

Aleksander Bodora, Tomasz Biskup, Arkadiusz Domoracki, Politechnika Śląska, Gliwice
Henryk Kołodziej, Enel, Gliwice

MIKROPROCESOROWY SYSTEM STEROWANIA NAPĘDU Z SILNIKAMI PRĄDU STAŁEGO BEZSZCZOTKOWYMI STEROWANYMI SINUSOIDALNIE

MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Abstract: An implementation of sinusoidal current control of a 60 kW Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) is presented. The drive system consists of brushless AC motor driven by PWM converter. This system is designed for mining locomotive drive. The basic principles of PMSM motor field-oriented control and Digital Signal Controller implementation are presented. As the main control system, TMS 320F2812 microcontroller is used. Some features and advantages of applied microprocessor also presented. Examples of laboratory tests have been included in the paper in order to illustrate the operation of the designed drive system.

1. Wstęp

W ostatnich dwóch dekadach następował burzliwy rozwój napędów z silnikami indukcyjnymi prądu przemiennego. Dostępność tranzystorów mocy (np. IGBT) oraz rozwój techniki mikroprocesorowej, sprawiły, że silniki indukcyjne klatkowe zasilane z przekształtników MSI, zdominowały napędy o regulowanej prędkości. Wysoka sprawność i niezawodność przekształtników mocy oraz coraz doskonalsze metody sterowania pozwalają uzyskiwać wysoko-sprawne napędy o bardzo korzystnych właściwościach ruchowych.

Wydaje się, że dalszy postęp w dziedzinie napędów regulowanych będzie związany z nowymi konstrukcjami silników.

Potwierdzeniem tego może być obserwowany w ostatnich latach wzrost zainteresowania, zarówno konstruktorów jak i użytkowników, napędami z silnikami bezszczotkowymi wzbudzonymi magnesami trwałymi. Radykalny postęp technice materiałowej spowodował znaczne obniżenie cen magnesów trwałych, dzięki czemu maszyny tego typu mogą być konkurencyjne pod względem ekonomicznym z silnikami indukcyjnymi. Niezaprzeczalnie zalety tego typu silników, do których można zaliczyć:

- bardzo dużą sprawność,
- liniową charakterystykę mechaniczną,
- korzystny współczynnik rozwijanego momentu do gabarytów,
- małe mechaniczne stałe czasowe,
- dużą przeciążalność oraz możliwość rozwijania momentu w czasie postoju

sprawiają, że już obecnie **panuje przekonanie, iż napędy z silnikami bezszczotkowymi w niedalekiej przyszłości będą zastępować silniki indukcyjne klatkowe.**

Szczególnie ważną gałęzią przemysłu, w której upatruje się dużych możliwości aplikacyjnych napędów z silnikami bezszczotkowymi, są napędy trakcyjne.

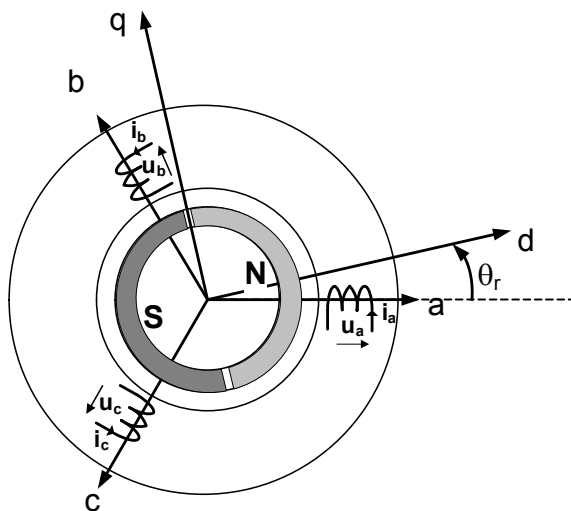
2. Cel pracy

Celem pracy były: budowa i uruchomienie mikroprocesorowego układu sterowania silnika z magnesami trwałymi o sinusoidalnej sile elektromotorycznej i mocy ok. 60 kW. Prace te prowadzone były w związku z projektowaniem napędu lokomotywy kopalnianej.

Niniejszy artykuł pokazuje dalszy etap działań przedstawionych wcześniej w pracy [1]. W jego ramach przygotowano silnik o docelowej konstrukcji, przekształtnik energoelektroniczny oraz dedykowany układ sterowania

3. Sterowanie silnikami bezszczotkowymi

W przypadku sterowania silników o sinusoidalnym rozkładzie SEM, wykorzystuje się opis maszyny trójfazowej, w nieruchomym względem wirnika układzie współrzędnych dq rys.1.



Rys.1. Układ przestrzenny uzwojeń stojana oraz nieruchomy względem wirnika układ odniesienia dq dla silnika synchronicznego o magnesach trwałych

Dla silników z magnesami naklejonymi na powierzchni wirnika zakłada się na ogół równość indukcyjności w obydwu osiach, a więc spełniony jest warunek: $L_q=L_d$. Wynika to z faktu, że przewodność magnetyczna magnesów otrzymywanych z pierwiastków ziem rzadkich jest w przybliżeniu równa przewodności magnetycznej powietrza.

W trakcie realizacji sterowania wektorowego, zazwyczaj przyjmuje się że $I_{d\text{zad}}=0$, dzięki czemu moment silnika, podobnie jak w maszynie prądu stałego, jest liniową funkcją prądu twornika. Niezerowa wartość prądu w osi d ($I_d < 0$) jest jedynie uzasadniona w przypadku pracy z prędkością $\omega > \omega_n$, przy pracy ze stałą mocą w strefie osłabionego strumienia [3].

Dla opisu silnika w układzie współrzędnych dq, korzystną metodą sterowania tranzystorami przekształtnika jest metoda modulacji wektora przestrzennego [2]. Dzięki tej metodzie możliwa jest do osiągnięcia znacznie wyższa wartość pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego, od napięcia uzyskiwanego w modulacji z sygnałem nośnym (jeśli sygnał modulujący jest monoharmoniczny).

W wyniku sterowania metodą wektora przestrzennego, wektor napięcia wiruje z zadaną prędkością kątową. Przy zasilaniu silnika z trójfazowego falownika napięcia można otrzymać osiem wektorów napięcia, w tym dwa zerowe, w zależności od stanu poszczególnych zaworów przekształtnika. Dobór poszczególnych wektorów, przy założonym stałym okresie impulsowania

wania powinien doprowadzić do osiągnięcia minimum pulsacji prądu przy minimalnej częstotliwości przełączeń. Przyjęto, że okres impulsowania jest wartością stałą, niezależnie od częstotliwości wyjściowej falownika. Przy odpowiednio wysokiej wartości częstotliwości przełączania nie ma to wpływu na stabilność pracy układu napędowego.

4. Układ napędowy

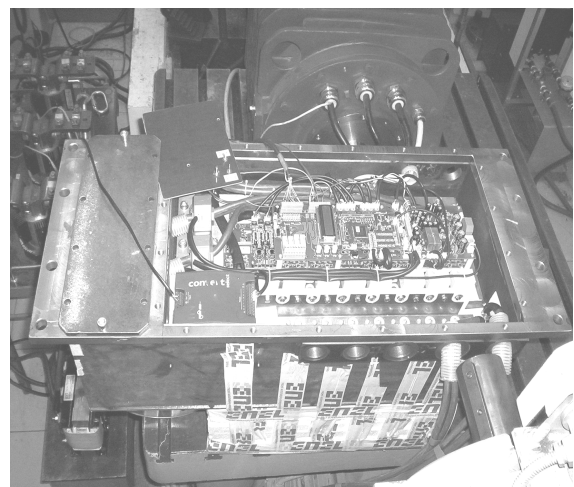
Układ napędowy składał się z silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM) zbudowanego przez BOBRME KOMEL, oraz falownika napięcia MSI.

Silnik typu PMPg250L został zbudowany jako zamiennik do istniejących silników prądu stałego, stosowanych obecnie w lokomotywach kopalnianych.

Do zasilania silnika zastosowany został falownik napięcia MSI firmy ENEL, przystosowany do wymogów pracy napędu. Pomiedzy falownik i silnik został włączony dławik o niewielkiej wartości indukcyjności.

Falownik został zbudowany w oparciu o tranzystory IGBT firmy EUPEC ECONO + FS 450R12KE3 [5]. Każdy półmostek falownika tworzy jeden odpowiednio połączony moduł. Urządzenie jest wyposażone w układ hamulca, umożliwiający rozpraszenie energii w czasie hamowania odzyskowego. Jest to podyktowane wymaganiami układu, w którym napęd ma być zastosowany. Docelowy falownik napięcia przedstawiono na rys.2.

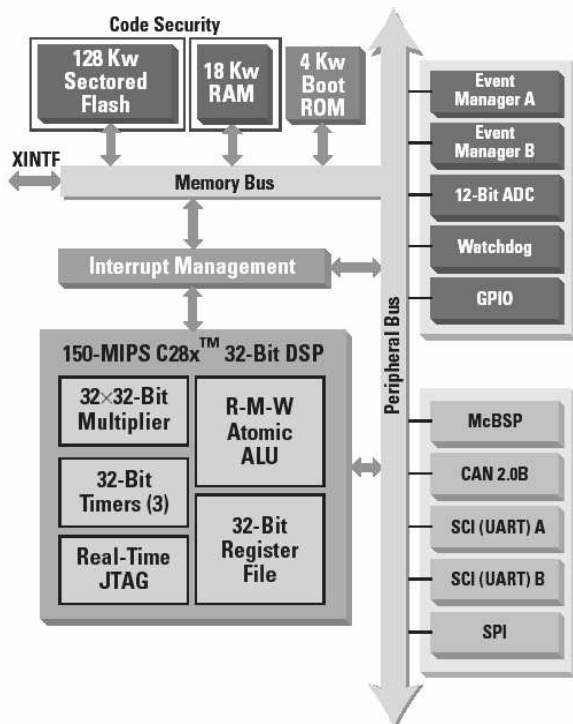
Układ sterowania napędu zrealizowano na bazie mikrokontrolera sygnałowego TMS320F2812.



Rys.2. Falownik napięcia MSI przeznaczony do napędu lokomotywy kopalnianej

5. Układ sterowania

Do sterowania falownika zastosowano nowoczesny układ mikrokontrolera sygnałowego (Digital Signal Controller DSC) firmy Texas Instruments TMS 320F2812 [4]. Schemat blokowy tego układu pokazano na rys.3.



Rys.3. Schemat blokowy układu TMS 320F2812

Charakterystyczne jest tu połączenie rdzenia jednostki centralnej procesora sygnałowego DSP rodziny C2xxx z układami peryferyjnymi. Układy peryferyjne pozwalają na uproszczenie struktury systemu mikroprocesorowego i obsługę wszystkich najważniejszych zadań. Układ zawiera 128k słów 16-bitowych pamięci FLASH i 18k słów pamięci RAM. W przestrzeni adresowej umieszczono także pamięć ROM, zawierającą procedury uruchamiania systemu oraz tablice wspomagające obliczanie pewnych funkcji, w tym trygonometrycznych. Producent udostępnia biblioteki procedur matematycznych, które pozwalają na wykonywa-

nie obliczeń matematycznych z wykorzystaniem tych tablic.

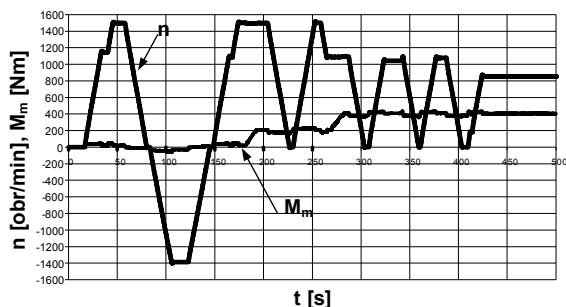
Wśród układów peryferyjnych należy wyróżnić dużą grupę, realizującą różne formy komunikacji szeregowej asynchronicznej (dwa niezależne SCI, CAN) oraz synchronicznej (SPI). Pozwalają one nie tylko na łatwą organizację komunikacji w systemach sterowania hierarchicznego, ale także na przyłączenie do systemu dodatkowych układów peryferyjnych za pomocą magistrali szeregowych synchronicznych (przetworniki A/C, C/A, pamięć EEPROM).

Dla właściwego układu sterowania najważniejsze znaczenie mają: 16-kanalowy, 12-bitowy przetwornik A/C oraz dwa układy licznikowe EVA i EVB.

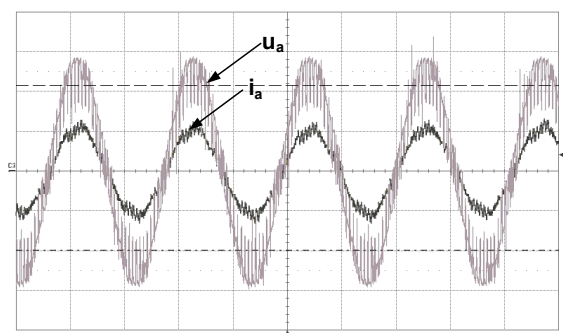
Schemat blokowy układu sterowania układu napędowego został przedstawiony na rys. 4.

Mierzone są dwa prądy fazowe silnika, napięcie w obwodzie napięcia stałego falownika, temperatura stojana silnika oraz wartość zadana prędkości. Praca przetwornika jest synchronizowana z przełączeniami zaworów.

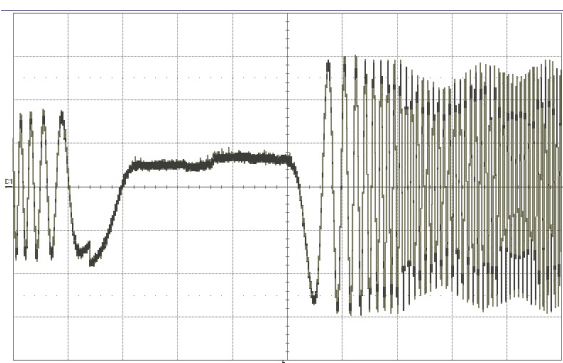
Do ich sterowania wykorzystano układ licznikowy EVA. Składa się on z dwóch liczników 16-bitowych, trzech komparatorów cyfrowych, toru obsługi zdarzeń zewnętrznych, interfejsu do impulsów enkodera oraz układu sterowania. Z powodu wcześniej wymienionych zalet zastosowano algorytm modulacji wektorowej, której mechanizm jest wbudowany w układy EVA i EVB. Algorytm ten należy do grupy modulacji wektorowych nieciągłych (DPWM) o ograniczonej liczbie przełączeń w cyklu [2]. Oznacza to obniżoną wartość strat przełączeniowych w zaworach falownika. Analiza strat w silniku zasilanym z falownika tak sterowanego, pochodzących od wyższych harmonicznych, wskazuje, że przy tej samej częstotliwości przełączania straty te będą wyższe dla modulacji DPWM, niż dla klasycznego układu wektorów w sekwencji.



Rys.5. Przebieg momentu obciążenia i prędkości obrotowej silnika



Rys.6. Przebiegi prądu fazowego silnika i_a (100 A/div, 1s/div) oraz napięcia fazowego silnika u_a (50 V/div, 1s/div)



Rys.7. Przebiegi prądu fazowego silnika w czasie zatrzymania silnika obciążonego i ponownego rozruchu (20 A/div, 1s/div)

8. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki prac wdrożeniowych systemu sterowania silnikami bezszczotkowymi o sinusoidalnej SEM rotacji. Prace te prowadzone były w związku z projektowaniem napędu lokomotywy kopalnianej. Opracowany układ sterowania bazuje na mikrokontrolerze sygnałowym TMS 320F2812. Układ ten posiada szereg właściwości, które predestynują go do aplikacji sterowania przekształtników energoelektronicznych.

Uzyskane wyniki pokazują, że napęd taki ma bardzo dobre właściwości regulacyjne i energo-

tyczne, pozwalające na zastosowanie w układach wymagających rozwinięcia dużego momentu, także przy małej lub zerowej prędkości obrotowej.

9. Literatura

- [1]. Bodora A., Domoracki A., Biskup T., Kołodziej H., Budzyński Z.: Badania układu napędowego z silnikiem bezszczotkowym (PMSM) o mocy 20kW, Zeszyty Problemowe - BOBRME Komel - Maszyny elektryczne Zeszyty problemowe Nr 71, Katowice 2005.
- [2]. Holmes D.G., Lipo T.A. : Pulse Width Modulation for Power Converters. Principles and Practice, IEEE Press- John Wiley & Sons Inc, NY USA 2003.
- [3]. Zawirski K.: Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005
- [4]. Texas Instruments : TMS320F2810, TMS320F2811, TMS320F2812, TMS320C2810, TMS320C2811, TMS320C2812 Digital Signal Processors Data Manual, TI 2004.
- [5]. Technische Information/ technical information FS450R12KE3, EUPEC,

Autorzy

Dr inż. Aleksander Bodora

Dr inż. Tomasz Biskup

Mgr inż. Arkadiusz Domoracki

Politechnika Śląska w Gliwicach

Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki

44-100 Gliwice, ul. B. Krzywoustego 2

Dr inż. Henryk Kołodziej

ENEL Spółka z o.o.

44-101 Gliwice, ul. Gen. J. Sowińskiego 3