

Krzysztof P. Dyrzcz  
Politechnika Wroclawska

## WYKORZYSTANIE MIKROKONTROLERÓW ARM W UKŁADACH STEROWANIA SILNIKAMI Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

### THE USE OF THE ARM MICROCONTROLLER IN THE PERMANENT MAGNET MACHINE CONTROL SYSTEMS

**Abstract:** In the paper the conception of building universal laboratory set-up to investigation of control methods of permanent magnet machine is presented. By using modern, computationally effective ARM STM32f103RET6 family microcontroller, implementation of the chosen control method in the real laboratory set-up is possible. The control system, working with a PC running special software enables the controller configuration, acquisition of the required measuring variables and drawing chosen temporary diagrams.

#### 1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się ciągły, dynamiczny rozwój metod sterowania silnikami elektrycznymi. Wynika to z rosnącego zapotrzebowania na nowoczesne napędy elektryczne, które muszą spełniać wysokie wymagania eksploatacyjne stawiane przez użytkowników. W chwili obecnej, w technice napędowej używane są różnego rodzaju silniki elektryczne, z których, jak można zaobserwować, coraz chętniej stosowane są silniki z magnesami trwałymi, w różnych odmianach konstrukcyjnych. Powodem większego zainteresowania tego rodzaju silnikami są z pewnością takie cechy jak: stosunkowo wysokie momenty elektromagnetyczne wytwarzane przez silniki z magnesami trwałymi, duża przeciążalność, wysoka niezawodność pracy, a także coraz korzystniejsza cena.

W procesie opracowywania i testowania metod sterowania silnikami elektrycznymi, po wykonaniu serii badań symulacyjnych pojawia się konieczność wykonania testów laboratoryjnych, mających na celu sprawdzenie badanej metody sterowania w rzeczywistym układzie pracy. W związku z tym, istnieje konieczność skonstruowania zestawu napędowego, który zapewni możliwość wykonania takich badań. Ze względu na eksperymentalny charakter prowadzonych prac, stanowisko testowe powinno mieć przemysłową konstrukcję, umożliwiającą możliwie łatwą rekonfigurację sprzętową i niezawodną rejestrację wybranych przebiegów czasowych, istotnych do oceny badanej metody sterowania.

W artykule opisano prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania metod sterowania silnikami z magnesami trwałymi spełniające opisane wymagania. Przyjęto modułową budowę

całego zestawu, umożliwiając swobodną konfigurację stanowiska w zależności od badanych silników. W proponowanym rozwiązaniu, do wykonania badań testowych zastosowano miniaturowe silniki z magnesami trwałymi, w związku z tym skonstruowano także falownik o niewielkiej mocy wyjściowej. Należy jednak zauważyć, że zarówno mikroprocesorowy sterownik układu, wykorzystujący mikrokontroler STM32f103RET6, jak i główny program sterujący, uruchamiany na komputerze PC są niezależne od mocy sterowanych silników, umożliwiając po odpowiedniej konfiguracji torów pomiarowych i zastosowaniu falownika o wymaganej mocy wyjściowej sterowanie praktycznie dowolnym silnikiem.

#### 2. Budowa stanowiska laboratoryjnego

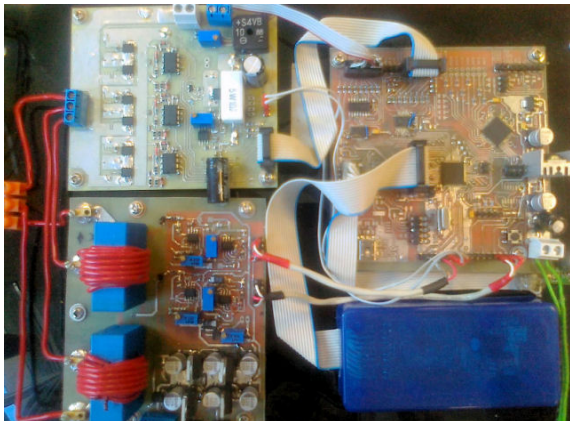
##### 2.1. Opis stanowiska

Kompletne stanowisko laboratoryjne składa się z dwóch współpracujących ze sobą modułów: modułu informatycznego oraz modułu elektro-mechanicznego. Na moduł informatyczny składa się oprogramowanie narzędziowe zainstalowane na współpracującym komputerze PC, służące do sterowania pracą stanowiska oraz do wizualizacji wybranych zmiennych. Drugi moduł składa się z mikroprocesorowego sterownika napięcia oraz badanego układu napędowego.

Mikroprocesorowy sterownik składa się z czterech współpracujących ze sobą modułów:

- modułu cyfrowego,
- modułu analogowego,
- modułu programatora,
- falownika napięcia.

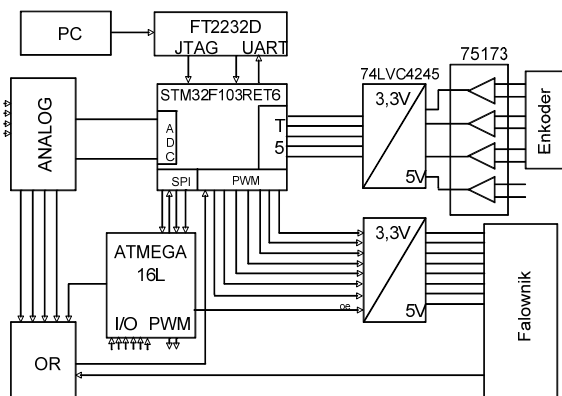
Wygląd mikroprocesorowego sterownika przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Budowa sterownika

## 2.2. Opis modułów składowych

Moduł cyfrowy stanowi podstawowy element składowy sterownika. Zaprojektowany, jako uniwersalny sterownik układów napędowych, zbudowany został przy wykorzystaniu mikrokontrolera STM32f103RET6. Dzięki temu wyposażony został m. in. w komplementarne, trójfazowe wyjście sygnałów PWM oraz cztery wejścia analogowe, z których trzy są niemultiplexowane i umożliwiają jednoczesne próbkowanie sygnału wejściowego. Dodatkowo, sterownik posiada wejście do podłączenia enkodera inkrementalnego z wyjściami różnicowymi, zasilanego napięciem 5V. Do komunikacji z układami otoczenia przewidziano interfejsy JTAG, UART oraz CAN. Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony schemat modułu cyfrowego sterownika.

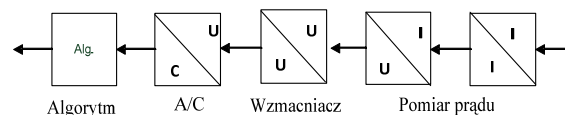


Rys. 2. Schemat modułu cyfrowego sterownika

Podstawowym elementem modułu jest mikrokontroler ARM serii STM32F103RET6 [4]. Oprogramowanie sterujące pracą mikrokontrolera odpowiada za realizację wybranej metody

sterowania, komunikację z komputerem PC, oraz współpracę z falownikiem przez wyjścia PWM. Aby odciążać procesor główny zastosowano dodatkowy mikrokontroler pomocniczy ATMEGA16L [5], obsługujący wejścia/wyjścia cyfrowe oraz dodatkowe sygnały PWM. Architektura układu pozwala na zabezpieczenie części mocy przez wyłączenie sygnału sterującego, przy czym źródłem sygnału błędu może być sygnał błędu pochodzący z falownika, przekroczenie mierzonej wartości analogowej lub sygnał błędu z mikrokontrolera pomocniczego. Nadrzędny sygnał błędu, generowany, jako suma wyżej wymienionych, odczytywany jest na wejściu asynchronicznego resetu timera opowiadającego za generację przebiegu PWM. Dodatkowo mikrokontroler pomocniczy ma możliwość wyłączenia sygnału sterującego.

Nowoczesne algorytmy sterowania silnikami elektrycznymi wymagają pomiaru dostępnych zmiennych stanu silnika, przy czym najczęściej są to prądy i napięcia fazowe zasilające silnik. W proponowanym rozwiązaniu zastosowano przetwornik analogowy umożliwiający jednoczesne próbkowanie trzech sygnałów wejściowych, w związku z tym, podstawowymi wielkościami mierzonymi są dwa prądy fazowe silnika oraz napięcie w obwodzie pośredniczącym falownika. Umożliwia to odtworzenie trzeciego prądu fazowego silnika, a także napięć zasilających silnik na podstawie analizy sekwencji przełączeń kluczy falownika. Schemat analogowego toru pomiarowego pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat analogowego toru pomiarowego

Prądowy sygnał wejściowy zamieniany jest na sygnał napięciowy na rezystorze pomiarowym i stanowi sygnał wejściowy dla wzmacniacza operacyjnego, który ma za zadanie dopasowanie poziomu napięć mierzonych (przekładnik prądowy jest bipolarny) do napięcia zakresu wejściowego przetwornika A/C (0–3.3V). Dodatkowo zadaniem wzmacniacza jest skompensowanie offsetu przekładnika oraz błędu wzmocnienia spowodowanego zastosowanym rezystorem. W proponowanym układzie zastosowano szybki wzmacniacz operacyjny z aktywnym sprzężeniem zwrotnym i tłumieniem sygnału wejściowego mniejszym niż 0.1dB. Pomiar prądu realizowany jest w środku czasu

załączenia wektora zerowego – wówczas prąd osiąga wartość średnią, oddaloną maksymalnie od przepięć komutacyjnych. Dodatkowo w przetworniku A/C czas próbkowania jest ustawiony na minimalny.

Ważnym elementem układu jest moduł programatora, umożliwiający zmianę oprogramowania mikrokontrolera, a tym samym realizację różnych metod sterowania. Programator połączony jest ze sterownikiem za pomocą złącza JTAG umożliwiając również debugowanie programu mikrokontrolera w czasie rzeczywistym.

W proponowanym rozwiązaniu zastosowano miniaturowy falownik napięcia o typowej konstrukcji, dostosowany do silników małej mocy. Jako klucze zastosowano tranzystory MOSFET, ponadto falownik wyposażono w zabezpieczenie przeciążeniowe oraz układ separujący, zabezpieczający wyjścia PWM mikrokontrolera w przypadku awarii falownika.

### 3. Oprogramowanie sterujące

#### 3.1. Wprowadzenie

Oprogramowanie sterownika zostało podzielone na dwie, ściśle współpracujące ze sobą warstwy:

- sprzętową, stanowiącą pewnego rodzaju *firmware*, zaimplementowaną w głównym mikrokontrolerze sterującym,
- programową, pełniącą rolę interfejsu użytkownika zainstalowanego na współpracującym komputerze PC.

Taki podział oprogramowania zastosowano ze względu na optymalizację szybkości wykonywania algorytmów sterowania, a także w celu uproszczenia akwizycji danych pomiarowych, prezentacji wybranych przebiegów czasowych oraz uproszczenia sposobu sterowania kompletnym systemem.

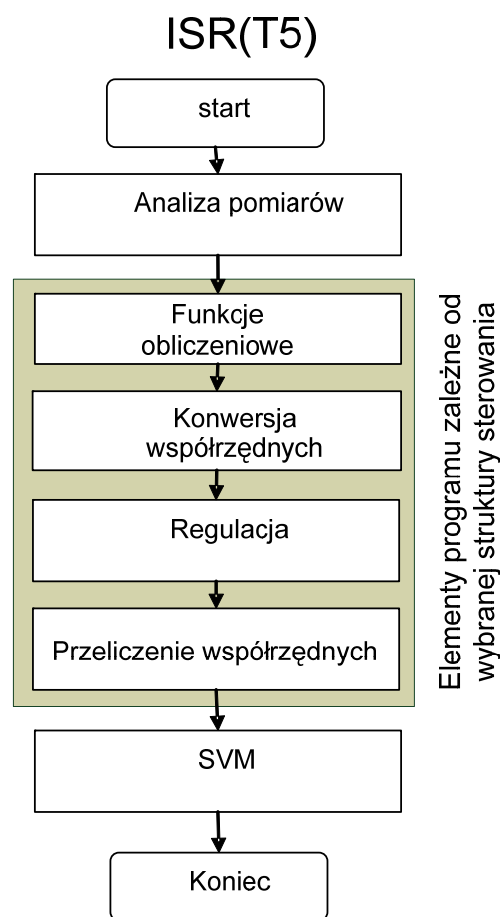
#### 3.2. Oprogramowanie sprzętowe

Oprogramowanie sprzętowe, zaimplementowane w mikrokontrolerze sterującym zostało podzielone funkcjonalnie na trzy warstwy:

- warstwę pośredniczącą z układami wykonawczymi,
- warstwę implementacji algorytmów sterowania,
- warstwę główną, łączącą dwie wcześniej wymienione warstwy oraz umożliwiającą komunikację z komputerem nadrzędnym PC.

Dzięki takiemu podziałowi uzyskano przejrzystą strukturę programu, umożliwiającą stosunkowo łatwą zmianę oprogramowania w przypadku zmiany struktury sterowania lub struktury sprzętowej układu.

Główna struktura programu zawarta została w procedurze obsługi przerwania zegara T5 mikrokontrolera. Jest ona wykonywana w każdym cyklu przebiegu PWM, a obliczone wartości przepisywane są do sprzętowego bufora. Następnie, po wyzerowaniu licznika, dzięki systemowi zdarzeń równoległe obliczone wcześniej wartości z bufora sprzętowego przekazywane są do bloku modulatora szerokości impulsu SVM, po czym rozpoczyna się konwersja oraz wywoływana jest ponownie funkcja obsługi przerwania. Schemat blokowy struktury programu pokazano na rysunku 4.

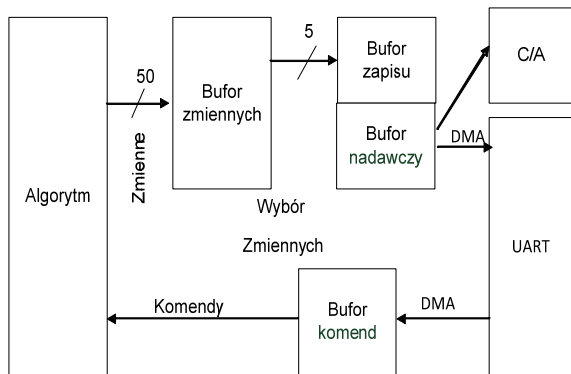


Rys. 4. Schemat blokowy struktury programu

Należy zauważyć, że niektóre fragmenty oprogramowania są stałe (procedury pomiaru, procedura generowania SVM), natomiast inne zależą od wybranej metody sterowania.

Ze względu na przyjętą budowę układu, istotnym problemem jest sposób komunikacji ste-

rownika z komputerem PC. Do tego celu zastosowano procedurę, która za pomocą portu UART wykorzystującego sprzętowe sterowanie przepływem danych oraz dostęp do kontrolera DMA umożliwia wymianę danych z prędkością transmisji dochodzącą do 4MBit/s. Zastosowany algorytm umożliwia sterowanie jedną z pięćdziesięciu zdefiniowanych zmiennych, przy czym w czasie rzeczywistym możliwe jest przesyłanie maksymalnie pięciu zmiennych. Wyboru zestawu zmiennych przesyłanych do komputera oraz dwóch zmiennych przekazywanych do przetwornika C/A można dokonać wysyłając odpowiednią komendę z komputera PC z poziomu aplikacji zarządzającej. Ponadto, algorytm wyposażono w mechanizmy bezpieczeństwa umożliwiające zawieszenie nadawania oraz awaryjne wyłączenie sterownika. Schemat blokowy opisanego modułu komunikacji przedstawiono na rysunku 5.



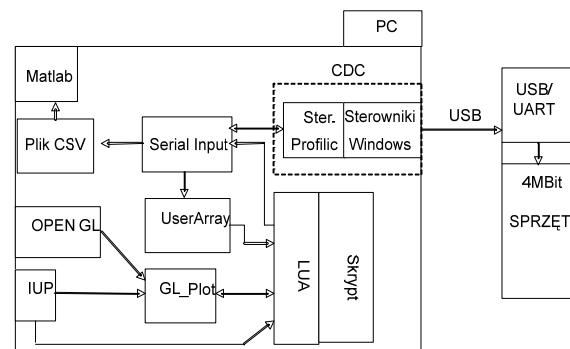
Rys. 5. Budowa modułu komunikacji

### 3.3. Interfejs użytkownika

Interfejs użytkownika zainstalowany na komputerze PC zapewnia pełną kontrolę nad pracą stanowiska laboratoryjnego. Umożliwia wybór algorytmu sterowania, akwizycję odpowiednich danych pomiarowych oraz podgląd wybranych przebiegów czasowych. Struktura oprogramowania interfejsu jest złożona i składa się z kilku współpracujących ze sobą modułów programowych [1]. Na schemacie blokowym programu pokazanym na rysunku 6 zaznaczono najważniejsze moduły wchodzące w skład oprogramowania interfejsu.

Główny program interfejsu napisano w języku skryptowym LUA. Z programem głównym

współpracują odpowiednie biblioteki umożliwiające obsługę portu szeregowego do komunikacji z mikrokontrolerem oraz tworzenie wykresów z wykorzystaniem biblioteki graficznej OpenGL. Dzięki takiemu podejściu stworzono proste, uniwersalne środowisko przeznaczone do tworzenia szybkich, lokalnych interfejsów współpracujących z platformą sprzętową w czasie rzeczywistym. Wykorzystanie języka skryptowego LUA spowodowało, że złożona aplikacja składa się jedynie z około 500 linii programowych.

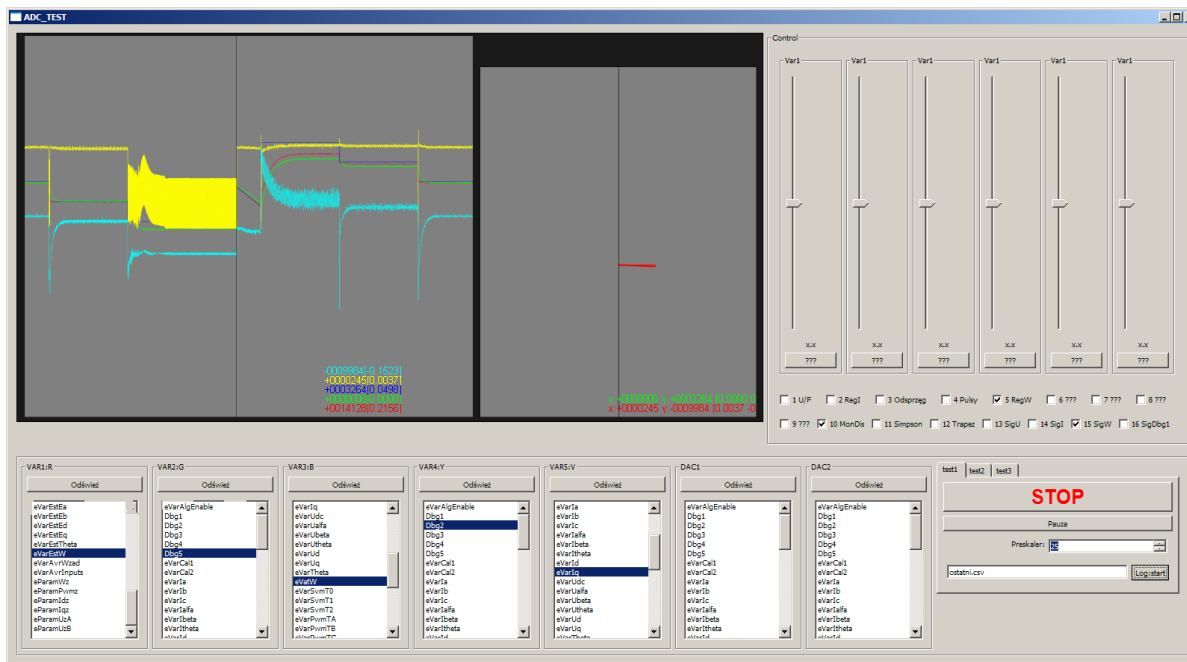


Rys. 6. Schemat blokowy interfejsu użytkownika

Podstawowe cechy zaprojektowanego interfejsu to przede wszystkim:

- jednoczesny podgląd pięciu zdefiniowanych zmiennych, przy czym cztery z nich grupowane są parami i przedstawione za pomocą hodografu,
- możliwość zmiany stanu jednej z szesnastu zmiennych binarnych,
- wybór wyświetlanych oraz przesyłanych do przetwornika C/A zmiennych,
- możliwość ustawienia wartości sześciu zmiennych (np. prędkość zadana),
- ustawienie decymacji próbek,
- awaryjne zatrzymanie sterownika,
- zapis otrzymanych przebiegów do pliku CSV, umożliwiając w ten sposób współpracę z oprogramowaniem MATLAB,
- czytelny rozkład poszczególnych pól edycji zmiennych.

Wygląd okna graficznego interfejsu z zarejestrowanymi przykładowymi przebiegami testowymi pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Wygląd interfejsu użytkownika

**4. Przykładowe zastosowanie stanowiska laboratoryjnego**

Przedstawione w artykule stanowisko laboratoryjne zastosowano do wykonania przykładowych badań układu napędowego wykorzystującego miniaturowy silnik z magnesami trwałymi używany do napędu komputerowego twardego dysku o parametrach przedstawionych w tab. 1.

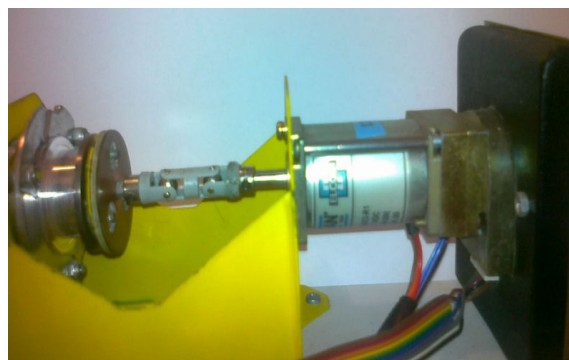
Tab. 1. Parametry badanego silnika

Parametr	Wartość
$R_s$	0,85Ω
$L_s$	150μH
$L_{d\beta}, L_{q\alpha}$	225 μH
$n_n$	7200obr/min
$K_u$	1,2V/(1000obr/min)
$\Psi_f$	0,002861
$K_i$	0,00767Nm/A
$P_b$	4
$U_{max}$	12V

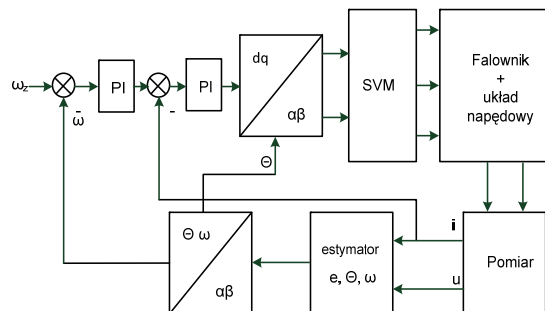
Jako silnik obciążający zastosowano miniaturowy silnik BLDC typu Pittmann 3441. Silniki połączone są za pomocą sprzęgła przegubowego, natomiast pomiar prędkości możliwy jest za pomocą enkodera obrotowo-impulsowego. Wygląd testowego układu napędowego pokazano na rysunku 8.

Działanie układu napędowego przetestowano w bezczujnikowej strukturze sterowania

z dwoma regulatorami PI prędkości i prądu. Schemat testowej struktury sterowania przedstawiono na rysunku 9. Do wyznaczania zmiennych stanu zastosowano obserwator opisany m.in. w [2], [3].



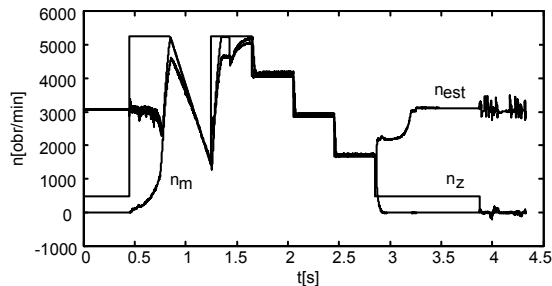
Rys. 8. Testowany układ napędowy



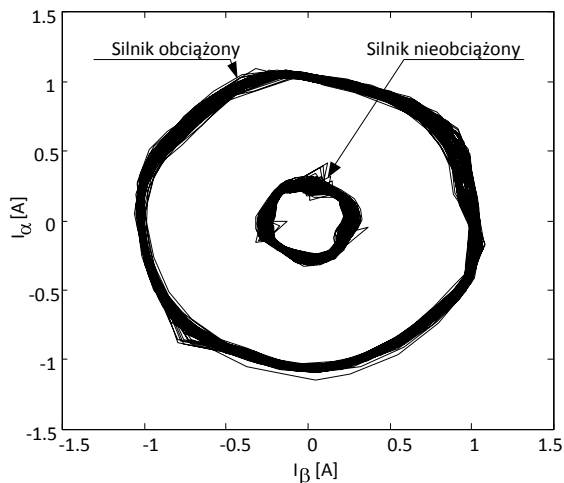
Rys. 9. Schemat struktury sterowania

Na rysunku 10 pokazano przykładowe przebiegi prędkości zadanej, estymowanej oraz mie-

rzonej za pomocą enkodera, uzyskane podczas eksperymentu. Natomiast na rysunku 11 pokazano hodograf składowych prądu  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  dla silnika pracującego na biegu jałowym, oraz dla porównania dla silnika obciążonego momentem znamionowym.



Rys. 10. Przebiegi prędkości zadanej  $n_z$ , mierzonej  $n_m$  i estymowanej  $n_{est}$  w badanym układzie



Rys. 11. Hodograf składowych prądu  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję budowy laboratoryjnego stanowiska do badania metod sterowania silnikami z magnesami trwałymi. Dzięki przyjętej modułowej budowie, możliwa jest stosunkowo łatwa zmiana konfiguracji lub rozbudowa układu, w zależności od badanego silnika. Należy przy tym pamiętać, że zastosowany falownik umożliwia zasilanie silników

prądem nieprzekraczającym 5A. Ponieważ jednak sterownik mikroprocesorowy wyposażony jest w uniwersalne wyjścia PWM, możliwe jest sterowanie falownikiem zasilającym silniki większej mocy. Należy jedynie pamiętać, aby odpowiednio dobrać układy pomiarowe prądów i napięć zasilających badany silnik. Przeprowadzone testy laboratoryjne pokazały, że przyjęta koncepcja budowy okazała się prawidłowa, a zastosowane rozwiązania zapewniają szybką i pewną komunikację pomiędzy komputerem PC a sterownikiem, umożliwiając akwizycję danych pomiarowych i wykreślanie wybranych przebiegów w czasie rzeczywistym.

## 7. Literatura

- [1] Dyrz K. P., Faściszewski M.: *Stanowisko do badania metod sterowania silnikami z magnesami trwałymi wykorzystujące mikrokontroler ARM*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 64, 2010, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [2] Orłowska-Kowalska T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi.*, Seria Wydawnicza Komitetu Elektrotechniki PAN Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki T. 48, 2003, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [3] Zawirski K., *Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*, 2005, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [4] STMicroelectronics, *STM32F103xC/D/E*, Ref. Manual, September 2009.
- [5] ATMEL, *8-bit microcontroller with 16K Bytes In-system Programmable Flash*, Ref. Manual, 2009.

## Autor

Dr inż. Krzysztof P. Dyrz, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, tel. (71)3204291, e-mail: krzysztof.dyrz@pwr.wroc.pl.

## Recenzent

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski