

## Układ napędowy z silnikiem z magnesami trwałymi o sinusoidalnym rozkładzie SEM

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono stanowisko do uruchamiania silników 3-fazowych z magnesami trwałymi o sinusoidalnym rozkładzie SEM umożliwiające pomiar charakterystyk mechanicznych silnika o napięciu znamionowym do 400V oraz prądzie znamionowym do 35A. Stanowisko laboratoryjne składa się z kilku połączonych ze sobą modułów sprzętowych: moduł procesora sygnałowego, moduł komunikacji z użytkownikiem, moduł optoizolacji, moduł pomiarowy, moduł falownika, moduł zasilania. W artykule przedstawione wybrane problemy związane z zakłóceniami. W ramach eksperymentów wyznaczona została charakterystyka momentu obciążenia w funkcji prędkości obrotowej w dwóch strefach regulacji.

**Abstract.** The paper presents the development station, which allows for experiments with 3-phase motors with permanent magnets with sinusoidal back-EMF. For example, the station allows for measuring the mechanical characteristics of the engine with nominal voltages up to 400V and nominal currents up to 35A. The station consists of several interconnected hardware modules: digital signal processor, communication module with the operating panel, measurement module, inverter module and power supply module. The paper presents several problems and solutions involving electromagnetic distortions. Experiments were performed to achieve the characteristic of the torque in function of the rotating speed. (**Propulsion system of permanent magnet motor with sinusoidal back-EMF**).

**Słowa kluczowe:** silnik z magnesami trwałymi, enkoder, sterowanie wektorowe, moment obrotowy.

**Keywords:** PMSM, encoder, field oriented control, torque.

doi:10.12915/pe.2014.01.36

### Wstęp

W grupie silników elektrycznych najwyższą sprawność i największy moment obrotowy mają silniki z magnesami trwałymi NdFeB [1]. Silniki elektryczne z magnesami trwałymi pozwalają na uproszczenie konstrukcji silnika. Stojan silnika jest zwykle podobny do stojana silników indukcyjnych, zaś wirnik zawiera magnesy trwałe naklejone w odpowiedni sposób, przy czym istnieją dwie podstawowe konstrukcje wirnika: z magnesami naklejonymi na powierzchni wirnika i z magnesami naklejonymi promieniowo (w użłobieniu wirnika) [1]. Najbardziej rozpowszechnione konstrukcje silników bezszczotkowych to: synchroniczny silnik bezszczotkowy PMSM (ang. Permanent Magnet Synchronous Motor) oraz silnik bezszczotkowy prądu stałego BLDC (ang. Brushless DC electric motor) [2,3].

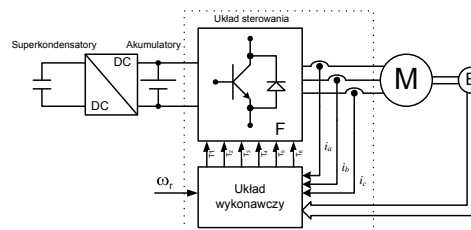
Uproszczona konstrukcja silników z magnesami trwałymi stanowi ich niepodważalną zaletę. Jednakże, ponieważ pozbawione są komutatora, ciężar sterowania przenosi się znacząco w kierunku elektronicznego sterowania silnikiem elektrycznym. Magnesy oraz uzwojenie twornika są umieszczone tak, by powstająca w wyniku rotacji SEM miała postać sinusoidalną w przypadku silników PMSM oraz prostokątną w przypadku silników BLDC. Układ sterowania musi umożliwiać zasilanie silników odpowiednio prądem sinusoidalnym i o charakterystyce trapezowej. Silniki z magnesami trwałymi, oprócz wysokiej sprawności i momentu obrotowego, cechują się małą masą, co ma duże znaczenie w przypadku projektowania pojazdów elektrycznych.

W artykule opisano prototypowe stanowisko laboratoryjne do uruchamiania silników z magnesami trwałymi. Stanowisko pozwala na badanie 3-fazowych silników z magnesami trwałymi o napięciu znamionowym do 400V oraz prądzie znamionowym do 35A. Stanowisko posłużyło do wykonania wielu eksperymentów. Do-konanie wielu różnych pomiarów w czasie rzeczywistym było możliwe między innymi dzięki interfejsowi JTAG procesora sygnałowego.

### Układ sterowania

Główny ciężar sterowania silnikiem z magnesami trwałymi spoczywa na elektronicznym układzie sterowania. Na wejście układu sterowania podawane są sygnały zadawane i pomiarowe (wewnętrzne): kąty między osią

strumienia wzbudzenia i osiami pasm uzwojenia, napięcia i prądy silnika. Układ sterowania analizuje te sygnały i przetwarza je sterując zespołem mocy falownika. Schemat blokowy takiego rozwiązania przedstawiono na Rys. 1. Zadaniem falownika F jest odpowiednie sterowanie kluczami tranzystorowymi T1-T6 typu IGBT na podstawie pomiarów prądów poszczególnych faz silnika  $i_a-i_c$  oraz sygnału z enkodera E. Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi zasilany jest napięciem stałym poprzez falownik z regulacją szerokości impulsów. Swoiste "serce" układu napędowego tworzy układ wykonawczy, którego zadaniem jest akwizycja danych oraz wyznaczenie nowych wartości napięć fazowych podawanych na uzwojenia silnika za pośrednictwem falownika F [4].



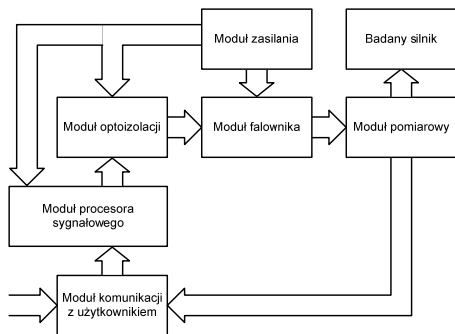
Rys.1. Schemat blokowy układu sterowania

### Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne składa się z kilku połączonych ze sobą modułów sprzętowych. Do podstawowych modułów zaliczają się:

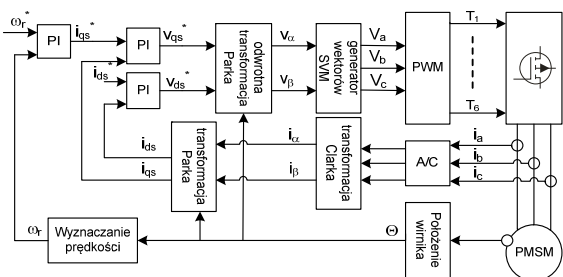
- moduł procesora sygnałowego,
- moduł komunikacji z użytkownikiem,
- moduł optoizolacji,
- moduł pomiarowy,
- moduł falownika,
- moduł zasilania.

Schemat blokowy badawczego stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na Rys. 2. Moduł procesora sygnałowego składa się z zestawu uruchomieniowego eZdspF2812 z procesorem sygnałowym TMS320F2812. Jednostka ta w swoim założeniu jest dedykowana do układów sterowania silnikami z magnesami trwałymi [6].



Rys.2. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego

Ze względu na zasoby sprzętowe procesora sygnałowego zaimplementowano cały algorytm sterowania wektorowego silnikiem PMSM (Rys. 3.) [4].



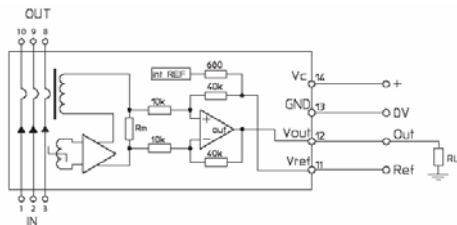
Rys.3. Schemat blokowy sterowania wektorowego

Jak można zauważyć, z zasobów sprzętowych procesora sygnałowego TMS320F2812 wykorzystano między innymi moduł PWM z wyjściami komplementarnymi, regulatory proporcjonalno-całkowe PI oraz przetwornik A/C. Do podłączenia enkodera E wykorzystano protokół SPI procesora sygnałowego TMS320F2812.

Moduł komunikacyjny z użytkownikiem zawiera klawiaturę i wyświetlacz LCD. Klawiatura służy do zadawania prędkości obrotowej jak i kierunku obrotu silnika. Wyświetlacz LCD pokazuje aktualną pozycję wału, prędkość zadaną, rzeczywistą prędkość obrotową. Na różnych etapach eksperymentów możliwe było "podglądanie" różnych parametrów układu sterowania.

Naturalnie część cyfrowa układu sterowania silnikiem została odizolowana galwanicznie od modułu falownika. Wykorzystano w tym celu optoizolację.

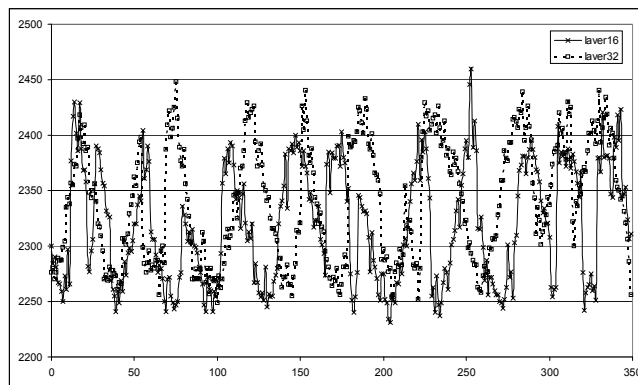
Moduł pomiarowy służy do pomiaru prądów fazowych silnika ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ) oraz do pomiaru kąta położenia wału silnika. W celu zmierzenia prądów fazowych zostały użyte przekładniki prądowe (ze wzmacniaczem pomiarowym) CASR 25-NP. Na Rys. 4 przedstawiono schemat blokowy zastosowanego przekładnika prądowego.



Rys.4. Schemat blokowy przetwornika CASR 25-NP [8]

Sygnał napięciowy z układu CASR 25-NP jest mierzony przez wewnętrzny przetwornik A/C procesora sygnałowego TMS32F2812. Przetwornik ten może pracować z maksymalną częstotliwością 50MHz, natomiast modulacja

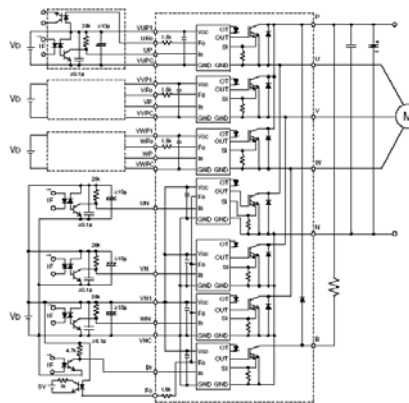
szerokości impulsów PWM pracuje z częstotliwością 8kHz. Z tego wynika, że przetwornik jest w stanie dokonać 6250 pomiarów. To pozwala na wprowadzenie uśredniania programowego, które pozwala wyeliminować zakłócenia "szpilkowe" pojawiające się podczas pomiaru prądów fazowych. Na Rys. 5 przedstawiono przebieg sygnału z przetwornika po-miarowego CASR 25-NP po zmierzeniu go przez wewnętrzny przetwornik A/C procesora sygnałowego TMS320F2812 oraz po wprowadzeniu uśredniania programowego z 16 oraz 32 próbek pomiarowych przy prędkości 700 obr/min [5].



Rys.5. Sygnal napięciowy z układu CASR 25-NP po zmierzeniu przez przetwornik A/C procesora po wprowadzeniu uśredniania programowego

Algorytm sterowania silnikiem PMSM wymaga obliczania aktualnego kąta położenia wału silnika. W przedstawionym stanowisku laboratoryjnym można wykorzystać dowolny enkoder absolutny. Do badań silnika PMSM wykorzystano 12-bitowy enkoder absolutny MAB28, który został podłączony do procesora sygnałowego za pomocą interfejsu SPI.

Moduł falownika to gotowy blok połączonych ze sobą sześciu tranzystorów IGBT. Jako moduł falownika wybrano moduł PM50RLA060. Schemat aplikacyjny podłączenia tego modułu przedstawiono na Rys. 6.



Rys.6. Schemat blokowy podłączenia modułu PM50RLA060

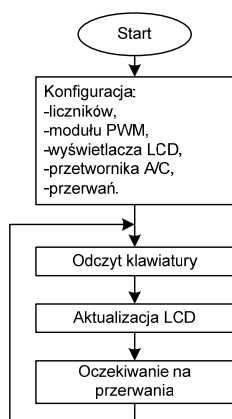
Ze względu na zastosowanie zalecanej optoizolacji konieczne jest zastosowanie złożonego modułu zasilania. W związku z tym wykonano zasilacz, który posiada cztery niezależne napięcia +15V oraz jedno napięcie +5V. Napięcia +15V zasilają transoptory natomiast napięcie +5V zasila część cyfrową układu sterowania. Zasilanie zespołu mocy falownika stanowi bateria akumulatorów o napięciu +48V.

## Oprogramowanie procesora sygnałowego

Oprogramowanie, jak już wcześniej wspomniano, zaimplementowano w procesorze sygnałowym TMS320F2812. Oprogramowanie to realizuje:

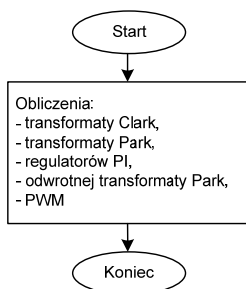
- odczyt z enkodera pozycji wału silnika,
- przeliczanie pozycji wału silnika na kąt obrotu wału,
- wyznaczenie prędkości obrotowej silnika,
- pomiar sygnału z przekładników CASR 25-NP,
- przeliczanie sygnałów napięciowych na wartości prądów,
- obsługa wyświetlacza LCD oraz klawiatury,
- obliczanie transformat Park, Clark,
- obliczanie odwrotnej transformaty Park,
- sterowanie modulacją PWM,
- obsługa liczników sprzętowych procesora sygnałowego,
- wykonywanie obliczeń regulatorów PI.

Na Rys. 7 przedstawiono schemat blokowy programu głównego.



Rys.7. Schemat blokowy programu głównego

Na Rys. 8 przedstawiono schemat blokowy programu obsługi przerwania z licznika 1 odpowiedzialnego za generację sygnału PWM.



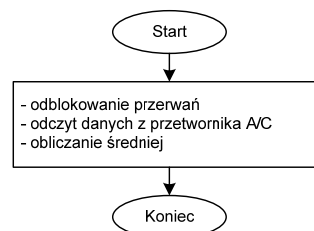
Rys.8. Schemat blokowy programu obsługi przerwania z timera 1

Na Rys. 9 przedstawiono schemat blokowy programu obsługi przerwania z timera 2 odpowiedzialnego za odczyt enkodera oraz za pomiar prędkości.



Rys.9. Schemat blokowy programu obsługi przerwania z timera 2

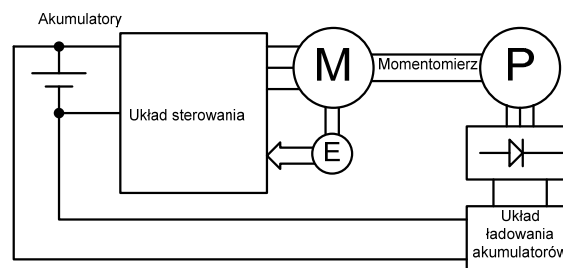
Na Rys. 10 przedstawiono schemat blokowy programu przerwania z przetwornika A/C odpowiedzialnego za pomiar sygnałów napięciowych z przetwornika CASR 25-NP.



Rys.10. Schemat blokowy programu obsługi przerwania z przetwornika A/C

## Wyznaczenie momentu obciążenia

Aby wyznaczyć zależność momentu obciążenia w funkcji prędkości obrotowej należy zadawać moment obciążenia i mierzyć prędkość obrotową. Największym problemem jest bezpośredni pomiar momentu obciążenia. Dobrym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie momentomierza zakładanego na wał silnika. Momentomierz daje sygnał napięciowy proporcjonalny do momentu obciążenia. Schemat blokowy przedstawiono na Rys. 11.



Rys.11. Schemat blokowy układu pomiarowego

Na wspólnym wale sprzęgnięty jest silnik badany M, momentomierz oraz prądnica P. Prądnicę P stanowi 3-fazowy silnik BLDC o mocy 1 kW. Prądnicę pośrednio służy do zadawania momentu obciążenia. Odbywa się to poprzez prostowanie napięcia trójfazowego i ładowanie tym napięciem akumulatorów. Układ ładowania akumulatorów odpowiedzialny jest za wartość prądu ładującego akumulatory, co bezpośrednio wpływa na wartość momentu obciążenia.

## Wyniki eksperymentalne

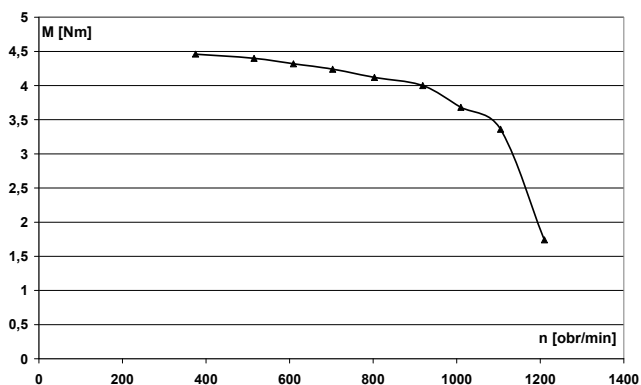
Do badań eksperymentalnych wybrano 3-fazowy silnik bezszczotkowy PMSM, którego specyfikacja została podana w tabeli 1. Silnik ten, co warto podkreślić, posiada magnesy naklejone na powierzchni wirnika. Powoduje to, że silnik w zasadzie nie ma sinusoidalnej siły elektromotorycznej, a jedynie zbliżoną do sinusoidalnej.

Tabela 1. Specyfikacja silnika PMSM

Liczba par biegunów	3
Prąd znamionowy	14A
Napięcie znamionowe	48V
Moment znamionowy	4Nm
Prędkość znamionowa	900obr/min
Prąd maksymalny	25A
Moc znamionowa	500W

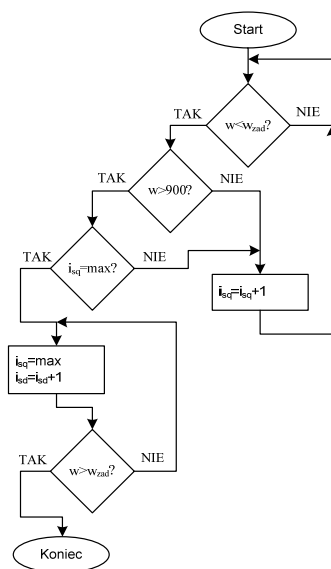
Do wyznaczenia zależności momentu obciążenia w funkcji prędkości obrotowej posłużono się schematem blokowym przedstawionym na Rys. 11. Pomiary odbywały się w dwóch strefach regulacji. W pierwszej strefie do

prędkości znamionowej 900 obr/min, a w drugiej strefie regulacji do prędkości 1200 obr/min. Badania polegały na zadawaniu prędkości obrotowej silnika i na zadawaniu momentu obciążenia za pomocą zmiany prądu ładowania akumulatorów. Zmiana prądu ładowania akumulatorów jak już wcześniej wspomniano wpływała bezpośrednio na moment obciążenia. Ze względu na przesunięcie punktu zera momentomierza wykonano badania w obu kierunkach wirowania silnika i wyznaczono średni moment obciążenia. Na Rys. 12 przedstawiono eksperymentalnie wyznaczoną zależność momentu obciążenia silnika w funkcji jego prędkości obrotowej.



Rys.12. Zależność momentu obciążenia w funkcji prędkości obrotowej

W pierwszej strefie regulacji (praca ze stałym momentem) regulacja prędkości odbywa się do prędkości znamionowej (900 obr/min) poprzez zwiększanie prądu  $i_{qs}$  aż do osiągnięcia maksymalnej wartości współczynnika wypełnienia PWM. W tej strefie, co warto podkreślić, prąd  $i_{sd}=0$ . Chcąc sprawdzić działanie silnika w drugiej strefie regulacji należy odzwzudzać silnik poprzez zwiększanie prądu  $i_{sd}$ , aż do osiągnięcia zadanej prędkości obrotowej. Odbywa się to oczywiście kosztem zmniejszenia momentu obciążenia silnika. Algorytm został przedstawiony na Rys. 13.



Rys.13. Schemat blokowy zastosowanego algorytmu

## Wnioski

W artykule przedstawiono stanowisko do uruchamiania silników 3-fazowych z magnesami trwałymi o sinusoidalnym rozkładzie SEM umożliwiające pomiar charakterystyk mechanicznych silnika o napięciu znamionowym do 400V oraz prądzie znamionowym do 35A. W celu sprawdzenia zaproponowanego stanowiska oraz zaproponowanego algorytmu przeprowadzono wyniki badań eksperymentalnych 3-fazowego synchronicznego silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi o sinusoidalnym rozkładzie SEM z magnesami zamontowanymi powierzchniowo na wirniku. Główny nacisk położono na eksperymentalne wyznaczenie charakterystyki moment-prędkość w obu strefach regulacji. Poprzez odzwzudzenie silnika udało się uzyskać prędkość obrotową jedynie o 30% większą od prędkości znamionowej silnika. Efekt ten uzyskano dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu procesora, co pozwoliło na przesunięcie kąta między wektorem strumienia i prądu a tym samym pracę silnika w drugiej strefie (praca przy odzwzudzeniu).

## LITERATURA

- [1] Krishan R., Electric motor drives modeling, analysis and control, *Prentice Hall*, 2001.
- [2] Sikora A., Zielonka A., *Stanowisko do badania silnika BLDC z możliwością zadania prędkości i momentu obciążenia*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66, Studia i Materiały Nr 32, 2012r. ISSN 1733-0718, 291-297.
- [3] Glinka T., *Silniki elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 7/2008
- [4] Rudnicki T., Czerwiński R., *Wykorzystanie procesora sygnałowego do sterowania silnikiem z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 2/2013, 259-263
- [5] Rudnicki T., Czerwiński R., *Pomiar prądów fazowych silnika z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 97/2012, 57-61
- [6] Texas Instruments, *TMS320F2812 Data Manual*, May 2012
- [7] Mitsubishi Electric, *PM50RLA060 Data Manual*, May 2005
- [8] LEM, *Current Transducer CASR series Data Manual*, March 2012

**Autorzy:** dr inż. Tomasz Rudnicki, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: [tomasz.rudnicki@polsl.pl](mailto:tomasz.rudnicki@polsl.pl); dr inż. Robert Czerwiński, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: [robert.czerwinski@polsl.pl](mailto:robert.czerwinski@polsl.pl); dr inż. Andrzej Sikora, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: [andrzej.sikora@polsl.pl](mailto:andrzej.sikora@polsl.pl);