

Piotr BOGDAN<sup>1</sup>  
Tomasz BINKOWSKI<sup>2</sup>

## SYSTEM ELEKTRONICZNEGO STEROWANIA SKALARNEGO SILNIKÓW INDUKCYJNYCH W OPARCIU O MIKROKONTROLER STM32F103

W artykule przedstawiono projekt elektronicznego układu sterowania skalarnego trójfazowym silnikiem indukcyjnym. Układ sterowania opiera się o 32 bitowy mikrokontroler STM32F103 z rdzeniem Cortex-M3. Na podstawie zaprojektowanego układu sterowania wykonano badania laboratoryjne. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych przedstawiono wpływ zmiany częstotliwości przebiegu wyjściowego układu sterowania na pracę silnika. Jako nadrzędny układ regulacji silnika indukcyjnego przyjęta została metoda sterowania skalarnego. Metoda ta ma za zadanie utrzymywanie stałości wartości ilorazu napięcia i częstotliwości. Charakterystyka ta została zmodyfikowana poprzez wprowadzenie korekty uwzględniającej różnice spadków składowych napięcia na uzwojeniach silnika wynikające z różnej częstotliwości przebiegów zasilających. Sterowanie to objęte zostało sprzężeniami zwrotnymi realizującymi dwupoziomową regulację parametrów silnika. Nadrzędny stopień kontrolował prędkość obrotową, podrzędny wartość prądu. Proces regulacji silnika indukcyjnego wymaga znajomości bieżących wartości prądu i prędkości. Wartość prądu mierzona była fizycznie jako prąd obwodu pośredniczącego. W oparciu o tę wartość obliczane były wartości prądów faz odbiornika. Wymagało to znajomości stanu falownika. Prędkość obrotowa podawana na układ regulacji była aproksymowana poprzez zastosowanie wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego. Rozwiązanie to pozwala na stosowanie opracowanego systemu przede wszystkim w układach napędowych elektronarzędzi lub sprzętu AGD. Obniża koszt całego napędu oraz umożliwia stosowanie go w aplikacjach o ograniczonej przestrzeni montażowej. Założenia procesu sterowania i regulacji ujęto w postaci kodu programu uruchamianego na mikrokontrolerze STM32F103. Wykonany model laboratoryjny falownika i układu sterującego pozwolił przeanalizować przyjętą koncepcję sterowania. Wykonano podstawowe badania laboratoryjne polegające na określeniu zależności prędkości obrotowej w funkcji częstotliwości przebiegów zasilających. Wykonano także testy umożliwiające wykreślenie zależności

---

<sup>1</sup> Piotr Bogdan, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, piotrek-787@wp.pl.

<sup>2</sup> Autor do korespondencji: Tomasz Binkowski, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 1974, tbinkow@prz.edu.pl.

wartości skutecznych napięć i prądów od częstotliwości dla przyjętego rozwiązania napędu.

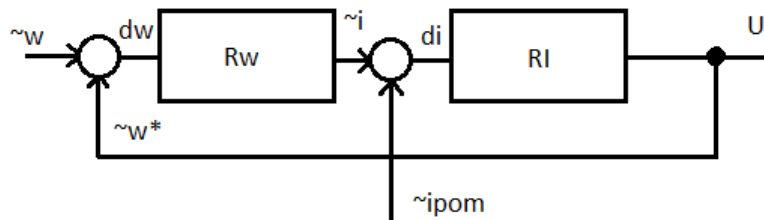
**Słowa kluczowe:** falownik, sterowanie skalarne, mikrokontroler

## 1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiony jest projekt układu trójfazowego, sterowanego skalarnie, falownika napięcia. Falownik napięcia jest przekształtnikiem energoelektronicznym, którego zadaniem jest przekształcenie energii źródła napięcia stałego na energię związaną z przepływem prądów zmiennych[2]. Sterowanie skalarne polega na takiej zmianie parametrów napięcia wyjściowego, aby spełniony był warunek  $U/f = \text{const}$ . Jest to realizowane poprzez porównanie ze sobą dwóch przebiegów. Pierwszym z nich jest przebieg nośny, który jest przebiegiem trójkątnym o dużej częstotliwości rzędu kilku lub kilkudziesięciu kHz. Drugim z przebiegów jest sygnał sterujący. Przebieg sterujący jest sygnałem sinusoidalnym o małej częstotliwości. Częstotliwość tego przebiegu jest równa częstotliwości prądów płynących przez obciążenie falownika.

Amplituda przebiegu sterującego decyduje o wartości napięcia wyjściowego układu sterowania[1].

W koncepcji układu sterowania pominięto sprzężenie zwrotne w postaci pomiaru prędkości obrotowej silnika. W zamian zastosowano wewnętrzną pętlę sprzężenia zwrotnego dla układu regulacji. Schemat blokowy układu regulacji przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu regulacji

Fig. 1. Block diagram of control system

Gdzie:

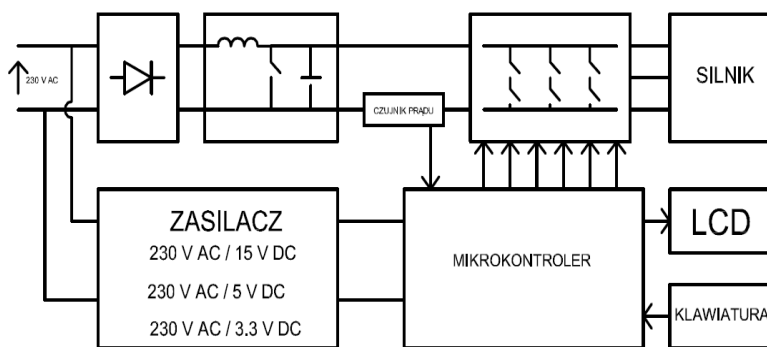
- $R_w$  – regulator prędkości typu P,
- $R_I$  – regulator prądu typu PI,

- $\sim w$  – wartość zadana prędkości obrotowej,
- $\sim w^*$  - sprzężenie zwrotne dla regulatora prędkości,
- $dw$  – uchyb regulacji regulatora prędkości,
- $\sim i$  – wyjście regulatora prędkości,
- $\sim ipom$  – sprzężenie zwrotne dla regulatora prądu, wartość zmierzona prądu silnika,
- $di$  – uchyb regulacji regulatora prądu,
- $U$  – wyjście regulatora.

Wielkością zadaną dla układu regulacji jest prędkość silnika, która jest proporcjonalna do wartości napięcia wyjściowego falownika. Informacja o stanie silnika jest przekazywana do układu regulacji w postaci pomiaru prądu pobieranego przez silnik. Taki układ sterowania jest nazywany układem bezczujnikowym. Eliminacja bezpośredniego pomiaru prędkości silnika, niesie ze sobą spadek dokładności układu sterowania, co powoduje, że tego typu układu napędowe nie mogą być stosowane, w miejscu gdzie jest wymagana precyzyjna kontrola prędkości obrotowej. Istnieje jednak bardzo wiele zastosowań dla tego typu układów. Przykładem są np. napędy stosowane w sprzęcie AGD, gdzie nie jest wymagana precyzyjna kontrola nad prędkością obrotową.

## 2. Projekt układu sterowania

Schemat blokowy trójfazowego skalarnego falownika napięcia przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy trójfazowego skalarnego falownika napięcia

Fig. 2. Block diagram of the 3-phase scalar voltage inverter

Całość układu sterowania składa się z kilku bloków. Pierwszym z nich jest blok falownika. Najważniejszymi elementami w tej części układu stanowią łączniki półprzewodnikowe w postaci 6 tranzystorów MOSFET 2SK4207. Dobór tranzystorów był przeprowadzony na podstawie trzech najważniejszych parametrów. Pierwszym z nich jest maksymalne napięcie  $U_{DS}$ . W zaprojektowanym układzie sterowania napięcie w obwodzie pośredniczącym wynosi 460[V], co determinuje wartość napięcia pod jakim muszą pracować zastosowane łączniki. Tranzystory 2SK4207 mogą przełączać maksymalne napięcie 900[V], co gwarantuje, że nie ulegną uszkodzeniu przy napięciu, jakie występuje w układzie sterowania. Drugim parametrem brany pod uwagę przy wyborze łączników półprzewodnikowych był maksymalny prąd, jaki mogą przewodzić. Zastosowane tranzystory mogą przewodzić prąd ciągły  $I_D = 13[A]$ , co również jest wystarczające dla przewidzianego maksymalnego obciążenia układu sterowania. Kolejnym ważnym parametrem doboru tranzystorów były czasy ich przełączania. Zbyt długi czas wyłączenia tranzystora może doprowadzić do zwarcia w pojedynczej gałęzi falownika. Tranzystory 2SK4207 zapewniają czasy przełączania na poziomie poniżej 200[ns], co przy zastosowanym czasie martwym 2.5[μs], gwarantuje prawidłową pracę urządzenia. Do sterowania bramkami 6 łączników półprzewodnikowych został zastosowany scalony driver 6 tranzystorów w postaci układu IR2130. Zastosowanie tego elementu uprościło układ sterowania w szczególności 3 górnych tranzystorów, których trudność sterowania polega na tym, że ich źródła znajdują się na różnych potencjałach. Ponieważ układ IR2130 jest przystosowany do sterowania trójfazowych układów mostkowych, jego zastosowanie zminimalizowało liczbę elementów potrzebnych do sterowania bramkami łączników półprzewodnikowych. Układ IR2130 posiada jeszcze jedną ważną zaletę. Posiada on sprzętowy generator czasu martwego. Czas martwy generowany przez ten układ wynosi 2.5[μs]. Ponadto układ ten nie pozwala na jednoczesne otwarcie 2 tranzystorów w jednej gałęzi.

Kolejnym blokiem w zaprojektowanym układzie sterowania jest blok boost convertera. Blok ten odpowiada za odpowiednie napięcie stałe w obwodzie pośredniczącym. Wymagana wartość napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym zależy od sposobu sterowania falownikiem. Ponieważ zaprojektowany układ realizuje sterowanie skalarne, w którym to sterowaniu współczynnik wykorzystania źródła napięcia stałego wynosi 0.866, dlatego, aby uzyskać na wyjściu układu sterowania odpowiednią wartość napięcia, potrzeba zapewnić odpowiednią wartość napięcia w obwodzie pośredniczącym. W przypadku wartości napięcia międzyfazowego w sieci trójfazowej równej 400[V], wartość napięcia DC w obwodzie pośredniczącym powinna wynosić 460[V]. Blok boost convertera swoje działanie opiera na scalonym kontrolerze PFC LT1248. Ponieważ napięcie sieci 230[V] po wyprostowaniu ma wartość ok 320[V], dlatego wartość ta musi zostać podwyższona. Realizowane jest to poprzez bardzo szybkie przełączanie łącznika półprzewodnikowego, który

wymusza przepływ dużego prądu przez indukcyjność. W momencie zamknięcia klucza tranzystorowego na cewce indukuje się wysokie napięcie, które po przekroczeniu napięcia wyjściowego jest podawane przez diodę na wyjście. Do ustalenia wartości napięcia wyjściowego służy dzielnik napięcia składający się z dwóch rezystorów oraz jednego potencjometru. Potencjometr umożliwia precyzyjne ustawienie żądanej wartości napięcia wyjściowego. Zastosowane wartości rezystancji w dzielniku rezystancyjnym pozwalają na regulację napięcia wyjściowego w przedziale od 330[V] do 512.5[V]. Układ LT1248 pozwala również na ustawienie częstotliwości przełączania łącznika półprzewodnikowego za pomocą jednego rezystora i jednego kondensatora dołączanych do nóżek układu scalonego. W układzie sterowania została ona określona na poziomie 100[KHz].

Następnym blokiem w układzie sterowania jest blok mikrokontrolera. Mikrokontroler steruje całą pracą urządzenia oraz wykonuje algorytm sterowania silnikiem. Z tego powodu wybór odpowiedniego mikrokontrolera jest kluczowy. Spośród wielu dostępnych na rynku układów wybór padł na układ STM32F103VCT6. Mikrokontroler ten jest wyposażony w nowoczesny rdzeń ARM Cortex-M3. Główną zaletą wybranego układu dla realizowanej funkcji w układzie sterowania jest możliwość sprzętowego generowania 3 komplementarnych przebiegów PWM. Dzięki temu sygnały sterujące 6 tranzystorami są generowane automatycznie, co znacznie upraszcza oprogramowanie. W układzie sterowania mikrokontroler taktowany jest z rezonatora kwarcowego o częstotliwości 8[MHz]. Częstotliwość ta została powielona przez wewnętrzną pętlę PLL do wartości 72[MHz] i z taką częstotliwością jest taktowany rdzeń mikrokontrolera i jego układy peryferyjne. Wysoka częstotliwość taktowania układów peryferyjnych, (w tym timer1, który został użyty do generowania częstotliwości nośnej), umożliwia uzyskanie przebiegu nośnego o dość dużej częstotliwości. W układzie sterowania częstotliwość nośna została ustalona na poziomie 3600[Hz]. Mikrokontroler STM32F103VCT6 został również wyposażony w wewnętrzny 12 bitowy przetwornik analogowo cyfrowy, za pomocą którego w układzie sterowania dokonuje się pomiar prądu. 12 bitowa rozdzielczość przetwornika analogowo cyfrowego oraz zastosowane dokładne źródło napięcia odniesienia o wartości 3[V] pozwalają na bardzo dokładne pomiary.

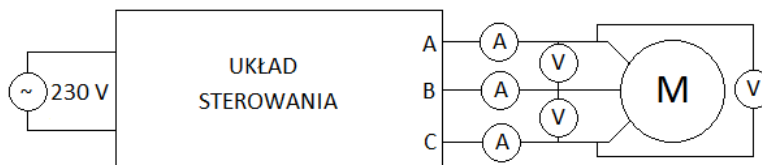
W układzie sterowania znajduje się również blok zasilacza. Blok ten odpowiada za dostarczenie odpowiednich napięć stabilizowanych do zasilania mikrokontrolera, czy drivera tranzystorów. Ponadto w układzie sterowania zastosowany został alfanumeryczny wyświetlacz LCD oraz klawiatura. Elementy te są wykorzystywane do komunikacji pomiędzy układem sterowania a użytkownikiem.

W układzie sterowania została zastosowana separacja pomiędzy częścią wysokonapięciową a częścią niskonapięciową. Z tego powodu sygnały sterujące, generowane przez mikrokontroler, są podawane na wejście układu IR2130

poprzez transoptory. Zastosowane transoptory to 6N137. Podstawowym parametrem podczas doboru tych elementów były ich czasy przełączania. Zastosowane transoptory zapewniają czasy przełączania poniżej 50[ns], co jest wartością wystarczającą w zaprojektowanym urządzeniu. Z uwagi na separację pomiędzy częścią wysokonapięciową a częścią niskonapięciową, pomiar prądu pobieranego przez silnik również odbywa się z zapewnieniem separacji. Do pomiaru prądu został wykorzystany scalony czujnik prądu ACS714ELCTR-20A-T. Układ ten umożliwi pomiar prądu w przedziale od -20[A] do 20[A].

### 3. Badania laboratoryjne

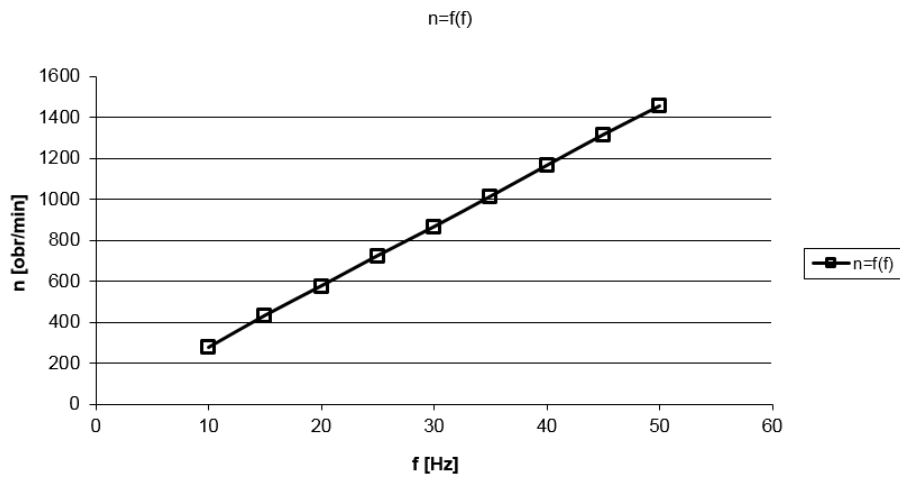
Zaprojektowany układ sterowania został przebadany w laboratorium w celu sprawdzenia poprawności jego działania. Podczas badań układ sterowania był obciążony trójfazowym silnikiem indukcyjnym 3SG71-4B o mocy 370[W]. W wyniku przeprowadzonych badań zostały ściągnięte podstawowe charakterystyki oraz zarejestrowane podstawowe przebiegi sygnału wyjściowego falownika. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.



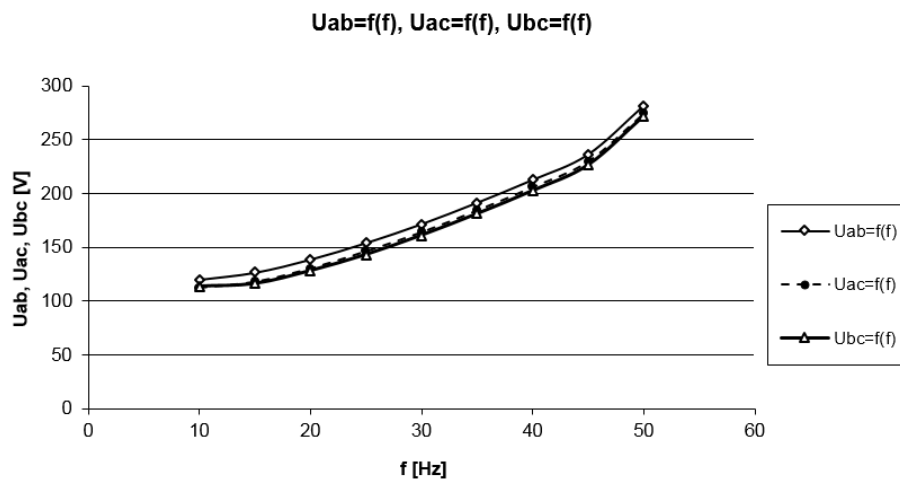
Rys. 3. Schemat układu pomiarowego

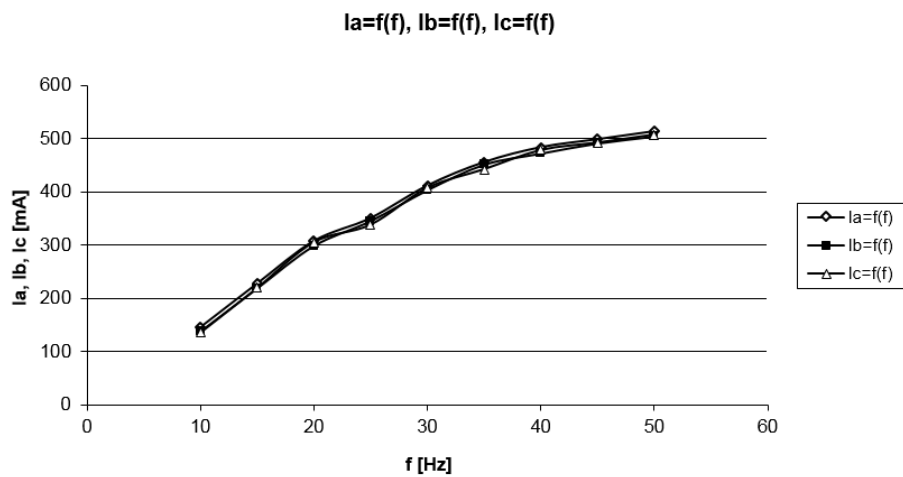
Fig. 3. The measurement system diagram

Rysunek 4. przedstawia zależność prędkości obrotowej silnika w funkcji częstotliwości przebiegu wyjściowego układu sterowania. Jej liniowość uzyskano poprzez odpowiednią modyfikację charakterystyki  $u/f = \text{const}$  uwzględniającą zmienny udział spadku napięcia na rezystancji silnika w stosunku do spadku napięcia na reaktancji w funkcji częstotliwości przebiegów prądów.

Rys. 4. Charakterystyka  $n = f(f)$ Fig. 4. The relation of  $n=f(f)$ 

Rysunek 5. przedstawia charakterystykę napięć międzyfazowych w funkcji częstotliwości przebiegu wyjściowego falownika, z kolei rysunek 6. przedstawia charakterystykę prądów fazowych w funkcji częstotliwości przebiegu wyjściowego układu sterowania.

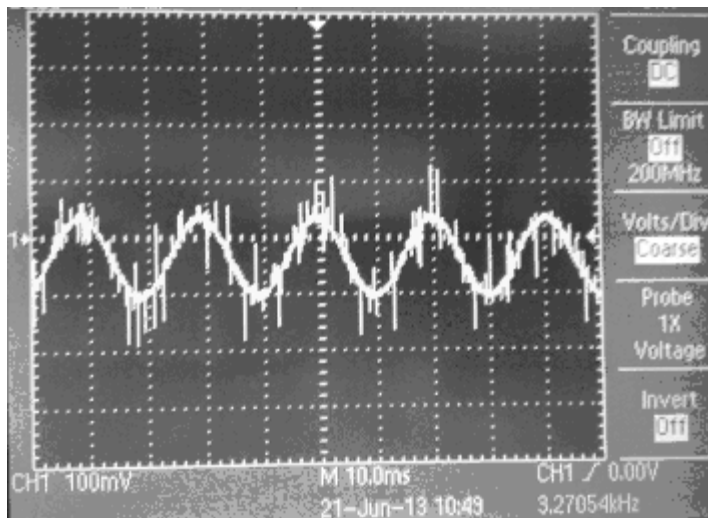
Rys. 5. Charakterystyki  $U_{AB} = f(f)$ ,  $U_{AC} = f(f)$ ,  $U_{BC} = f(f)$ Fig. 5. Relations of  $U_{AB} = f(f)$ ,  $U_{AC} = f(f)$ ,  $U_{BC} = f(f)$



Rys. 6. Charakterystyki  $I_A = f(f)$ ,  $I_B = f(f)$ ,  $I_C = f(f)$

Fig. 6. Relations of  $I_A = f(f)$ ,  $I_B = f(f)$ ,  $I_C = f(f)$

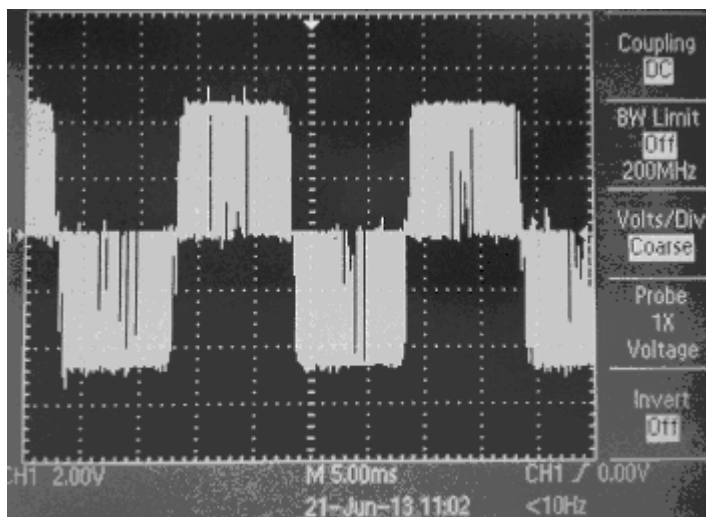
W trakcie badań laboratoryjnych dokonano również rejestracji za pomocą oscyloskopu przykładowych przebiegów prądu fazowego oraz napięcia międzyfazowego. Rysunek 7. przedstawia przebieg prądu fazowego, natomiast rysunek 8. przebieg napięcia międzyfazowego.



Rys. 7. Zarejestrowany przebieg prądu fazowego

Fig. 7. Registered phase current





Rys. 8. Zarejestrowany przebieg napięcia międzyfazowego

Fig. 8. Registered phase-to-phase voltage

Analizując otrzymane wyniki badań laboratoryjnych można stwierdzić że są one zgodne z oczekiwaniami teoretycznymi. Pozwala to na stwierdzenie, że układ sterowania został zaprojektowany poprawnie. Układ sterowania w oparciu o mikrokontroler STM32F103 jest wysokowydajnym rozwiązaniem w zakresie pracy z częstotliwościami podstawowymi (do 60 HZ) pozwalającym uzyskać zadowalające osiągi przy niewielkim koszcie.

#### 4. Podsumowanie

Układy falowników umożliwiają sterowanie pracą silników indukcyjnych. Poprzez zmianę częstotliwości przebiegu wyjściowego układu sterowania możliwa jest zmiana prędkości obrotowej falownika, natomiast zmniejszenie wartości napięcia wyjściowego wpływa na mniejszy pobór energii przez silnik, co ma bardzo istotny wpływ np. podczas rozruchu układu napędowego. Zaprojektowany układ sterowania umożliwia sterowanie pracą trójfazowych silników indukcyjnych zasilanych ze źródła napięcia jednofazowego. Zastosowanie w układzie sterowania wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego i eliminacja bezpośredniego pomiaru prędkości w znacznym stopniu uprościła strukturę układu. Pomiar prędkości nie jest bardzo skomplikowany jednak w niektórych przypadkach, może być on bardzo utrudniony ze względu na budowę urządzenia. Ponadto eliminacja niedrogiego sensora prędkości instalowanego w napędach produkowanych na masową skalę (zwłaszcza w sprzęcie AGD), może przynieść znaczne oszczędności ekonomiczne. W takim przypadku bardzo

dobrym rozwiązaniem jest układ sterowania bezczujnikowego, jeśli nie jest wymagana bardzo dokładna kontrola prędkości obrotowej silnika. Przedstawione rozwiązanie spełnia wymogi stawiane sterownikom napędów instalowanych w elektronarzędziach i sprzęcie AGD w zakresie standardowych częstotliwości pracy. Zastosowane komponenty i algorytmy sterowania świadczą o niskim stosunku kosztów produkcji do możliwości napędu, co jest często kluczowym kryterium decyzyjnym w procesie modyfikacji linii produkcyjnych wielu producentów sprzętu elektrotechnicznego z napędami elektrycznymi.

## Literatura

- [1] Nowak M., Barlik R.: Poradnik inżyniera energoelektronika, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [2] Binkowski T.: Nadmodulacja w falowniku napięcia sterowanym układem z modulatorami szerokości i fazy impulsu, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 247 Elektrotechnika z.30, 2007.
- [3] Binkowski T.: Modulatory w układach sterowania trójgałęziowego falownika napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, luty 2007.
- [4] Piróg S.: Energoelektronika – układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo – Dydaktyczne AGH, Kraków 2006.
- [5] Paprocki K.: Mikrokontrolery STM32 w praktyce, BTC, Legionowo 2011.
- [6] Galewski M.: STM32. Aplikacje i ćwiczenia w języku C, BTC, Legionowo 2011.

## ELECTRONIC CONTROL SYSTEM OF INDUCTION MOTORS BASED ON MICROCONTROLLER STM32F103

### Summary

The article describes the design of electronic control system of three-phase induction motor. The control system is based on the 32-bit microcontroller STM32F103 Cortex-M3 core. On the basis of the designed control system laboratory testing was performed. It shows the impact of changes of the frequency of the output waveform control system for the engine operation as a results of laboratory tests. The scalar method of the induction motor control was adopted as a main control system. This method has the task of maintaining the stability of the value of the quotient voltage and frequency. This characterization has been modified by the introduction of adjustments taking into account differences in component inheritance voltage rheostat resulting from the varying frequency of supply. It has been covered by the two-level control feedback in order to control of engine parameters. The main level controls the rotational speed, the slave level controls a current value. The process of adjusting induction motor requires knowledge of current values and current speed. The value of the measured current was physically as a direct current circuit. Based on this value the value of the phase currents were calculated. This required knowledge of the status of the inverter. The speed given on the adjustment system was approximated by applying an internal feedback loop. This solution allows you to use system developed primarily in the propulsion power tools or kitchen appliances. It reduces the cost of the entire drive and allows you to use it in applications with limited space. Establishment of process control and regulation is

entered in the form of program code that is running on the microcontroller STM32F103. The laboratory control system and inverter model allowed to analyze the adopted concept of control.

**Keywords:** inverter, scalar control, microcontroller

DOI: 10.7862/re.2013.3

*Tekst złożono w redakcji:* lipiec 2013

*Przyjęto do druku:* grudzień 2013

