

*silnik BLDC, komutator elektroniczny,
mikroprocesorowe sterowanie, stabilizacja prędkości
zasianie z zasobnika energii, zadawanie momentu obciążenia*

Andrzej SIKORA*, Adam ZIELONKA**

STANOWISKO DO BADANIA SILNIKA BLDC Z MOŻLIWOŚCIĄ ZADANIA PRĘDKOŚCI I MOMENTU OBCIĄŻENIA

W ramach pracy badawczej pt. „Stanowisko do badania napędu pojazdu hybrydowego” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N510 326637 zaistniała konieczność wykonania pomiarów sprawności układu napędowego dla różnych wariantów sterowania silnika BLDC celem zapewnienia możliwości energooszczędnej pracy napędu pojazdu hybrydowego (elektrycznego), a tym samym zmaksymalizowanie zasięgu pojazdu przy zasilaniu z zasobnika energii elektrycznej. Przeprowadzenie tego typu badań wymaga zapewnienia powtarzalnych warunków pomiarowych. Czynniki wynikającymi z wymaganych parametrów trakcyjnych, wpływającymi na sprawność układu napędowego (przetworzenie energii elektrycznej z zasobnika na energię mechaniczną na wale silnika) są prędkość obrotowa i moment obciążenia. Tak postawione zadanie wymaga stworzenia stanowiska badawczego pozwalającego na stabilizację prędkości obrotowej do wartości zadanej i stabilizację momentu obciążenia również do wartości zadanej.

1. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Stanowisko badawcze składa się z dwóch maszyn elektrycznych: badany silnik BLDC typu SMZT80-6 oraz maszyny obciążającej – prądnica wzbudzana magnesami trwałymi. Maszyny te połączone są wałami poprzez momentomierz DATAFLEX 22/20. Silnik BLDC zasilany jest z baterii akumulatorów o napięciu znamionowym 48 V poprzez komutator elektroniczny zrealizowany w ramach tego samego projektu badawczego. Stanowisko pozwala wykorzystać komutator elektroniczny w dwóch wa-

* Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Informatyki, Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, Andrzej.Sikora@polsl.pl

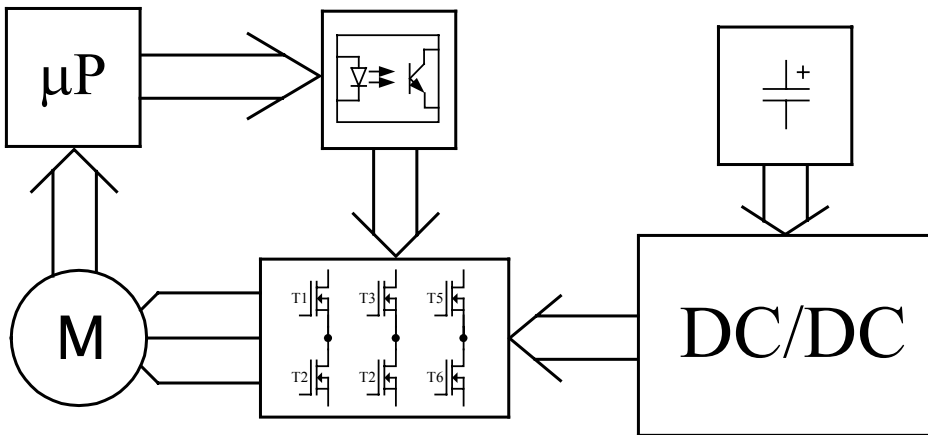
** Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Matematyki, Zakład Zastosowań Matematyki, ul. Kaszubska 23, 44-100 Gliwice, Adam.Zielonka@polsl.pl

ariantach pracy: z przetwornicą DC/DC i bez niej. Układ obciążenia został zaprojektowany w taki sposób, aby energia elektryczna pobierana z prądnicy poprzez układ prostujący i przetwornicę DC/DC (przetwornica inna niż w układzie zasilania) przekazywana jest do źródła zasilania (baterii akumulatorów). W taki sposób zbudowano układ pracy zwrotnej, dzięki czemu z baterii akumulatorów pobierana jest tylko energia potrzebna na pokrycie strat w układzie. Stanowisko badawcze zaprojektowano w taki sposób, aby można było do sterowania silnika BLDC wykorzystać sygnały pochodzące z hallotronów umieszczonych wewnątrz silnika lub z hallotronów umieszczonych na dodatkowej zewnętrznej tarczy [1], a także z 12-bitowego enkodera typu MAL 505-PA. W zaprojektowanym stanowisku wyróżnić należy trzy podstawowe moduły energoelektroniczne pozwalające na realizację założonych celów:

- komutator elektroniczny opcjonalnie doposażony w przetwornicę DC/DC,
- moduł stabilizacji prędkości układu napędowego do wartości zadanej,
- moduł stabilizacji momentu obciążenia do wartości zadanej.

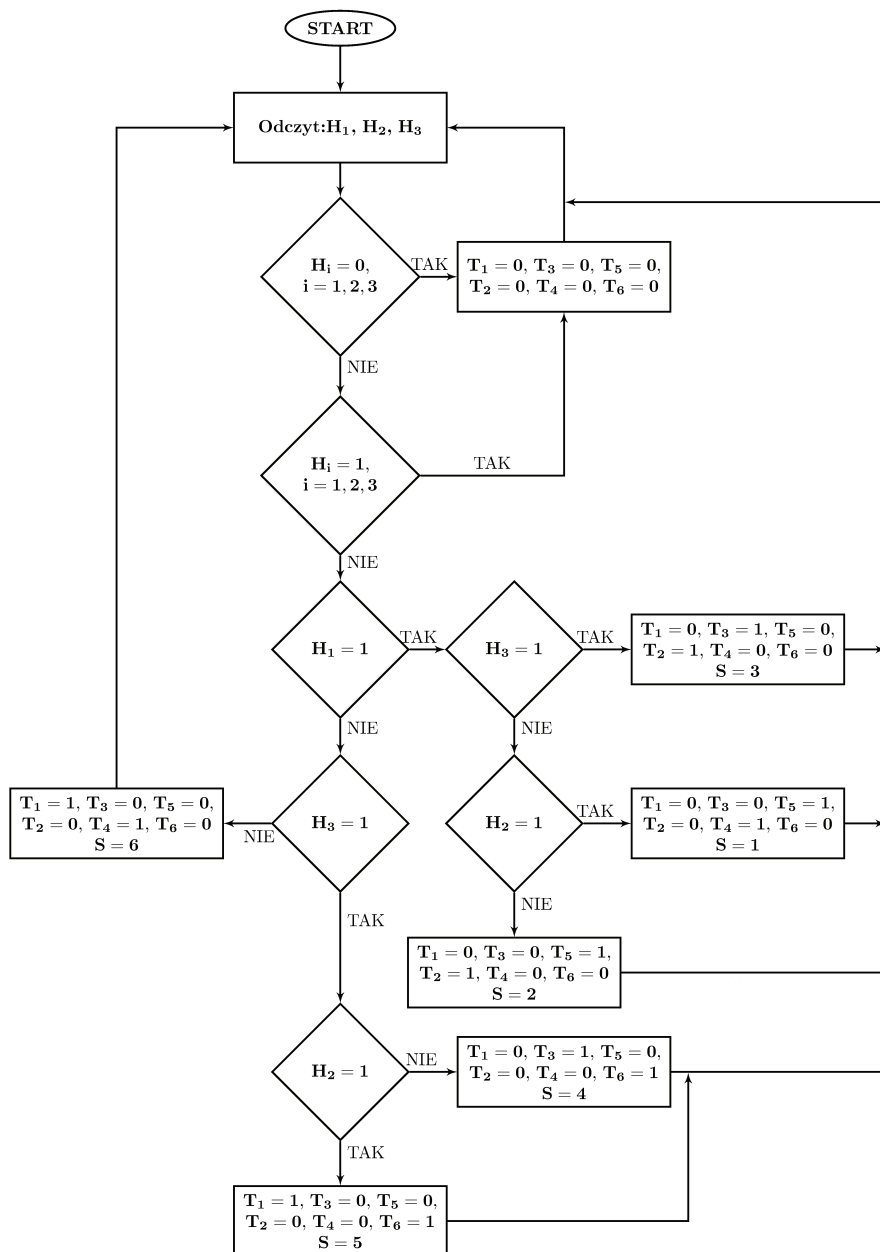
1.1. KOMUTATOR ELEKTRONICZNY

Komutator elektroniczny zbudowano w oparciu o układ mikroprocesorowy sterujący tranzystorami mocy w zależności od położenia wału silnika. Regulacja prędkości silnika odbywa się poprzez zmianę napięcia zasilania uzwojeń silnika, co realizowane jest poprzez modulację szerokości impulsów tranzystorów komutatora elektronicznego.



Rys. 1. Schemat blokowy układu zasilania silnika BLDC, składającego się z silnika BLDC, mikroprocesora, optoizolacji, komutatora elektronicznego, źródła zasilania i opcjonalnej przetwornicy DC/DC

Fig. 1. Block diagram of BLDC motor supply system, consisting of BLDC motor, microprocessor, optoisolation, electronic commutator, supply source and DC/DC converter (optional)



Rys. 2. Schemat blokowy programu realizowanego przez mikroprocesor komutatora elektronicznego, gdzie przez H_i , $i = 1, 2, 3$ oznaczono binarne sygnały z czujników hallotronowych określających położenie wału silnika, zaś przez T_j , $j = 1, \dots, 6$ oznaczono tranzystory mocy

Fig. 2. Block diagram of electronic commutator microprocessor program; H_i , $i = 1, 2, 3$ are binary signals from rotor position Hall sensors, T_j , $j = 1, \dots, 6$ are power transistors

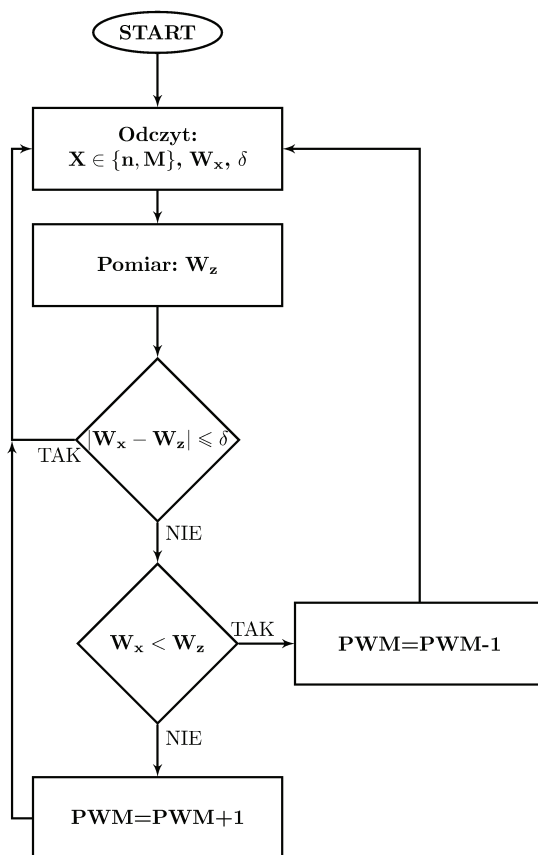
Innym sposobem regulacji prędkości jest zmiana napięcia zasilania komutatora elektronicznego realizowana poprzez dodatkową przetwornicę DC/DC. Schemat układu zasilania silnika BLDC z komutatorem elektronicznym i z opcjonalną przetwornicą DC/DC został przedstawiony na rysunku 1. Wysterowanie tranzystorów komutatora elektronicznego odbywa się w oparciu o algorytm programu wykonywanego przez mikroprocesor, którego schemat blokowy przedstawia rysunek 2. Program realizowany przez mikroprocesor działa w oparciu o sygnały pochodzące z czujników hallotronowych. W przypadku użycia enkodera do układu mikroprocesorowego sygnał położenia wału silnika dostarczany jest poprzez moduł konwertujący sygnał z enkodera na odpowiadające mu sygnały z czujników hallotronowych. Program napisano w taki sposób, aby w sytuacji awaryjnej wyłączał tranzystory mocy chroniąc układ przed uszkodzeniem.

1.2. MODUŁY: STABILIZACJI PRĘDKOŚCI I STABILIZACJI MOMENTU OBCIĄŻENIA

W celu zapewnienia powtarzalnych warunków pomiarowych stanowisko wyposażono w dwa układy stabilizacji. Pierwszy z nich ma za zadanie stabilizację prędkości obrotowej a drugi stabilizację momentu obciążenia.

Układ stabilizacji prędkości działa w oparciu o pomiar czasu obrotu wału silnika. Mikroprocesor porównuje czas obrotu wału silnika z wartością zadaną, gdzie przyjmuje się, że wartość zmierzona ma należeć do pewnego otoczenia wartości zadanej, określonego przez parametr δ_n , gdzie parametr ten ustawiono na poziomie 2% wartości zadanej. Takie kryterium porównania przyjęto, ze względu na specyfikę stanowiska (stabilizacja dwóch parametrów), niedokładność pomiarów oraz dyskretną skalę pomiarową procesu ciągłego. W przypadku, gdy kryterium porównania nie jest spełnione mikroprocesor koryguje współczynniki wypełnienia impulsów PWM tranzystorów komutatora elektronicznego, a przypadku układu zasilania z przetwornicą DC/DC koryguje napięcie wyjściowe przetwornicy.

Układ stabilizacji momentu działa w oparciu o pomiar napięcia wyjściowego z momentomierza zabudowanego na wale łączącym silnik z maszyną obciążającą. Sygnał z momentomierza po przetworzeniu przez przetwornik analogowo-cyfrowy zostaje porównany z wartością zadaną. Z tego samego powodu, co w przypadku stabilizacji prędkości wartość zmierzona ma należeć do otoczenia wartości zadanej, określonego przez parametr δ_M , gdzie parametr ten przyjmuje wartość odpowiadającą 2% wartości zadanej. Tym razem, gdy kryterium porównania nie jest spełnione mikroprocesor wpływa na zmianę obciążenia poprzez modyfikację szerokości impulsów PWM układu obciążającego prądnicę synchroniczną połączoną z wałem silnika. Program realizujący stabilizację zarówno prędkości jak i momentu obciążenia jest analogiczny i przedstawiony został na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy programu stabilizacji wielkości X , gdzie X oznacza prędkość obrotową (n) albo moment obciążenia (M), zaś W_x oznacza wartość zadaną odpowiednio prędkości obrotowej albo momentu obciążenia a W_z wartość zmierzona

Fig. 3. Block diagram of program governing stabilization of X quantity, X may be either rotational speed or load torque, is the pre-set value of either rotational speed or load torque, and is the measured value of respective quantity

2. BADANIA

W celu zweryfikowania poprawności działania stanowiska pod kątem stabilizacji momentu i prędkości wirowania przeprowadzono szereg badań polegających na sprawdzeniu powtarzalności uzyskania zadanych nastaw (prędkości wirowania i momentu obciążenia). Dla ustalonych nastaw kierunku i prędkości wirowania oraz momentu obciążenia wykonano pomiary prędkości wirowania i momentu obciążenia. Próby powtórzono 40 razy w celu zweryfikowania powtarzalności uzyskanych wyni-

ków. Rezultaty przedstawiono w tabeli 1, gdzie przez \bar{x} oznaczono średnią wartość zmierzoną w 40 próbach, przez s – odchylenie standardowe, a przez v – współczynnik zmienności. Badania przeprowadzono niezależnie dla każdego z kierunków wirowania ze względu na kalibrację zera momentomierza. Niedokładność ustawienia zera momentomierza w układzie pomiarowym bez rozróżnienia kierunku wirowania wprowadzałyby błąd niewynikający z możliwości regulacyjnych układu.

Tabela 1. Zestawienie danych statystycznych: \bar{x} średnia wartość mierzonej wielkości, s odchylenie standardowe, v współczynnik zmienności otrzymanych dla 40 prób, przy różnych nastawach momentu obciążenia i różnych nastawach prędkości wirowania z uwzględnieniem kierunku wirowania

Table 1. Review of statistical data: average value of measured quantity, s – standard deviation, v – variability coefficient 40 samples, obtained with different set load torques and rotational speeds and with direction of rotation considered

| | $k = 0$ | | | $k = 1$ | | |
|---------------|-----------|-------|---------|-----------|-------|---------|
| | \bar{x} | s | v [%] | \bar{x} | s | v [%] |
| n [obr/min] | 342,17 | 4,34 | 1,27 | 347,26 | 4,61 | 1,32 |
| M [Nm] | 4,36 | 0,16 | 3,71 | -4,50 | 0,08 | 1,87 |
| n [obr/min] | 692,34 | 3,84 | 0,55 | 690,60 | 4,09 | 0,59 |
| M [Nm] | 3,99 | 0,06 | 1,48 | -4,48 | 0,14 | 3,07 |
| n [obr/min] | 1015,74 | 26,29 | 2,59 | 1021,66 | 21,52 | 2,11 |
| M [Nm] | 4,15 | 0,12 | 2,97 | -3,94 | 0,08 | 2,01 |
| n [obr/min] | 337,35 | 2,59 | 0,77 | 347,16 | 4,79 | 1,38 |
| M [Nm] | 8,39 | 0,13 | 1,54 | -7,34 | 0,14 | 1,86 |
| n [obr/min] | 684,51 | 7,70 | 1,10 | 675,91 | 6,19 | 0,91 |
| M [Nm] | 8,29 | 0,21 | 2,55 | -8,37 | 0,05 | 0,64 |

3. WNIOSKI

Przeprowadzone liczne badania stanowiska zapewniającego możliwość stabilizacji prędkości wirowania oraz momentu obciążenia wykazały, że stanowisko spełnia postawione mu wymagania. Świadczą o tym wyniki zawarte w tabeli 1, gdzie każdorazowo dla próby polegającej na przeprowadzeniu 40 pomiarów weryfikujących wyregulowaną prędkość obrotową i moment obciążenia przy tych samych nastawach, otrzymano współczynniki zmienności na satysfakcjonującym poziomie 2,5% dla stabilizacji prędkości obrotowej i 3,7% dla stabilizacji momentu obciążenia. Tak zapro-

jektowane i zbudowane stanowisko pozwala między innymi na przeprowadzenie pomiarów sprawności silnika BLDC w zależności od prędkości obrotowej i momentu obciążenia dla różnych wariantów układu zasilania.

LITERATURA

- [1] SIKORA A., ZIELONKA A., *Wpływ położenia czujników hallotronowych na symetrię sygnałów sterujących silnikiem BLDC*, Pojazdy Szynowe, 3/2011, ISSN 0138-0370, s. 30–36.
- [2] SIKORA A., ZIELONKA A., *Ograniczenie strat mocy w silniku BLDC wynikających z pulsacji prądu zasilania*, Maszyny elektryczne, Zeszyty Problemowe, Nr 90/2011, PEMINE Komel, Ryto, maj 2010, ISSN 0239-3646, s. 205–212.
- [3] SIKORA A., ZIELONKA A., *Napęd łodzi motorowej z wykorzystaniem silnika bezszczotkowego zasilanego poprzez komutator elektroniczny*, Napędy i Sterowanie, ISSN 1507 7764, nr 2, 2010, s. 46–48.
- [4] GLINKA T., *Electric motors with permanent magnets*, Przegląd Elektrotechniczny, PL ISSN 0033-2097, nr 7/2008, s. 1–7.
- [5] SIKORA A., ZIELONKA A., *Układ zasilania silnika BLDC*, Zgłoszenie P-394971 z dn. 23.05.2011.

BLDC MOTOR TEST STAND WITH LOAD TORQUE AND SPEED SETTING

The research described in the current paper was conducted within the framework of the grant “Test stand for hybrid vehicle drive” financed by Ministry of Science and Higher Education, grant No. N N510 326637. It was necessary to measure efficiency of drive system for different variants of BLDC motor control, in order to ensure energy-saving operation of hybrid (electric) vehicle drive and, subsequently, maximization of vehicle range when motor is supplied from electrical energy accumulator. Such lab tests demand repeatability of measurement conditions. Factors influencing efficiency of drive system (transformation of accumulated electrical energy to mechanical energy at motor shaft) and resulting from required traction parameters are rotational speed and load torque. The issue formulated as given above requires construction of test stand which will ensure stabilization of rotational speed at previously set level as well as stabilization of load torque also at previously set level.