

Andrzej Sikora, Adam Zielonka
Politechnika Śląska, Gliwice

UKŁAD ZASILANIA SILNIKA BLDC Z UWZGLĘDNIENIEM SPECYFIKI NAPĘDU POJAZDU DROGOWEGO

BLDC MOTOR SUPPLY DEDICATED TO ROAD VEHICLE DRIVE

Abstract: The paper is focused on presenting BLDC motor drive dedicated to road vehicle drive. Electric drive must fulfill specified functions depending on its application. Road vehicle drive sets particular demands higher than in case of other drives. Apart from obvious requirements common to all types of drives (such as starting or coasting), road vehicle drive should be able to recuperate energy during braking and to operate in reverse mode. The constructed test stand represents basic vehicle drive structure. The basic goal kept in mind during construction of test stand was selection of supply circuit structure (electronic commutator with auxiliaries). The paper gives detailed description of test stand with particular emphasis laid on the supply system structure and peculiarities of road vehicle.

1. Wstęp

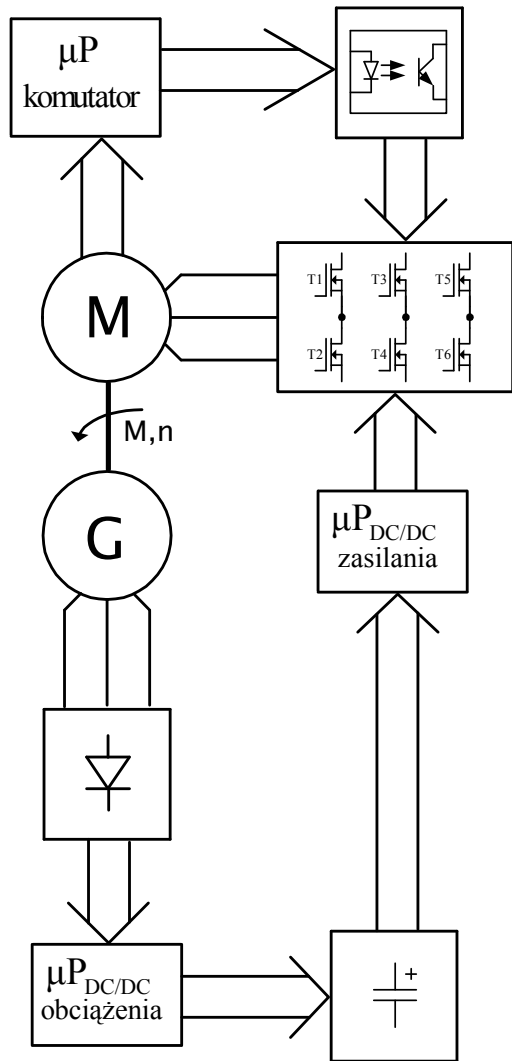
W ramach pracy badawczej pt. „Stanowisko do badania napędu pojazdu hybrydowego” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N510 326637 zbudowano stanowisko badawcze z silnikiem BLDC wyposażone w autorski układ komutatora elektronicznego wraz z osprzętem [1]. Zbudowane stanowisko badawcze odwzorowuje podstawowy model napędu pojazdu. Podstawowym celem realizacji stanowiska z silnikiem BLDC był dobór struktury układu zasilającego (komutator elektroniczny wraz z osprzętem). W artykule przedstawiono opis stanowiska ze szczególnym zwróceniem uwagi na strukturę układu zasilania i specyfikę napędu pojazdu drogowego.

2. Opis stanowiska

Stanowisko zbudowano w oparciu o sześciobiegunowy silnik BLDC typu SMZT80-6 z hallotronowymi czujnikami położenia wirnika umieszczonymi w stojanie. Dodatkowo zabudowano czujniki hallotronowe umieszczone na zewnętrznej tarczy, współpracującej z nadajnikiem magnetycznym (czujnik położenia autorskiego wykonania) [2]. Trzecim zamontowanym na stanowisku badawczym czujnikiem położenia wału silnika jest 10-cio bitowy absolutny enkoder cyfrowy. Czujnik ten posiada największą rozdzielczość pomiarową z zabudowanych na stanowisku czujników (za dużą dla potrzeb zasilania silnika BLDC o sześciu biegach). Przy czym należy nadmienić, że 10-cio bitowy sygnał z enkodera nie jest bezpośrednio wykorzystywany do wysterowywania

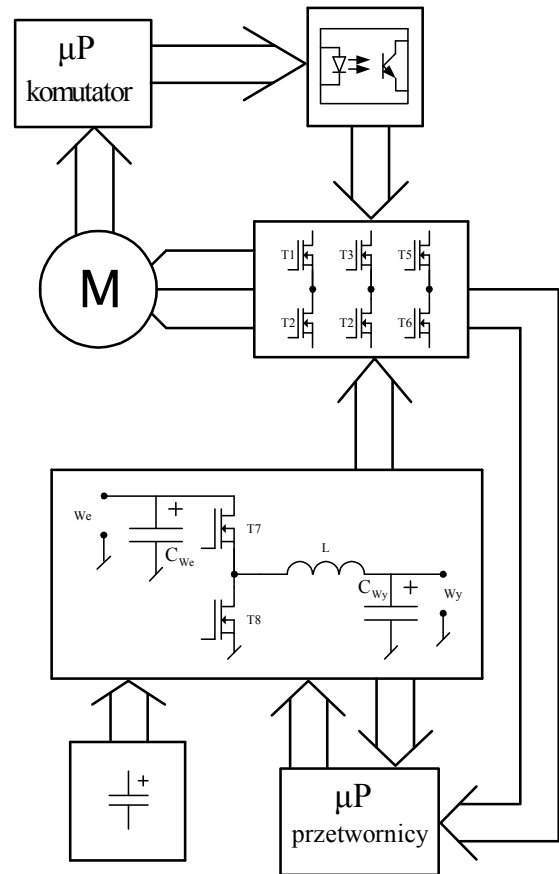
tranzystorów mostka, a służy jedynie do celów badawczych. Układ zasilania silnika BLDC pozwala korzystać alternatywnie z dowolnego zbudowanego czujnika położenia wału silnika. Na stanowisku zamontowano także maszynę obciążającą wzbudzaną magnesami trwałymi oraz momentomierz. Układ zasilania silnika, układ pracy zwrotnej, składa się z komutatora elektronicznego zbudowanego z sześciu tranzystorów w układzie mostkowym. Tranzystory te są wysterowywane układem mikroprocesorowym korzystającym z sygnału pochodzącego z czujnika położenia wału silnika. Komutator elektroniczny zasilany jest z zasobnika energii elektrycznej zbudowanego z baterii akumulatorów poprzez mikroprocesorową dwukierunkową przetwornicę DC/DC obniżającą napięcie w zależności od prędkości wirowania silnika i stanu pracy silnika (praca silnikowa, hamowanie). Mikroprocesorowa przetwornica pracuje w oparciu o wartość zadaną (zadana prędkość, zadany moment, zadane wypełnienie PWM) oraz informacje dotyczące: prądu pobieranego przez komutator elektroniczny, prędkości wirowania silnika i temperatury tranzystorów mocy (ochrona układu przed uszkodzeniem termicznym). Odpowiednie sterowanie przetwornicą zasilającą komutator elektroniczny pozwala na realizację funkcji napędu:

- rozruch z prądem nieprzekraczającym ograniczenia prądowego,
- stabilizacja prędkości do wartości zadanej,
- stabilizacja momentu do wartości zadanej,
- hamowanie z prądem nieprzekraczającym ograniczenia prądowego.



Rys.1. Schemat układu zasilania silnika BLDC składający się z mikroprocesora, optoizolacji, mostka tranzystorowego, mikroprocesorowej przetwornicy DC/DC, źródła zasilania wraz z obciążeniem w postaci prądnicy synchronicznej, prostownika i przetwornicy DC/DC

Jako obciążenie wykorzystuje się trójfazową maszynę wzbudzaną magnesami trwałymi, z której energia elektryczna, poprzez sześciopulsowy układ prostujący i drugą mikroprocesorową przetwornicę DC/DC, przekazywana jest do źródła zasilania. Mikroprocesorowa przetwornica pracująca w układzie obciążenia pracuje w oparciu o wartość zadaną momentu obciążenia.

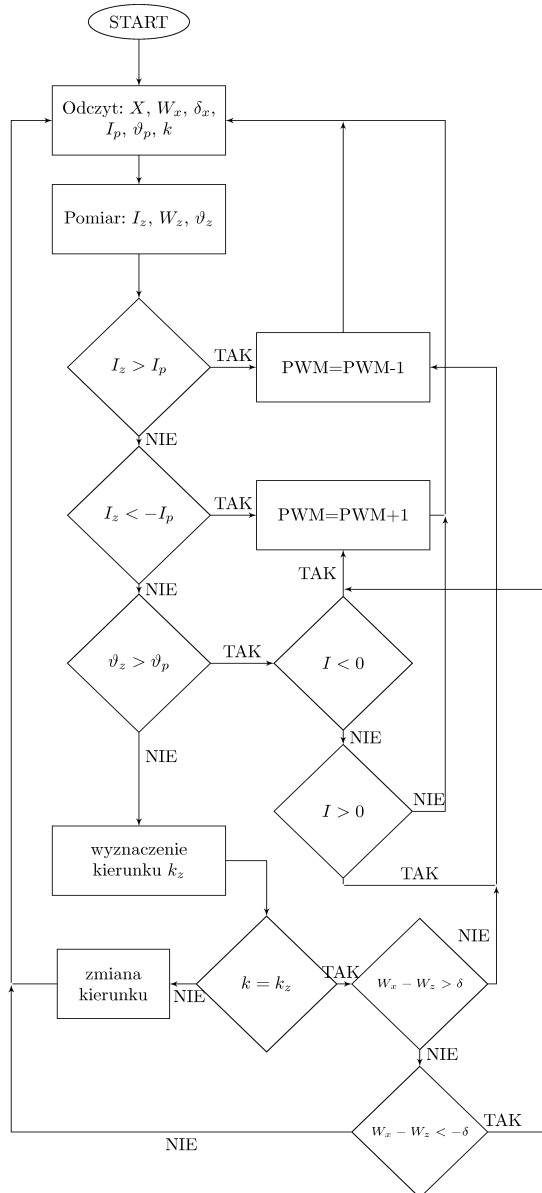


Rys. 2. Schemat przetwornicy DC/DC zasilającej komutator elektroniczny składającej się z mikroprocesora przetwornicy, tranzystorów T7, T8 i elementów wygładzających C_{we} , C_{wy} , L

3. Wymagania stawiane napędowi z silnikiem BLDC

Napęd elektryczny w zależności od zastosowania musi realizować określone funkcje. Specyfika napędu pojazdu drogowego stawia przed nim więcej wymagań niż w przypadku innych napędów. Oprócz oczywistych wymagań stawianych wszystkim napędom (np. rozruch, hamowanie wybiegiem), napęd pojazdu drogowego powinien posiadać możliwość hamowania odzyskowego oraz pracy rewersyjnej. Zasilanie silnika BLDC wymaga sekwencyjnego przełączania kluczy energoelektronicznych ściśle zależnego od położenia wału silnika i kierunku wirowania. Niespełnienie powyższego wymagania: znaczne opóźnienie lub wyprzedzenie (o 2 sekwencje sterowania) przełączenia względem obracającego się wirnika lub wysterowanie tranzystorów dla kierunku przeciwnego niż wiruje wał silnika powoduje przepływ bardzo dużego prądu przez otwarte tranzystory, co pro-

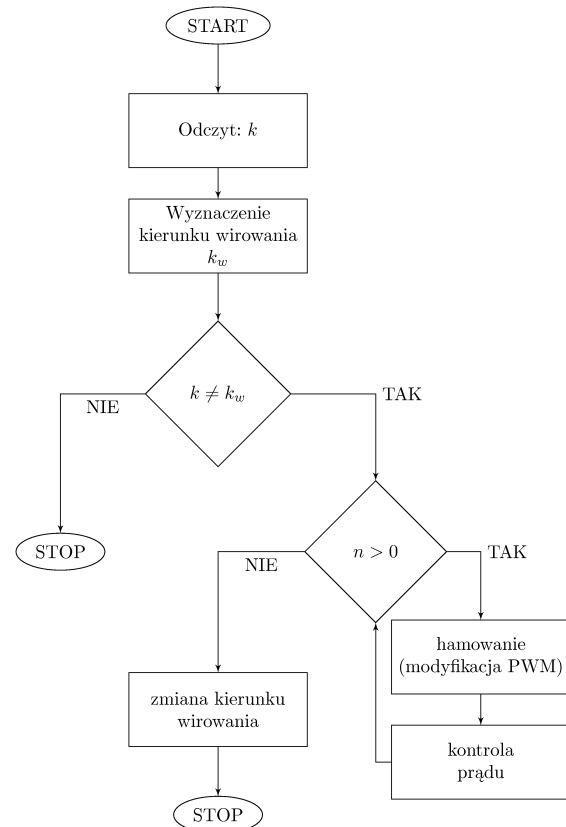
wadzi do ich zniszczenia. Z tego względu nawrót silnika nie może być zrealizowany jedynie poprzez wysterowanie tranzystorów mocy sekwencją dla przeciwnego kierunku wirowania.



Rys. 3. Schemat blokowy programu realizowanego przez mikroprocesor sterujący komutatorem elektronicznym

Aby zrealizować nawrót silnika BLDC należy najpierw obniżyć prędkość aż do zatrzymania wirnika przełączając tranzystory mocy zgodnie z kierunkiem wirowania, a dopiero wówczas zmienić sekwencję sterowania na przeciwną. Zmniejszanie prędkości korzystnie jest realizować poprzez hamowanie odzyskowe kontrolując prąd. Po zmianie sekwencji sterowania na przeciwną realizowany jest rozruch silnika

z kontrolą prądu. Mikroprocesor sterujący komutatorem elektronicznym realizuje algorytm przedstawiony na rys 3., gdzie przez X oznaczono PWM albo prędkość wirowania albo moment napędowy w zależności od wyboru strategii sterowania.



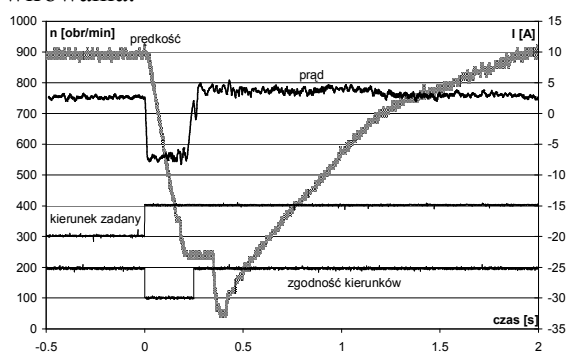
Rys. 4. Schemat blokowy podprogramu „zmiana kierunku” wchodzącego w skład algorytmu sterowania komutatorem elektronicznym.

Parametr W_x oznacza wartość zadaną wybranej wielkości X , W_z wyznaczoną wartość tej wielkości, δ_x oznacza promień otoczenia wartości zadanej, I_p oznacza progową wartość prądu zaś I_z wartość zmierzoną prądu, θ_p oznacza progową wartość temperatury układu natomiast θ_z zmierzoną wartość temperatury, a przez k oznaczono kierunek wirowania. Blok podprogramu o nazwie „zmiana kierunku” wchodzący w skład algorytmu przedstawionego na rysunku 3 realizuje algorytm przedstawiony w postaci schematu blokowego na rysunku 4, gdzie przez k oznaczono kierunek zadany, a przez k_w kierunek wirowania wału silnika.

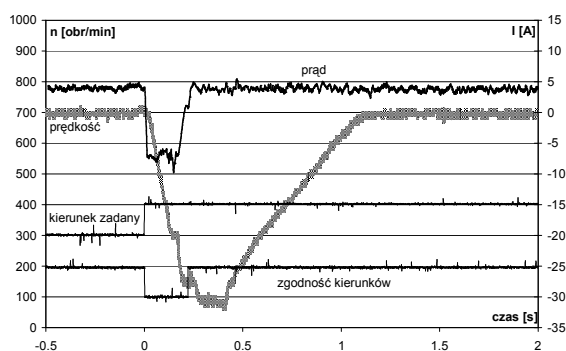
4. Weryfikacja układu

W celu zweryfikowania poprawności pracy skonstruowanego układu zasilania silnika

BLDC, przeznaczonego do napędu pojazdu przeprowadzono rejestrację prądu zasilania silnika i jego prędkości obrotowej oraz sygnału zadającego kierunek wirowania i sygnału określającego zgodność kierunku wirowania z kierunkiem zadaniem. Wartość ostatniego z wymienionych sygnałów określa stan pracy układu: stan niski oznacza hamowanie ze zwrotem energii do baterii akumulatorów, zaś stan wysoki oznacza pracę silnikową układu napędowego. Weryfikację pracy układu wykonano dla różnych stanów pracy układu (prędkość, moment obciążenia, kierunek wirowania). W artykule przedstawiono dwa przykładowe zarejestrowane przebiegi dla biegu jałowego – rys. 5 oraz dla pracy z obciążeniem i ograniczeniem prądowym (dobranym specjalnie do potrzeb rejestracji) - rys. 6, na rysunkach tych czas $t=0$ oznacza czas zadania przeciwnego kierunku wirowania.



Rys. 5. Przebieg prędkości, przebieg prądu (wyglądzony w celu lepszej wizualizacji) oraz sygnał kierunku zadanego i sygnał zgodności kierunków dla pracy silnika BLDC na biegu jałowym



Rys. 6. Przebieg prędkości, przebieg prądu (wyglądzony w celu lepszej wizualizacji) oraz sygnał kierunku zadanego i sygnał zgodności kierunków dla pracy obciążonego silnika BLDC (praca z ograniczeniem prądowym)

Zaprezentowane przebiegi zarejestrowano wykorzystując oscyloskop cyfrowy, przy czym analogowy sygnał prędkości obrotowej otrzymano wykorzystując układ przetwarzający częstotliwość na napięcie (tachoprądnica elektroniczna) zrealizowany na potrzeby badań prowadzonych w ramach projektu. Użycie tachoprądnicy elektronicznej nie powoduje dodatkowych obciążeń mechanicznych badanego układu, nie zmienia jego momentu bezwładności ani nie wymaga połączenia z wałem maszyny. W badanym układzie sygnałem wejściowym do tachoprądnicy jest sygnał pochodzący z jednego hallotronu, przez co tachoprądnica elektroniczna nie określa kierunku wirowania (sygnał wyjściowy nie przyjmuje wartości ujemnych). Takie rozwiązanie obarczone jest niewielką zwłoką czasową przy niskiej częstotliwości, która pojawia się dla prędkości bliskiej zero, co zostało zarejestrowane w przebiegu sygnału prędkości obrotowej rys. 5 (przedział czasu od 200 – 300 ms). Wynikające ze specyfiki budowy i częstotliwości wejściowej tachoprądnicy elektronicznej opóźnienie (około 150 ms) jest na tyle małe, że można ją zastosować w układach pomiaru i regulacji prędkości, w których czas reakcji układu jest znacznie większy. Z tego samego powodu zarejestrowany analogowy sygnał prędkości obrotowej w trakcie nawrotu nie osiąga wartości zero w momencie zmiany kierunku wirowania, ponieważ czas opóźnienia tachoprądnicy elektronicznej jest większy niż czas zatrzymania wału silnika.

5. Podsumowanie

Zrealizowany w ramach prac badawczych i przedstawiony w artykule układ zasilania spełnia stawiane przed nim wymagania wynikające ze specyfiki pracy układu napędowego pojazdu. Przedstawione na rysunkach przebiegi pokazują, że zbudowany układ w pierwszej fazie nawrotu realizuje hamowanie odzyskowe kontrolując prąd, następnie po zatrzymaniu zmienia sekwencję sterowania na przeciwną i realizuje rozruch silnika w przeciwnym kierunku również kontrolując prąd. Układ napędowy przedstawiony w artykule pozwala na odzyskanie energii hamowania, co jest zaletą stosowania napędu elektrycznego. Realizując hamowanie silnikiem elektrycznym ogranicza się zużycie ciernych układów hamowania, przez co oprócz zmniejszenia zużycia energii zmniejsza się emi-

sja pyłów pochodzących z klasycznych układów hamulcowych.

6. Literatura

- [1]. Sikora A., Zielonka A.: Ograniczenie strat mocy w silniku BLDC wynikających z pulsacji prądu zasilania. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne BOBRME KOMEL Nr 90/2011, Ryto, maj 2010r. ISSN 0239-3646, str. 205-212.
- [2]. Sikora A., Zielonka A.: Wpływ położenia czujników hallotronowych na symetrię sygnałów sterujących silnikiem BLDC. Pojazdy Szynowe 3/2011r. ISSN 0138-0370 str. 30 – 36.
- [3]. Bernatt J., Glinka T., Król E., Rossa R.: Electric Motors with Permanent Magnets. ICRM 2008. IEEE Catalog Number: CFP0890B-CDR. ISBN: 978-1-4244-1736-0. Library of Congress Number: 2007906913. Poz.58.
- [4]. Sikora A., Zielonka A.: Napęd łodzi motorowej z wykorzystaniem silnika bezszczotkowego zasilanego poprzez komutator elektroniczny. Napędy i Sterowanie ISSN 1507-7764, nr 2'2010 str.46-48.
- [5]. Setlak R., Fice M., Kulesz B.: Smart Attachable Hybrid Drive Module For Vehicles. XI. International Conference on Low Voltage Electrical Machines, LVEM'2011, 7-8 Nov. 2011, Brno-Slapanice
- [6]. Sikora A., Zielonka A.: Dwa warianty zasilania silnika BLDC. Wiadomości Elektrotechniczne 6/2011r. ISSN 0043-5112 str. 18 – 19.
- [7]. Decner A.: Zdalne monitorowanie maszyn elektrycznych. Maszyny elektryczne Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne BOBRME KOMEL Nr 91/2011, Ryto, maj 2010r. ISSN 0239-3646.
- [8]. Sikora A., Zielonka A.: Układ zasilania silnika BLDC. Zgłoszenie P-394971 z dn. 23.05.2011.

7. Autorzy

dr inż. Andrzej Sikora
Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Informatyki, Zakład Inżynierii Elektrycznej w Transporcie ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, tel. (32)2371258, Andrzej.Sikora@polsl.pl

dr inż. Adam Zielonka
Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Matematyczno-Fizyczny, Instytut Matematyki, Zakład Zastosowań Matematyki, ul. Kaszubska 23, 44-100 Gliwice, Adam.Zielonka@polsl.pl

Artykuł jest fragmentem grantu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N510 326637