

Piotr TOKARZ  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych  
Politechniki Śląskiej

## ZASTOSOWANIE PROCESORÓW SYGNAŁOWYCH W UKŁADACH KSZTAŁTOWANIA WŁAŚCIWOŚCI MASZYN PRĄDU PRZEMIENNEGO

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono opis uniwersalnego sterownika mikroprocesorowego TMS320F240 Evaluation Module wykorzystującego procesor sygnałowy TMS320F240 firmy Texas Instruments przeznaczonego do sterowania silnikami elektrycznymi. Sterownik ma architekturę otwartą, co umożliwia jego łatwą rozbudowę i adaptację do różnych algorytmów sterowania. Ponadto w pracy przedstawiono wyniki badań właściwości silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi zasilanego z mikroprocesorowego układu sterowania.

## APPLICATION OF SIGNAL PROCESSORS TO SYSTEMS OF FORMATION OF AC MACHINE PROPERTIES

**Summary.** This paper presents a description of the TMS320F240 Evaluation Module universal microprocessor controller for control of electric motors. The controller uses the TMS320F240 digital signal processor of Texas Instruments company. The open architecture of the controller allows developing and adapting it for different tasks. The results of investigations of the brushless motor properties are presented in the paper, as well. The motor was supplied from the microprocessor control system.

### 1. UWAGI WSTĘPNE

Dynamiczny rozwój energoelektroniki stwarza możliwości coraz szerszego wykorzystania silników prądu przemiennego w układach przemysłowych. Układy przekształtnikowe umożliwiają bowiem dowolne kształtowanie warunków zasilania silnika, przez co jest możliwe praktycznie dowolne kształtowanie jego własności statycznych i dynamicznych. Równoczesna ekspansja nowych technologii w elektronice i automatyce umożliwia budowę coraz szybszych układów sterowania tymi maszynami.

Stąd też w Katedrze Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej zrodziła się koncepcja zastosowania procesora sygnałowego do:

- generacji impulsów prostokątnych o stałej częstotliwości i modulowanej szerokości przydatnych do sterowania przekształtnikowym źródłem zasilania uzwojeń maszyny elektrycznej prądu przemiennego,
- realizacji różnych algorytmów sterowania i regulacji maszynami elektrycznymi.

Wyposażając procesor sygnałowy w odpowiednie układy peryferyjne, takie jak: tory pomiarowe z zabezpieczeniami (do pomiaru napięć, prądów, prędkości obrotowej, temperatury, itd.), zasilacze, wyjściowe tory analogowe i cyfrowe przystosowane np. do bezpośredniego sterowania przekształtnikowym źródłem zasilania, otrzymuje się układ nazywany sterownikiem mikroprocesorowym. Sterownik mikroprocesorowy, poprzez człon dopasowujący („interfejs”), steruje przekształtnikiem mocy zasilającym silnik elektryczny [6].

Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej dysponuje profesjonalnym sterownikiem mikroprocesorowym, wykorzystującym procesor sygnałowy TMS320F240. Jego zaletą jest uniwersalność zastosowania oraz otwarta architektura, która umożliwia łatwą rozbudowę i adaptację do nowych potrzeb. Struktura sterownika umożliwia wykonywanie, a tym samym badanie różnych algorytmów sterowania, dla różnych rodzajów i typów silników elektrycznych. Sterownik ten wykorzystano do sterowania silnikiem uniwersalnym z magnesami trwałymi typu PITTMAN.

W niniejszej pracy przedstawiono schemat blokowy mikroprocesorowego sterownika przystosowanego do sterowania bezszczotkowym silnikiem z magnesami trwałymi typu PITTMAN oraz wyniki badań właściwości tego układu.

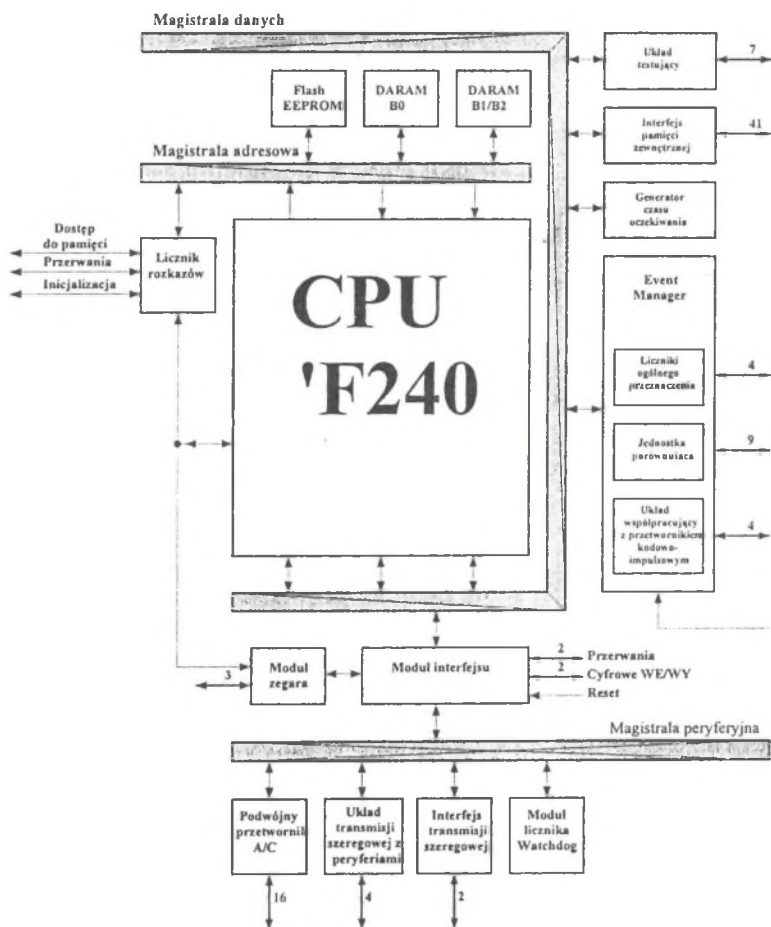
## 2. OPIS SYSTEMU MIKROPROCESOROWEGO WYKORZYSTUJĄCEGO PROCESOR SYGNAŁOWY TMS320F240

Procesor sygnałowy TMS320F240 jest 16-bitowym procesorem stałoprzecinkowym produkowanym przez firmę Texas Instruments [1]. Należy on do rodziny procesorów oznaczonej TMS320 służących przede wszystkim do sterowania maszynami elektrycznymi.

Elementy wewnętrzne procesora TMS320F240 są skomponowane w następujące bloki (rys.1):

- rdzeń procesora - CPU;
- mapa pamięci: ogólna mapa pamięci, pamięć wewnętrzną procesora;
- peryferia wewnętrzne: interfejs pamięci zewnętrznej, moduł Event Manager, podwójny przetwornik A/C, układ transmisji szeregowej do komunikacji z peryferiami, interfejs transmisji szeregowej, moduł Watchdog Timer i RTI;

- układy dodatkowe: układ cyfrowych wejść/wyjść, układ resetu i przerwań, generator zegarowy, tryby obniżonego poboru mocy.



Rys.1. Struktura układu sterowania oparta na procesorze TMS320F240

Fig.1. Internal structure of TMS320F240 processor

Dzięki swej budowie i właściwościach procesor sygnałowy TMS320F240 doskonale nadaje się do sterowania silnikami elektrycznymi. Jedną z wyróżniających go cech jest wbudowany w procesor moduł Event Manager, który jest zbiorem urządzeń wysoko wyspecjalizowanych, stosowanych przede wszystkim w sterowaniu silnikami elektrycznymi. Moduł Event Manager ma 18 zacisków (pinów) we/wy:

- 3 wyjścia (T1PWM/T1CMP÷T3PWM/T3CMP) z komparatorów liczników ogólnego przeznaczenia;

- 6 wyjść (PWM1/CMP1÷PWM6/CMP6) z komparatora realizującego modulację szerokości impulsów dwustronną (symetryczną);
- 3 wyjścia (PWM7/CMP7÷PWM9/CMP9) z komparatora realizującego modulację szerokości impulsów jednostronną (asymetryczną);
- 4 wejścia (CAP1/QEP1, CAP2/QEP2, CAP3, CAP4) układu przechwytywania lub układu współpracującego z przetwornikiem kodowo-impulsowym;
- 1 wejście (TMRCLK) zegarowe dla liczników ogólnego przeznaczenia pracujących w trybie zliczania impulsów zewnętrznych;
- 1 wejście (TWMDIR) kierunku liczenia liczników.

Wyjścia PWM wykorzystywane są bezpośrednio lub poprzez moduł mocy do zasilania uzwojeń badanego silnika. Pozostałe zaciski modułu Event Manager są wewnętrzną częścią procesora wykorzystywaną do generowania określonych programowo sygnałów w celu poprawnego działania układu.

Dla procesora TMS320F240 firma Technosoft [3] zbudowała zestaw uruchomieniowy nazwany Evaluation Module. Zestaw ten posiada:

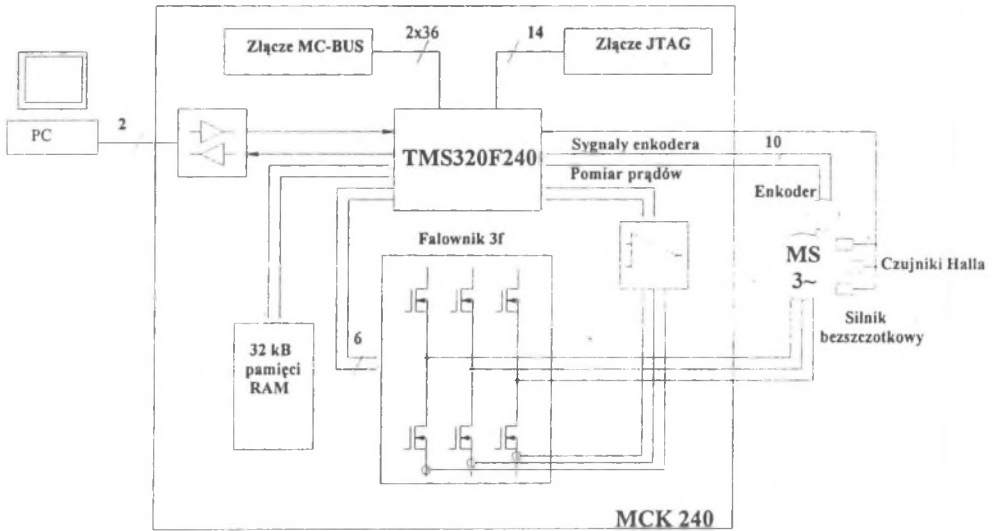
- kartę MCK240 (rys.2), która zawiera:

- procesor TMS320F240;
- zewnętrzną pamięć statyczną RAM;
- czterokanałowy, 12-bitowy przetwornik C/A;
- port komunikacyjny RS-232;
- port emulacji XDS510/XDS510PP;
- 8 odwzorowanych w pamięci portów wejścia/wyjścia przełączników;
- 8 odwzorowanych w pamięci portów wejścia/wyjścia diod LED;

- oprogramowanie Mcwin zawierające:

- emulator, zestaw oprogramowania i dokumentację.

Na rys.2 przedstawiono schemat blokowy karty MCK240 z dołączonym badanym silnikiem oraz komputerem służącej do komunikacji programowej. Złącze JTAG jest portem emulacji XDS510. Magistrała MC-BUS zawiera podstawowe sygnały wejścia/wyjścia wymagane przy sterowaniu silnikami prądu przemiennego, stałego oraz silnikami krokowymi. Encoder jest przetwornikiem kodowo-impulsowym służącym do określenia prędkości obrotowej silnika oraz położenia wirnika. Pozostałe elementy karty MCK240 realizują funkcje zgodne z ich nazwą. Układ ten realizuje w pełni funkcję sterowania silnikiem wykorzystując dwa zaimplementowane programy, które pozwalają na zasilanie silnika jako maszyny prądu przemiennego lub prądu stałego. Ponadto istnieje możliwość dołączenia modułu mocy do zestawu MCK240, który pozwoli zasilać silniki o większym prądzie znamionowym.



Rys.2, Schemat blokowy karty MCK240 Evaluation Module  
 Fig.2. Block diagram of MCK240 Evaluation Module

Zestaw TMS320F240 Evaluation Module gwarantuje pełne wykorzystanie możliwości procesora sygnałowego, tzn. jest możliwe nie tylko wykorzystanie samego procesora, ale również testowanie różnych algorytmów sterowania. Oprogramowanie Mcwin, dostarczone przez producenta, zawiera gotowe oprogramowanie dla:

- sterowania cyfrowego silnikiem prądu przemiennego /BLAC – brushless motor AC/,
- sterowania cyfrowego silnikiem prądu stałego /BLDC – brushless motor DC/.

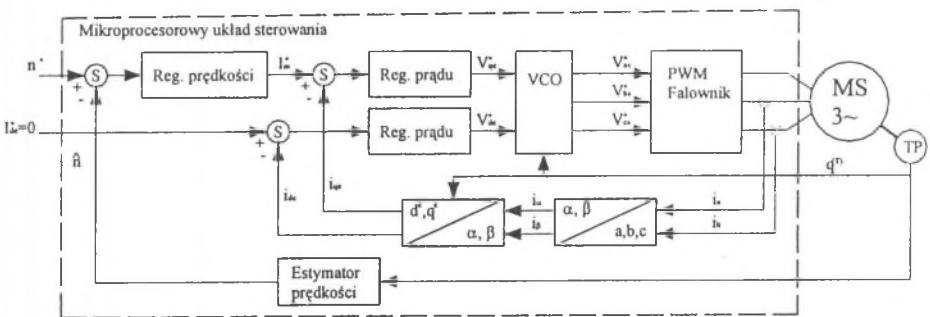
Oprogramowanie BLAC i BLDC jest przystosowane dla użytkowników o różnym przygotowaniu teoretycznym:

- dla użytkowników początkujących: użytkownik może jedynie modyfikować parametry regulatorów (np. współczynniki regulatora, czas próbkowania) oraz może obserwować przebiegi ilustrujące zjawiska zachodzące w maszynie;
- dla użytkowników zaawansowanych: użytkownik może wprowadzać własne algorytmy działania regulatorów, może więc koncentrować wysiłek na znajdowaniu nowych algorytmów sterowania (np. w układach bezczujnikowych, optymalizujących sterowanie, itd.).

### 3. WYNIKI BADAŃ UKŁADU STEROWANIA SILNIKA BEZSZCZOTKOWEGO BRUSHLESS AC ORAZ BRUSHLESS DC

Badany silnik PITTMAN jest bezszczotkowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi umieszczonymi na rdzeniu wirnika i z uzwojeniem w rdzeniu stojana [4]. W takim silniku moment elektromagnetyczny jest wynikiem elektrodynamicznego oddziaływania pola magnetycznego magnesów trwałych i prądu płynącego w uzwojeniu stojana. Badany silnik bezszczotkowy z magnesami trwałymi jest zasilany poprzez modul mocy z układu sterowania typu Brushless AC (rys.3) lub Brushless DC (rys.4).

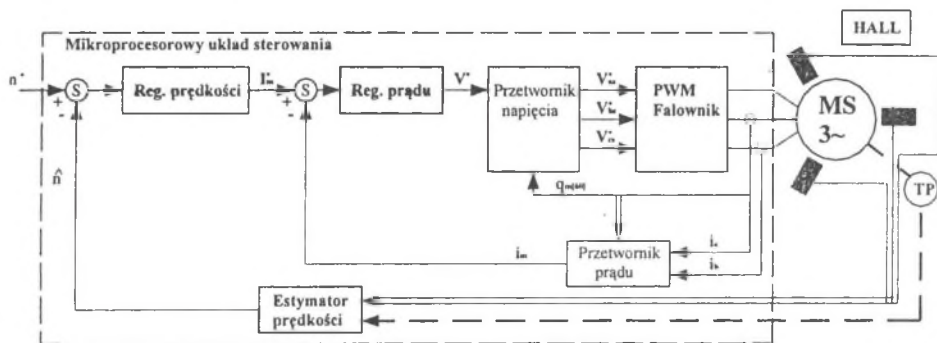
Układ sterowania Brushless AC, przedstawiony na rys.3, jest układem sterowania wektorowego silnikiem bezszczotkowym z zadaną wartością prędkości obrotowej. Układ sterowania bazuje na pomiarze dwóch prądów fazowych  $i_a$  i  $i_b$  oraz na pomiarze prędkości silnika i położenia wirnika za pomocą encodera  $TP$ . Zmierzone prądy  $i_a$  oraz  $i_b$  są transformowane na płaszczyznę stojana  $\alpha, \beta$  ( $i_\alpha$  i  $i_\beta$ ), a następnie bazując na informacji położenia wirnika prądy  $i_\alpha$  i  $i_\beta$  są transformowane na płaszczyznę wirnika  $d, q$  ( $i_{de}$  i  $i_{qe}$ ). Prędkość i prądy osiowe są regulowane poprzez dyskretne regulatory typu PI. Sygnały wyjściowe regulatorów prądów sterują blokiem oscylacyjnym VCO. Na wyjściu tego bloku, na podstawie informacji o aktualnym położeniu wirnika, otrzymuje się sygnały (typu MSI) sterujące falownikiem.



Rys.3. Układ sterowania Brushless AC  
Fig.3. Control system Brushless AC

Na rys.4 przedstawiono układ sterowania Brushless DC silnika bezszczotkowego w układzie prądu stałego z zadaną wartością prędkości obrotowej i czujnikami Halla w pętli sprzężenia zwrotnego. Układ ten bazuje na pomiarze prądów dwóch faz oraz pomiarze prędkości silnika i położenia za pomocą czujników Halla [5]. Na podstawie informacji z czujników Halla o położeniu wirnika i wartościach zmierzonych prądów  $i_a$  i  $i_b$  obliczany jest równoważny prąd  $i_{DC}$  silnika. Regulatory prędkości i prądu są dyskretnymi regulatorami typu PI. W przypadku BLDC, tylko cztery tranzystory inwertera są wykorzystywane do

wyznaczenia danego położenia wirnika, natomiast blok przetwornika napięcia zaimplementowany programowo oblicza napięcia fazowe odniesienia do zasilania modułu mocy.



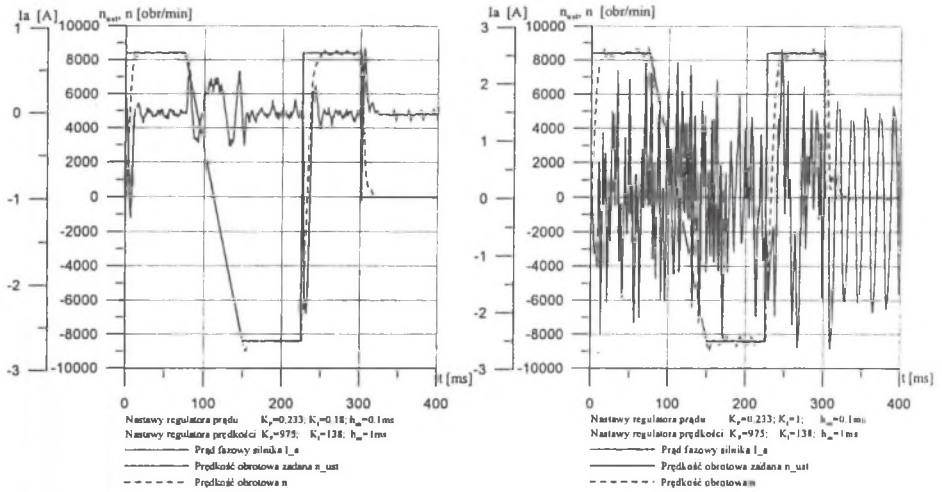
Rys.4. Układ sterowania Brushless DC

Fig.4. Control system Brushless DC

Podczas badań właściwości silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi sterowanego z układu MCK 240 Evaluation Module użytkownik może programowo wybierać różne nastawy regulatora prędkości i regulatora prądu. Przeprowadzono badania właściwości silnika typu PITTMAN, pracującego w układzie z rys.3 oraz rys.4, zmieniając nastawy obydwu regulatorów, tzn. ich współczynnika wzmocnienia regulatora proporcji  $K_p$  oraz współczynnika wzmocnienia regulatora całkującego  $K_i$ , przy stałej wartości czasu próbkowania  $h_{ctr}$ . Na rys.5 i rys.6 przedstawiono przebiegi prędkości zadanej  $n_{ust}$ , prędkości zmierzonej  $n$  oraz prądu fazowego  $i_a$  silnika przy trapezoidalnej zmianie prędkości kątowej.

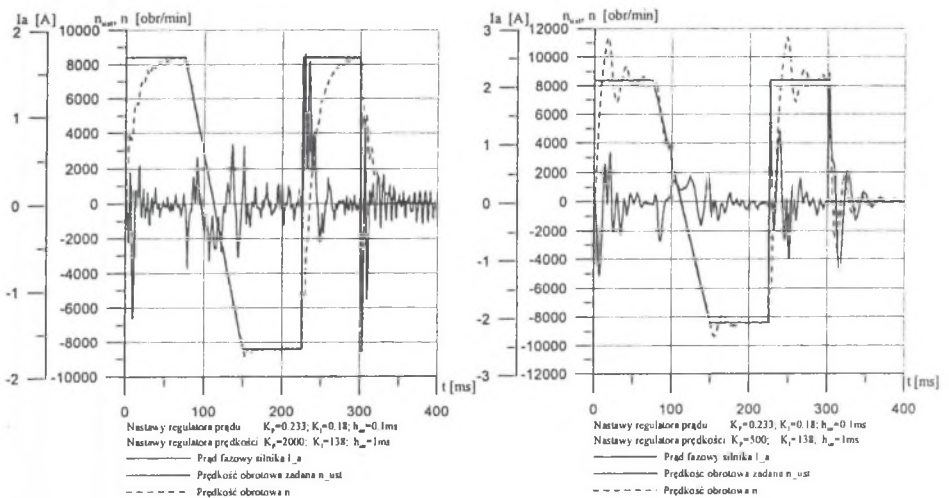
Na rys.5 przedstawiono przebiegi nieustalone prędkości obrotowej i prądu silnika bezszczotkowego pracującego w układzie z rys.3 dla dwóch nastawień współczynników wzmocnienia członu całkującego w regulatorze prądu. Ponadto przedstawiono (rys.6) wpływ zmian wartości współczynnika wzmocnienia  $K_p$  regulatora proporcji na przebiegi nieustalone silnika pracującego w układzie z rys.3.

W wyniku badań symulacyjnych stwierdzono, że przy nastawieniach regulatorów pokazanych na rys.5 oraz rys.6 prawie takie same przebiegi nieustalone uzyskuje się dla pracy silnika w układzie z rys.4.



Rys.5. Wpływ zmian wartości współczynnika całkowania  $K_I$  w regulatorze prądu układu z rys.3 na przebiegi nieustalone silnika

Fig.5. Influence of changes of the integration coefficient  $K_I$  in the current controller, from Fig.3 on motor transient courses



Rys.6. Wpływ zmian wartości współczynnika wzmocnienia  $K_P$  w regulatorze prędkości układu z rys.3 na przebiegi nieustalone silnika

Fig.6. Influence of changes of the gain coefficient  $K_P$  in the speed controller, from Fig.3 on motor transient courses



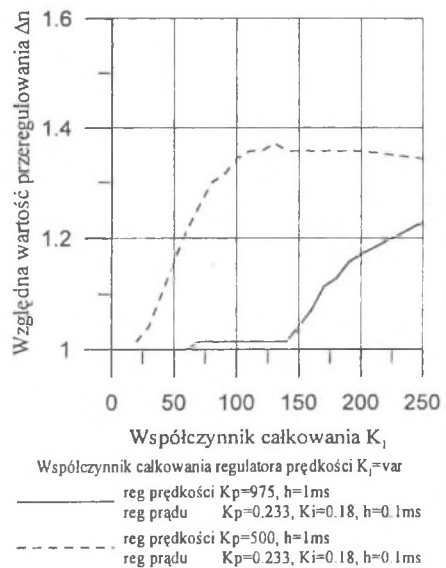
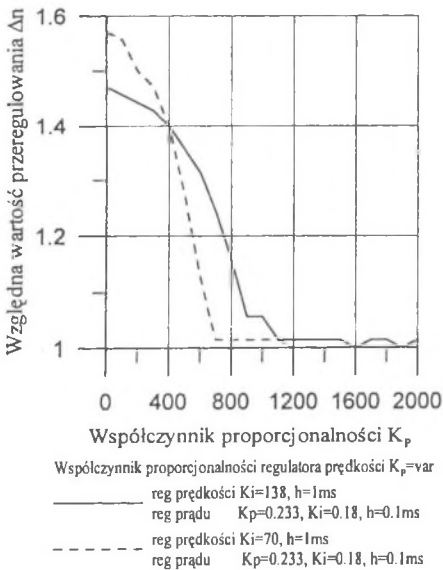
W niniejszej pracy ograniczono się do przedstawienia rezultatów badań wpływu współczynników wzmocnienia członu proporcji i członu całkującego regulatorów prądu i prędkości oraz czasu próbkowania na względną wartość przeregulowania prędkości  $\Delta n$  silnika dla zadanej wartości skoku jednostkowego prędkości obrotowej. Przy czym względną wartość przeregulowania prędkości  $\Delta n$  silnika zdefiniowana jest następująco:

$$\Delta n = \frac{n_{\max}}{n_{ust}}$$

W badaniach przyjęto stałą wartość prędkości zadanej, zaś wartość względną przeregulowania przedstawiono jako funkcję nastaw regulatorów  $K_P$ ,  $K_I$  oraz czasu próbkowania  $h_{clr}$

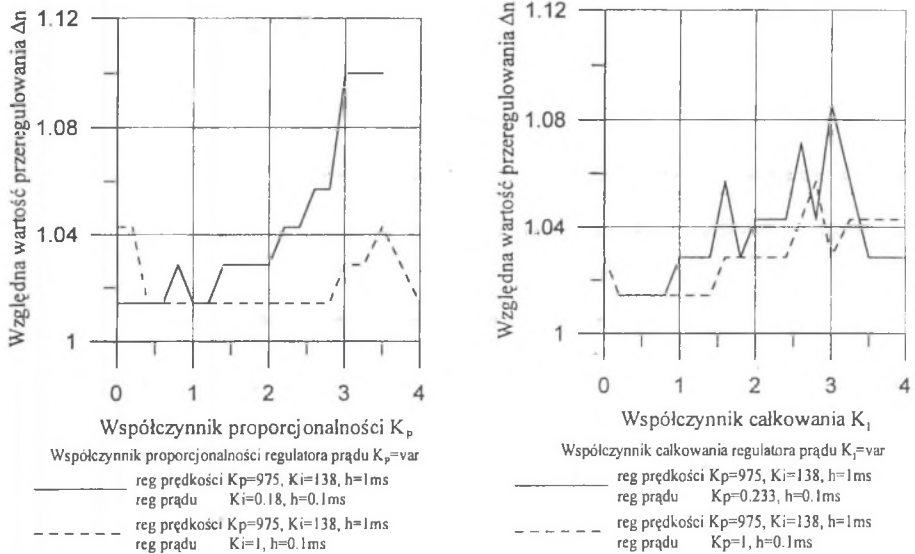
$$\Delta_n = f(K_P^p, K_I^p, K_P^n, K_I^n, h_{clr}^p, h_{clr}^n, n_{ust}).$$

Na rys.7-9 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań.



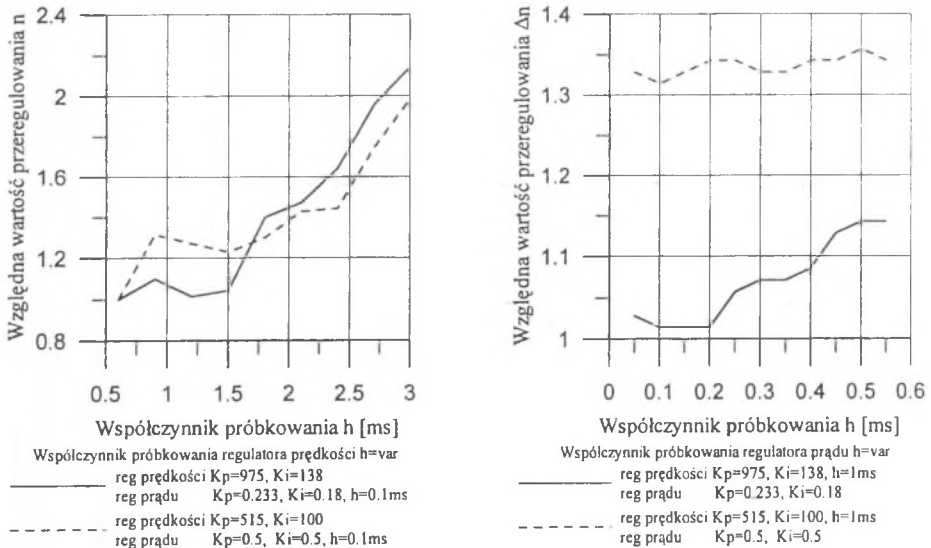
Rys.7. Wpływ zmian współczynnika wzmocnienia  $K_P$  i całkowania  $K_I$  w regulatorze prędkości na wartość przeregulowania  $\Delta n$

Fig.7. Influence of changes of the integration  $K_I$  and gain  $K_P$  coefficients in the speed controller on over-regulation value  $\Delta n$



Rys.8. Wpływ zmian współczynnika proporcjonalności  $K_p$  i całkowania  $K_i$  w regulatorze prądu na wartość przeregulowania  $\Delta n$

Fig.8. Influence of changes of the integration  $K_i$  and gain  $K_p$  coefficients in the current controller on over-regulation value  $\Delta n$



Rys.9. Wpływ zmian czasu próbkowania  $h_{ctr}$  w regulatorze prędkości i regulatorze prądu na wartość przeregulowania  $\Delta n$

Fig.9. Influence of changes of the sampling time  $h_{ctr}$  in the speed and current controllers on over-regulation value  $\Delta n$

#### 4. UWAGI KOŃCOWE

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że badany sterownik mikroprocesorowy TMS320F240 Evaluation Module umożliwia zmiany nastawy parametrów regulatorów typu PI układu sterowania silnikiem bezszczotkowym z magnesami trwałymi. Stosując znane kryteria doboru nastaw regulatorów sterownik umożliwia otrzymanie przebiegów odpowiadających przyjętym wymaganiom dotyczącym jakości regulacji, tzn. przebiegów oscylacyjnych tłumionych lub aperiodycznych. Nieodpowiedni dobór nastaw regulatora powoduje, że w układzie mogą wystąpić przebiegi oscylacyjne słabo tłumione bądź nietłumione, które są zwykle niepożądane. Z przeprowadzonych badań wynika wniosek, iż niezależnie od przyjętego programu symulacji (BLAC lub BLDC) przy tych samych nastawach regulatorów silnik z magnesami trwałymi zachowuje się prawie tak samo. Jest to wynik zgodny z oczekiwaniami i potwierdza zasadę, że silnik bezszczotkowy z magnesami trwałymi może pracować jako silnik prądu stałego lub przemiennego.

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że w kaskadowym układzie sterowania wewnętrzna pętla prądu praktycznie nie ma wpływu na przebieg zmierzonej prędkości  $n$ , zaś nastawy regulatora prądu wpływają jedynie na kształt i przebieg prądu badanego silnika (rys.5). Zgodnie z oczekiwaniami wpływ na przebieg prędkości ma zewnętrzna pętla układu sterowania, która daje możliwość uzyskanie przebiegu oscylacyjnego lub aperiodycznego. Nastawy regulatora prędkości w szerokim zakresie pozwoliły określić dla zadanych nastaw regulatora prądu przedział poprawnej pracy sterownika mikroprocesorowego wraz z silnikiem (rys.7).

Zaletą uniwersalnego mikroprocesorowego sterownika maszyn elektrycznych przedstawionego w niniejszej pracy jest duża elastyczność konfigurowania części sprzętowej. Program działania sterownika zawiera trzy zasadnicze części: system operacyjny, program obsługi sterownika oraz program realizujący algorytm sterowania, zatem zmiana algorytmu sterowania wiąże się jedynie z wymianą jednego elementu programu realizującego algorytm sterowania. Taką łatwość konfigurowania części programowej zapewnia struktura systemu operacyjnego.

#### LITERATURA

1. Texas Instruments: TMS320C24x DSP Controllers. CPU, System, And Introduction Set, 1997.
2. Texas Instruments: TMS320C24x DSP Controllers. Peripheral Library and Specific Devices, 1997.
3. Technosoft: DSP Motion Solutions. User manual, 1997.
4. Texas Instruments: Digital Signal Processing for Permanent Magnet Synchronous Motor. Literature number BPRA044, 1997.

5. Texas Instruments: DSP Solutions for BLDC Motor. Literature number BPRA055, 1997.
6. Żywiec A., Niestrój R., Rzeźnikiewicz G.: Uniwersalny sterownik maszyn elektrycznych wykorzystujący procesor sygnałowy TMS320C50. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 168, Gliwice 1999, s. 187-199.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Wach

Wpłynęło do Redakcji dnia 5 kwietnia 2000 r.

### **Abstract**

This paper presents a description and simulation studies of a digital controller for electric machines. The controller uses the Texas Instruments digital signal processor TMS320F240. The main element of this device is the Evaluation Module TMS320F240.

Chapter 1 shows the purpose of searching new solutions of controllers for electric machines used in various electric drives. The main features (i.e.: open architecture, easy programming and easy development of the hardware) of the microprocessor controller which enable to adapt it for different tasks are presented, too.

A description of the microprocessor controller using the TMS320F240 signal processor is presented in Chapter 2. The module Event Manager which is a highly specialized set of devices used for electric machine control, is dealt with separately.

Chapter 3 present an example of application of the digital microprocessor controller to control of a brushless motor and the results of the simulations of the vector control system based on the TMS320F240 digital signal processor. The block diagram of the vector control system of a brushless motor implemented in the Evaluation Module TMS320F240 is presented, as well.