekt części mechanicznej

Wszelkie wyprowadzenia elektryczne oraz hydrauliczne umieszczone są na jednym z boków obudowy urządzenia. Obudowa zapewnia stopień szczelności IP67.

3. Algorytm sterowania oraz stosowane zabezpieczenia

Poza typowymi programowalnymi zabezpieczeniami w postaci ograniczników wartości zadawanego momentu i prądu biernego na wyjściu regulatorów sterowanie powinno uwzględniać specyficzne warunki pracy tego napędu. Konieczne jest m. in. uniemożliwienie przypadkowego uruchomienia pojazdu realizowane przez zdjęcie blokady „ZAPŁON” przez nadrzędny układ sterujący, przy czym zalecane jest aby nastąpiło to po wykonaniu przez operatora szeregu określonych czynności. Ponadto sprzętowe i programowe zabezpieczenia powinny uniemożliwiać:

- niekontrolowany wzrost prędkości obrotowej (zakładana dynamika przyspieszenia),

- awarię na skutek utraty informacji o prędkości obrotowej (kontrolowane zatrzymanie pojazdu),
- przegrzanie silnika lub falownika (obsługa termistora PTC wbudowanego w silnik i termistora osadzonego w radiatorze).

Algorytm sterowania jest oparty na utrzymaniu maksymalnego ilorazu momentu elektromagnetycznego i prądu stojana [7]. Sprowadza się to do maksymalizacji odjemnej w równaniu (1) opisującym moment elektromagnetyczny:

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q \Psi_m - \frac{3}{2} (L_d - L_q) \cdot i_d i_q \quad (1)$$

przy założeniu, iż wektor prądu i_s stojana można przedstawić jako:

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (2)$$

oraz:

$$\frac{\partial T_e}{\partial i_s} = 0 \quad (3)$$

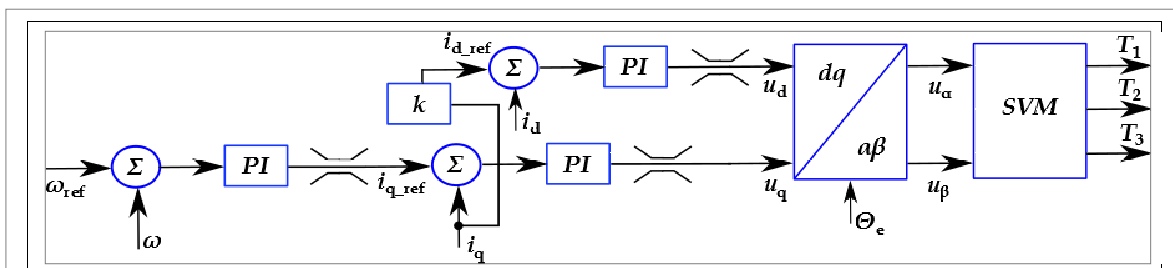
gdzie: \dots_d oraz \dots_q – wartości w osiach d i q wirującym układzie współrzędnych, Ψ_m – strumień magnetyczny stojana, p – liczba par biegunów, L oraz i – indukcyjności oraz prądy odpowiednio.

Schemat blokowy zaimplementowanego algorytmu sterowania został przedstawiony na poniższym rysunku (Rys. 4). Sygnał podawany przez operatora z zadajnika prędkości ω_{ref} razem z wartością prędkości zmierzonej tworzą uchyb regulacji dla regulatora proporcjonalno-całkującego (PI) prędkości. Z wyjścia tego regulatora przez ogranicznik wartość ta oznaczona jako $i_{q,ref}$ jest zadana dla sumatora regulatora momentu. Odpowiadająca jej wartość prądu zmierzonego i_q jest jednocześnie

po przemnożeniu przez stałą k - wielkością zadaną dla regulatora prądu w osi d wirującego układu współrzędnych. Wartość współczynnika k jest dobrana na podstawie parametrów schematu zastępczego silnika i weryfikowana w warunkach doświadczalnych. Z wyjść regulatorów momentu i prądu w osi d po nałożeniu ograniczników, amplitudy napięć zadanych w układzie dq są transformowane do układu współrzędnych stacjonarnych $\alpha\beta$ przy udziale zmierzonego chwilowego położenia kąтового wirnika Θ transformowanego na kąt elektryczny Θ_e . Kąt położenia wirnika Θ przyjmowany do tych obliczeń w algorytmie sterowania silnikiem otrzymywany może być w jeden z trzech sposobów:

- bezpośrednie przepisanie wartości zmiennej kąta z enkodera absolutnego,
- porównanie różnicy pomiędzy wartościami kątów z enkodera inkrementalnego oraz absolutnego, która po przejściu przez filtr dolnoprzepustowy dostawiana jest do sygnału inkrementalnego,
- korzystanie wyłącznie z sygnału enkodera inkrementalnego (głównie przydatne dla celów serwisowych).

Silnik IPMSM z uwagi na małą szczelinę powietrzną charakteryzuje się dużą wartością reaktancji w osi podłużnej. Dzięki tej własności możliwe jest osłabienie strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej za pomocą przepływu stojana w osi d uzyskując w ten sposób, przy zachowaniu stałej mocy, pracę silnika z prędkościami większymi od prędkości znamionowej – odwzbudzenie maszyny [8]. W przypadku silników z magnesami trwałymi następuje to przez wytworzenie pola magnetycznego przeciwdziałające polu magnetycznemu wirnika.



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu sterowania

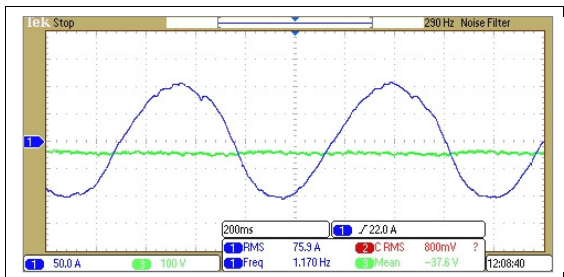
4. Badania eksperymentalne

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem silnika synchronicznego z magnesami zagłębionymi sprzężonego mechanicznie z silnikiem prądu stałego zasilanym z prostownika tyrystorowego – wybrane parametry znajdują się w tabeli 1.

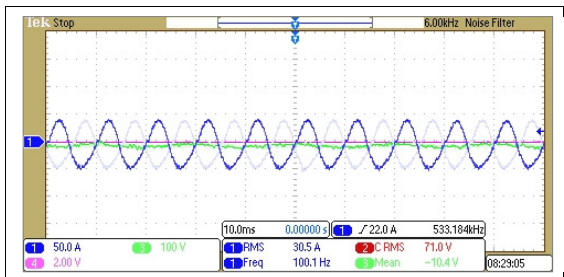
Tabela 1. Wybrane parametry badanego układu

Parametr	Wartość
Falownik	
Napięcie zasilania	300...350 V
Moc znamionowa falownika	60 kW
Przepływ czyn. chłodzącego	10 l/min
Prąd znamionowy	300 A
Prąd przeciążeniowy (10s)	400 A
Silnik	
Rodzaj	IPMSM
Typ	SMwsg160L 4
Moc ciągła	50 kW
Moment znamionowy	125 Nm
Prędkość znamionowa	3600 obr/min

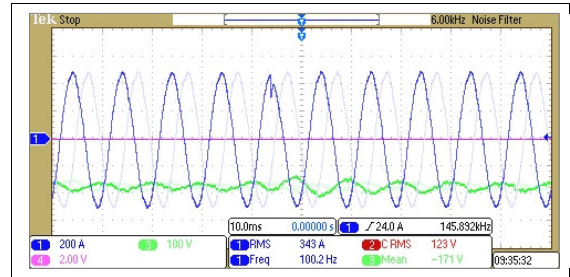
4.1. Praca w stanie ustalonym



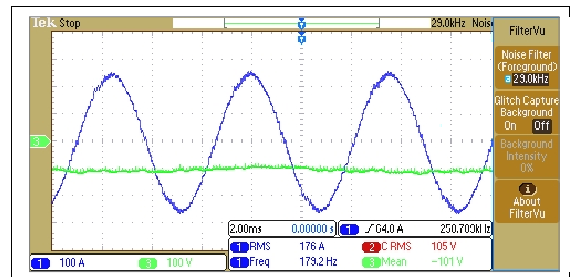
Rys. 5. Stan ustalony przy niskiej prędkości obrotowej $n=35$ obr/min: prąd fazowy oraz wartość momentu elektromagnetycznego



Rys. 6. Stan ustalony przy prędkości znamionowej $n=3000$ obr/min oraz obciążeniu 10Nm: prąd fazowy oraz wartość momentu elektromagnetycznego

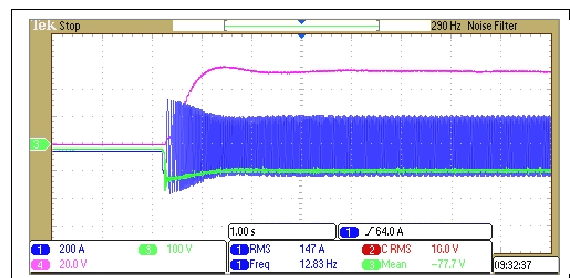


Rys. 7. Stan ustalony przy prędkości znamionowej $n=3000$ obr/min oraz obciążeniu 175Nm: prąd fazowy oraz wartość momentu elektromagnetycznego

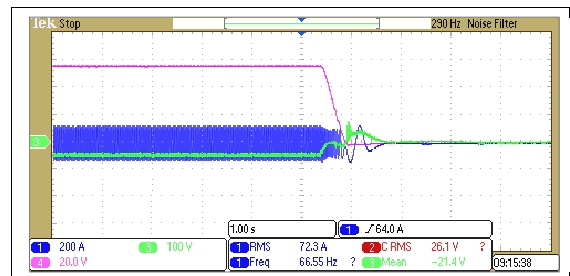


Rys. 8. Stan ustalony przy prędkości znamionowej $n=5460$ obr/min (odwzbudzenie) oraz obciążeniu 100Nm: prąd fazowy oraz wartość momentu elektromagnetycznego

4.2. Praca w stanach dynamicznych



Rys. 9. Skok prędkości zadanej 0-2000 obr/min przy obciążeniu 50Nm: prąd fazowy, prędkość oraz wartość momentu elektromagnetycznego



Rys. 10. Skok prędkości zadanej 2000-0 obr/min przy obciążeniu 50Nm: prąd fazowy, prędkość oraz wartość momentu elektromagnetycznego

5. Wnioski

Układ napędowy pracuje poprawnie dla niskich prędkości obrotowych (od 35 obr/min) zachowując wysoką dynamikę przy zmianach prędkości obrotowej. W zakresie wyższych prędkości (powyżej 3000 obr/min) konieczne jest odwzbudzenie maszyny synchronicznej IPMSM polegające na forsowaniu prądu biernego osłabiającego wpływ magnesów trwałych w wirniku. Operacja ta jest związana z modyfikacją na bieżąco kąta mocy β ustalanego przez wartości składowych prądu silnika w osiach d i q . W praktyce oznacza to forsowanie dużym prądem przy jednoczesnej utracie momentu silnika - czynność ta ma słabe uzasadnienie energetyczne.

6. Literatura

- [1]. Michna M., Adamczyk D., Ronkowski M., Kutt F., Bernatt J., Pistelok P., Król E., Kucharski Ł., Kwiatkowski M., Byrski Ł., Kozioł M.: *Koncepcja, modelowanie i symulacja układu napędowego prototypu samochodu elektrycznego "ELV001"* Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 4, 2011, wyd. BOBRME KOMEL, s. 17-22.
- [2]. ISO 11451 – *Pojazdy drogowe. Zakłócenia elektryczne powodowane przez wąsko-pasmowe promieniowanie elektromagnetyczne*. <http://www.iso.org> (2005).
- [3]. PN-ISO 7637 – *Pojazdy drogowe. Zaburzenia elektryczne przenoszone przez przewodzenie oraz przez sprzężenia*. <http://www.iso.org> (1997).
- [4]. PN-EN 1987-1 – *Pojazdy o napędzie elektrycznym. Szczególne wymagania bezpieczeństwa. Magazynowanie energii w pojeździe*.
- [5]. PN-EN 1987-2 – *Pojazdy o napędzie elektrycznym. Szczególne wymagania bezpieczeństwa. Funkcjonalne środki bezpieczeństwa oraz zabezpieczenie przed uszkodzeniem*.
- [6]. PN-EN 1987-3 – *Pojazdy o napędzie elektrycznym. Szczególne wymagania bezpieczeństwa*.

Ochrona użytkowników przez zagrożeniami elektrycznymi.

[7]. Kwang-Woon L., Sang-Bin L., "MTPA operating point tracking control scheme for vector controlled PMSM drives," Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on, vol., no., pp.24,28, 14-16 June 2010.

[8]. Rossa R., Król E.: „Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi”. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 81/2009, s. 125-129.

Autorzy

mgr inż. Jarosław Załęski

mgr inż. Michał Dadana

mgr inż. Michał Twerd

Jaroslaw.Zaleski@twerd.pl

Michal.Dadana@twerd.pl

Michal@twerd.pl

Zakład Energoelektroniki TWERD

ul. Konwaliowa 30, 87-100 Toruń

mgr inż. Paweł Młodzikowski

pawel.mlodzikowski@ee.pw.edu.pl

Zakład Elektroniki Przemysłowej

Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska

ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

Informacje dodatkowe

Prace finansowane z projektu "Specjalistyczne przemiennikowe zespoły napędowe o szerokim zakresie zastosowań - produkt 5: Falownikowy napęd dostawczego samochodu elektrycznego FNS".

