

**Dominik Sotor, Jarosław Michalak**  
Politechnika Śląska, Gliwice

## **MIKROPROCESOROWY SYSTEM PROTOTYPOWANIA DO TESTOWANIA UKŁADÓW STEROWANIA PRZEKSZTAŁTNIKÓW**

### **MICROPROCESSOR BASED PROTOTYPING SYSTEM FOR INVERTERS CONTROL SYSTEM TESTING**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono mikroprocesorowy system służący do prototypowania układów sterowania przekształtników. Jest on przydatny przy testowaniu układów sterowania, algorytmów sterowania oraz doborze parametrów sterowników przekształtników. Idea opisywanego systemu polega na wykorzystaniu do modelowania obiektu regulacji mikrokontrolera o dużej szybkości działania, oprogramowanego w ten sposób aby modelować z wystarczającą dokładnością zachowanie obiektu. System prototypowania powinien dostarczać wymaganych sygnałów sprzężeń zwrotnych dla badanego sterownika. Opracowany mikroprocesorowy system prototypowania modeluje pracę przekształtnika dwupoziomowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym lub przekształtnika dwupoziomowego współpracującego z siecią zasilającą. W artykule opisano ideę i realizację systemu prototypowania oraz utworzone modele obiektów regulacji. Omówiono działanie i właściwości wykorzystanego systemu mikroprocesorowego i programu do parametryzacji modeli. Działanie mikroprocesorowego systemu prototypowania zostało potwierdzone wynikami laboratoryjnymi uzyskanymi przy testowaniu sterownika falownika silnika przy sterowaniu skalarnym i polowo-zorientowanym oraz przy testowaniu algorytmu sterowania przekształtnikiem sieciowym. Przedstawiono również możliwości badania zjawisk zakłóceńowych, np. związanych z występowaniem odkształceń napięcia w modelu sieci zasilającej.

**Abstract:** Microprocessor based system for testing the controllers of converters is presented in the paper. The system is useful for testing control systems and control algorithms or for parameterization of controller. During the tests of the new controller of converter it is not reasonable use real converter and real controlled object because of possibility of damage. The idea of presented system is using instead the real elements its models based on microcontroller with short computation time that ensures feedback signal for control systems and emulates operation of real converter and controlled object. Presented microprocessor based rapid control prototyping system can emulate operations of two level converter with induction motor or two level active front end converter with the grid. The idea and practical realization of proposed system and emulated controlled object are described in the paper. The features, operation and parameterization of proposed microprocessor based rapid control prototyping system are presented. Proper operation of proposed system is proved by results of experimental tests achieved with laboratory control system operating with scalar and vector control and laboratory active front end controller. The possibility of checking influence of selected disturbances (for example voltage harmonics) is also presented.

**Słowa kluczowe:** szybkie prototypowanie układów sterowania, technika HIL, systemy mikroprocesorowe, modele fizyczne obiektów regulacji, modelowanie przekształtników

**Keywords:** rapid control prototyping, hardware in the loop technique, microprocessor systems, physical models of controlled systems, power electronic converters modelling

### **1. Wstęp**

Napędy elektryczne są największą grupą odbiorników energii elektrycznej. Aby zapewnić dobre właściwości regulacyjne napędu (np. regulację prędkości obrotowej) stosuje się w nich przekształtniki i sterowniki z odpowiednimi algorytmami sterowania. Przy uruchamianiu nowych sterowników lub tworzeniu nowych algorytmów sterowania istnieje problem uszkodzenia przekształtnika i silnika podczas fazy testów. W takich przypadkach możliwe jest zastosowanie systemów szybkiego prototypowa-

nia sterowania (rapid control prototyping systems) i techniki HIL (hardware in the loop). Idea tej metody polega na zastąpieniu rzeczywistego obiektu regulacji modelem odwzorowującym jego działanie zapewniającym niezbędne sprzężenia zwrotne dla sterownika. Przykłady takich rozwiązań można znaleźć w [1],[2]. Jako model obiektu wykorzystuje się tu system mikroprocesorowy z układami peryferyjnymi. Zaletą systemu szybkiego prototypowania są jego duże możliwości obliczeniowe i prosty in-

terfejs programowania, a wadą wysoka cena. Jednocześnie współczesne mikrokontrolery posiadają na tyle duże moce obliczeniowe i rozbudowane układy peryferyjne, że można je stosować do modelowania obiektów zamiast systemów szybkiego prototypowania. Dodatkowo producenci mikrokontrolerów przygotowują biblioteczne procedury przyspieszające proces ich programowania.

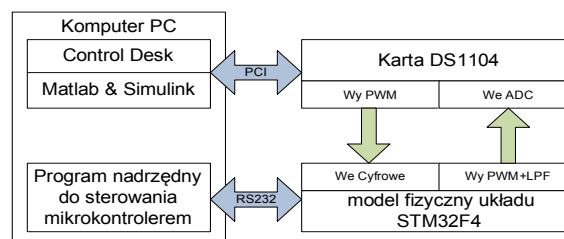
W artykule proponuje się do dedykowanego sterownika przekształtnika podłączyć opracowany mikroprocesorowy system prototypowania (MSP). Wykorzystywanymi sygnałami wyjściowymi ze sterownika są sygnały sterowania tranzystorami w przekształtniku, które są podłączone do wejść cyfrowych systemu MSP. System prototypowania MSP modeluje działanie układu przekształtnikowego i generuje odpowiednie sygnały zwrotne, niezbędne do realizacji algorytmu sterowania sterownika (np. prądy silnika). Możliwe jest również generowanie sygnałów dodatkowych pozwalających na analizę pracy modelowanego obiektu za pomocą oscyloskopu. Aby możliwe było poprawne działanie modelu pętla obliczeniowa systemu MSP powinna być jak najkrótsza.

## 2. Właściwości zastosowanego systemu mikroprocesorowego

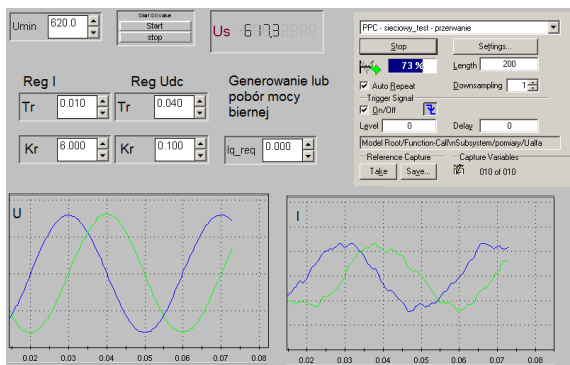
Jako system MSP wykorzystany został mikrokontroler STM32F4. Mikrokontrolery z rodziny STM32 z rdzeniem ARM zyskują dużą popularność ze względu na łatwość obsługi, niską cenę i możliwości. Użyty w badaniach zestaw uruchomieniowy STM32F4Discovery, przeznaczony jest do aplikacji wymagających dużej mocy obliczeniowej oraz rozbudowanych układów peryferyjnych [3]. Układ wyposażony jest w rdzeń Cortex-M4F (częstotliwością taktowania 168MHz). Posiada 1 MB pamięci flash, kanały DMA, kilkanaście układów czasowolicznikowych (dwa zaawansowane przeznaczone do aplikacji napędowych). Do programowania mikroprocesora STM32F4 wykorzystano darmowe środowisko CooCox, posiadające wiele wbudowanych bibliotek ułatwiających konfigurację mikrokontrolera oraz umożliwiające podgląd zmiennych i rejestrów w mikrokontrolerze podczas testowania. Podstawową zaletą CooCox jest brak ograniczeń wynikających z wielkości kodu, co w darmowych wersjach oprogramowania jest rzadko spotykanym zjawiskiem.

## 3. Funkcjonalność mikroprocesorowego systemu prototypowania MSP

Rozważany system MSP pozwala na modelowanie napędu przekształtnikowego z silnikiem klatkowym lub przekształtnika współpracującego z siecią zasilającą. Oba modele bazują na opisie matematycznym z wykorzystaniem równań stanu. Sygnałami wejściowymi dla modeli przekształtników są trzy sygnały sterujące tranzystorami górnymi ( $T_1$  do  $T_3$ ). W modelu napędu wykorzystywane są jeszcze wartość napięcia obwodu pośredniczącego  $U_{dc}$  i moment obciążenia  $M_o$ , zadawane z potencjometrów. W przypadku modelu przekształtnika współpracującego z siecią oprócz sygnałów sterujących tranzystorami wykorzystuje się potencjometr umożliwiający regulację prądu obciążenia  $I_{obc}$ . Sygnały sterujące tranzystorami pochodzą z testowanego sterownika przekształtnika. W badaniach wykorzystano do tego zainstalowaną w komputerze kartę DS1104 oprogramowaną za pomocą programu Matlab-Simulink [4]. Aby możliwa była realizacja algorytmów sterowania w sterowniku przemiennika, system MSP (STM32F4) musi zapewniać odpowiednie sprzężenia zwrotne. Są one realizowane za pomocą wyjść PWM w mikrokontrolerze, aktualizowanych co krok obliczeniowy, oraz odpowiednio dobranych analogowych filtrów dolno-przepustowych (LPF). Schemat połączeń między testowanym układem sterowania oraz systemem MSP przedstawiony został na rys. 1. Na rys. 2 natomiast pokazano przykładowy panel operatorski dla karty DS1104 pracującej jako sterownik przekształtnika do współpracy z siecią. Aby umożliwić poprawną pracę sterownika przekształtnika, jego model wypracowuje dwa sygnały napięć sieci, dwa sygnały prądów przekształtnika oraz sygnał napięcia obwodu pośredniczącego  $U_{dc}$ . Są to sygnały zwrotne na podstawie których sterownik przekształtnika (karta DS1104) w czasie rzeczywistym wypracowuje sygnały sterujące zaworami.



Rys. 1. Schemat połączeń między sterownikiem (karta DS1104) i modelem fizycznym przekształtnika z obiektem (STM32F4)



Rys. 2. Pulpit operatorski sterownika przekształtnika współpracującego z siecią (przygotowany w programie ControlDesk)

Program ControlDesk umożliwia wizualizację przebiegów wielkości charakteryzujących sieć, takich jak napięcia oraz prądy. Regulować w nim można wartość zadaną napięcia obwodu pośredniczącego  $U_{dc}$  i wpływać na parametry regulatorów. Dodatkowo w panelu możliwy jest wpływ na generację prądu biernego w modelu przekształtnika. Algorytm sterowania przekształtnikiem współpracującym z siecią został przygotowany w programie Matlab-Simulink, a wypracowane sygnały sterujące tranzystorami generowane są przez wyjścia PWM karty DS1104.

**Model przekształtnika z silnikiem**

Pierwszymi obliczeniami wykonywanymi w każdej pętli w mikrokontrolerze jest wyznaczenie napięć przekształtnika w nieruchomym układzie współrzędnych, na podstawie sygnałów sterujących tranzystorami. W przypadku modelu z silnikiem w dalszej części na podstawie nieliniowych równań opisujących maszynę asynchroniczną wyznacza się zmienne stanu, jakimi są: składowe wektorów przestrzennych strumieni skojarzonych stojana i wirnika. Następnie na podstawie strumieni obliczane są wartości prądów silnika oraz prędkość obrotowa, które stanowią sygnały sprzężeń zwrotnych do sterownika przekształtnika. Zastosowanie wektorów przestrzennych pozwala na uzyskanie w modelu równań różniczkowych o stałych współczynnikach. W modelu silnika rozpatrywany jest nieruchomy układ współrzędnych dla którego uzyskuje się poniższe równania:

$$\frac{d\Psi_{sk}}{dt} = U_{sk} - I_{sk} \cdot R_s \tag{1}$$

$$\frac{d\Psi_{rk}}{dt} = -I_{rk} \cdot R_r + j(-p_b \Omega) \cdot \Psi_{rk} \tag{2}$$

$$I_{sk} = \frac{1}{L_s \cdot L_{rk} - L_m^2} \cdot [L_r \cdot \Psi_{sk} - L_m \cdot \Psi_{rk}] \tag{3}$$

$$I_{rk} = \frac{1}{L_s \cdot L_{rk} - L_m^2} \cdot [L_s \cdot \Psi_{rk} - L_m \cdot \Psi_{sk}] \tag{4}$$

$$M_e = \frac{3}{2} p_b \cdot \text{Im} \{ \Psi_{sk}^* \cdot I_{sk} \} \tag{5}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_o) \tag{6}$$

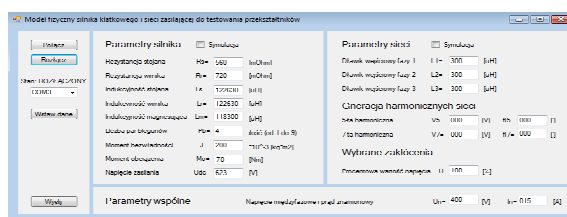
**Model przekształtnika z siecią**

Model przekształtnika współpracującego z siecią można znaleźć między innym w [5]. Po wyznaczeniu napięć przekształtnika korzysta się z równania (7) opisującego układ trójfazowy sieć-dławik-przekształtnik. Z równania (7) wyznacza się prądy sieci dla wartości napięć sieci wyznaczaną w kolejnych krokach obliczeniowych i przy pominięciu rezystancji dławika. Modelowane napięcie sieci uwzględnia podstawową harmoniczną oraz 5 i 7 harmoniczną. Następnie na podstawie prądów sieci i prądu obciążenia wyznaczone jest napięcie obwodu pośredniczącego.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \\ u_{Sc} \end{bmatrix} \tag{7}$$

**4. Aplikacja do parametryzacji systemu prototypowania**

Połączenie mikroprocesorowego systemu prototypowania MSP z komputerem odbywa się poprzez port RS323. Celem umożliwienia parametryzacji systemu MSP opracowano aplikację sterującą. Umożliwia ona połączenie mikrokontrolera z komputerem, wybór symulowanego w systemie MSP obiektu i ich parametryzację. Aplikacja przygotowana jest tak aby umożliwić symulowanie dwóch obiektów jednocześnie z uwagi na wspólne wprowadzenia oraz wejścia sterujące. Widok okna do parametryzacji obiektu w opracowanej aplikacji pokazano na rys. 3 [6].



Rys. 3. Okno programu sterującego modelem przekształtnika z obiektem

Okno główne podzielono na cztery pola. Pierwsze z nich związane jest z połączeniem układu do komputera. Odbywa się ono za pomocą przycisków "Połącz / Rozłącz" oraz wyboru portu COM z paska menu. Przycisk "Wstaw dane" automatycznie wstawia wartości przyjęte jako bazowe. Za pomocą przycisku "Wyślij" dane są przesyłane do mikrokontrolera, gdzie następnie są przetwarzane według wybranego przez użytkownika algorytmu.

Drugie pole to "Parametry silnika". Po zaznaczeniu opcji "Symulacja" i kliknięciu przycisku "Wyślij" w układzie MSP symulowany będzie przekształtnik z silnikiem klatkowym. Podobnie czynności należy wykonać w oknie "Parametry sieci", jeśli ma być symulowany przekształtnik współpracujący z siecią. Oba okna umożliwiają wprowadzenie podstawowych parametrów dla danego obiektu. Dla silnika są to rezystancje, indukcyjności, liczba par biegunów, moment bezwładności. Wartość momentu obciążenia oraz napięcia obwodu pośredniczącego jest ustawiana za pomocą potencjometrów względem parametrów wspólnych określonych w polu czwartym. W przypadku sieci ustawić można wartości dławików i pojemność kondensatora obwodu pośredniczącego. Dodatkowo możliwe jest generowanie harmonicznym (5 i 7-mej) oraz symulować zakłócenie w postaci zapadu.

W czwartym polu określa się "Parametry wspólne" jakimi są napięcie międzyfazowe i prąd znamionowy. Na ich podstawie wyznaczane są:

- dla układu z silnikiem – współczynniki skalowania dla momentu obciążenia i napięcia obwodu pośredniczącego
- dla układu z siecią – współczynniki skalowania prądu obciążenia i napięcia sieci.

Po kliknięciu przycisku "Wyślij" i zaznaczeniu opcji wybranej symulacji, w oknie pojawia się informacja jaki element jest aktualnie symulowany.

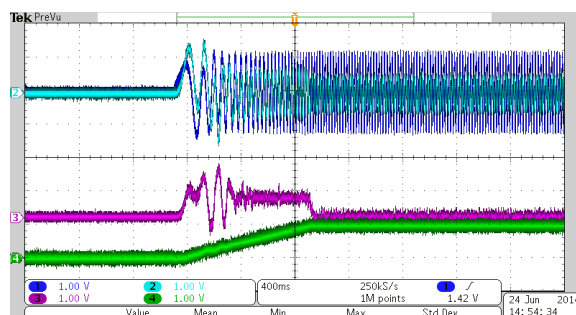
## 5. Badania eksperymentalne układu

Na podstawie wcześniej opisanych równań przygotowano dla układu MSP program pozwalający modelować oba obiekty. W celu jak najlepszego odwzorowania obiektów program został zoptymalizowany tak aby uzyskać jak najkrótsze pętle obliczeniowe. Dla każdego z modelowanych obiektów uzyskano czas wykonywania pojedynczej pętli krótszy niż 10  $\mu$ s.

## Model przekształtnika z silnikiem

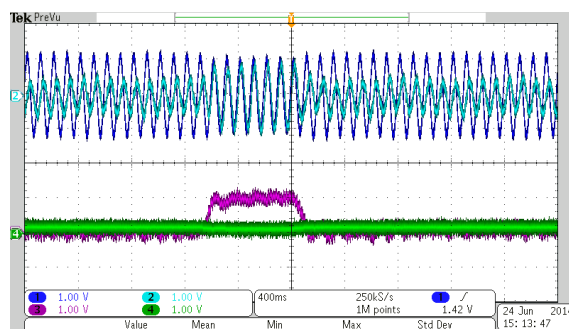
Na rys. 4 przedstawiono przykładowy przebieg rozruchu do częstotliwości 50 Hz, dla układu sterowania skalarnego. Przedstawiono przebiegi prądu silnika  $I_{sa}$ , strumień stojana  $\Psi_{sa}$ , momentu elektromagnetycznego  $M_e$  i prędkości  $\Omega$ .

Uzyskane wyniki pokazują pełną zbieżność modelu z rzeczywistym układem przekształtnik – silnik indukcyjny klatkowy. Przy rampie nastawionej na  $\pm 50$  można zaobserwować dobrą dynamikę układu i krótki czas ustalania przebiegów. Dochodzi przy tym do oscylacji w przebiegu momentu elektromagnetycznego, co jest zgodne z oczekiwaniami.



Rys. 4. Rozruch silnika klatkowego dla rampy nastawionej na  $\pm 50$  i częstotliwości zadanej  $f = 50$  Hz, (1- $I_{sa}$ , 2- $\Psi_{sa}$ , 3- $M_e$ , 4- $\Omega$ )

Na rys. 5 pokazano reakcję silnika na skokową zmianę momentu obciążenia. Jest ona związana ze zwiększeniem się prądów silnika, zmniejszeniem się prędkości wirowania wału i zwiększeniem momentu elektromagnetycznego w silniku. Na przebiegach widać, że silnik szybko reaguje na zmianę momentu, a uzyskane wyniki są w pełni zgodne z oczekiwaniami wynikającymi z teorii.



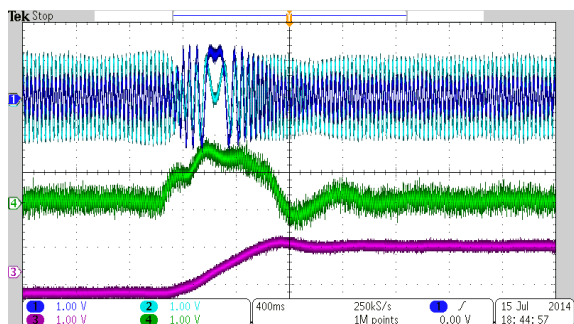
Rys. 5. Skok momentu  $M_o$  z wartości 0 do maksymalnej i ponownie do 0 dla częstotliwości zadanej  $f = 50$  Hz, (1- $I_{sa}$ , 2- $\Psi_{sa}$ , 3- $M_e$ , 4- $\Omega$ )

Rys. 6 przedstawia proces nawrotu silnika przy zastosowaniu w sterowniku napędu sterowania polowo-zorientowanego FOC. Uzyskane wy-



niki przedstawiono dla odstrojonych od warunków optymalnych nastaw regulatorów w celu pokazania możliwości badania wpływu nastaw regulatorów na pracę napędu.

Nawrót napędu przebiega w sposób kontrolowany. Preregulowania w momencie elektromagnetycznym wynikają z nastaw regulatora prędkości, jednak widoczne jest, że dla każdej prędkości (w tym równej zero) strumień, jak i prąd modelu silnika jest kontrolowany.

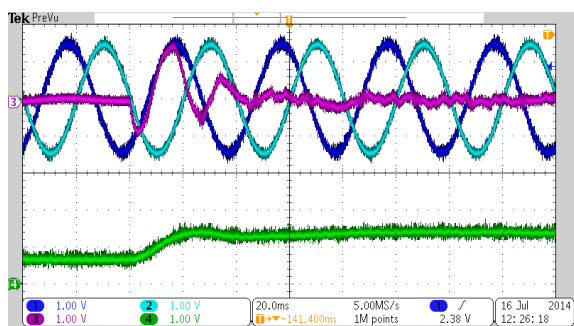


Rys. 6. Nawrót silnika klatkowego z prędkości  $-100\text{rad/s}$  do  $100\text{rad/s}$ , regulatora prędkości  $K_r = 0,4$ ,  $T_r = 0,05$ , (1- $I_{sa}$ , 2- $F_{sa}$ , 4- $M_e$ , 3- $\Omega$ )

#### Model przekształtnika do współpracy z siecią

Dalsze wyniki badań dotyczą przekształtnika współpracującego z siecią zasilającą.

Na rys. 7 pokazano proces ładowania kondensatora w obwodzie pośredniczącym przekształtnika. W początkowej fazie wartość prądu wynosi zero. Po załączeniu układu sterowania prąd zwiększa się a po naładowaniu kondensatora utrzymuje na wartości bliskiej zeru. Jednocześnie rośnie napięcie  $U_{dc}$  obwodu pośredniczącego. Uzyskane wyniki w pełni zgadzają się z oczekiwaniami dotyczącymi pracy takiego przekształtnika.

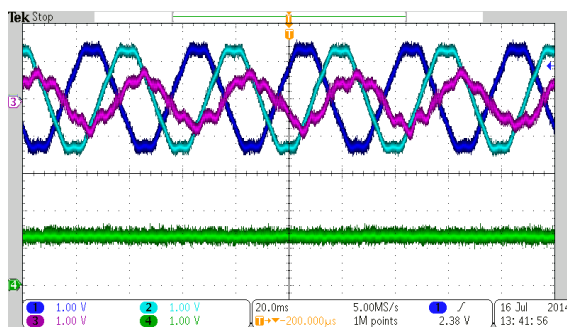


Rys. 7. Ładowanie kondensatora przy załączeniu przekształtnika, (1- $U_a$ , 2- $U_b$ , 3- $I$ , 4- $U_{dc}$ )

Na rys. 8 przedstawiono możliwość testowania wpływu harmonicznych napięcia na pracę przekształtnika współpracującego z siecią. Widoczne zarówno w przebiegach napięć, jak i prądu

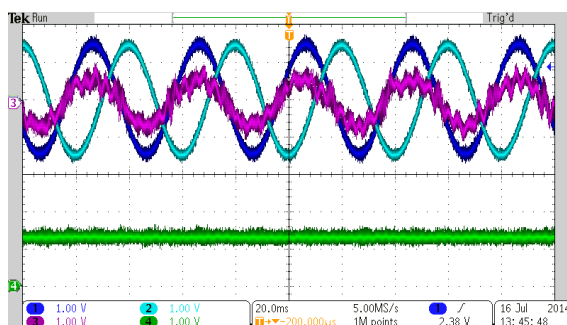
odkształcenia potwierdzają poprawność działania modelu przekształtnika. W modelu możliwe jest generowanie zawartości 5 i 7 harmonicznej, co pozwala badać odporność algorytmów sterowania przekształtników na te zakłócenia.

W programie nadrzędnym możliwa jest zmiana wartości indukcyjności dławików sieciowych oraz pojemności kondensatora obwodu DC. Zmniejszenie indukcyjności powoduje pojawienie się oscylacji w prądzie sieciowym, co również może być przebadane w modelu. Potwierdzają to wyniki przedstawione na rys. 9.

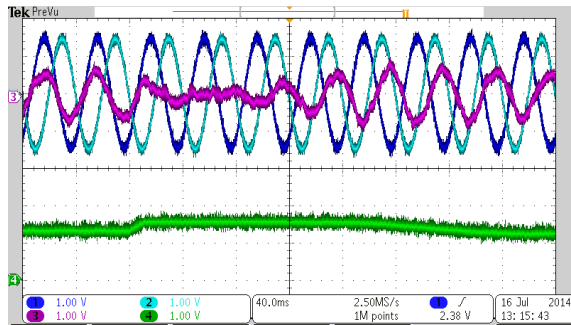


Rys. 8. Stan ustalony przy  $I_{obc} = 10\text{A}$ ,  $h5v = 10\text{V}$ ,  $f5 = 180^\circ$ ,  $h7v = 0\text{V}$ ,  $f7 = 0^\circ$  i zwrocie energii do sieci (1- $U_a$ , 2- $U_b$ , 3- $I$ , 4- $U_{dc}$ )

Układ umożliwia też zmianę prądu obciążenia za pomocą potencjometru. Graniczna wartość prądu sieciowego wynika z nastaw w programie nadrzędnym. Wykorzystując niebieski przycisk USER na systemie MSP przygotowano funkcję pozwalającą na zmianę kierunku przepływu mocy. W ten sposób możliwe jest testowanie pracy algorytmu sterowania przy skokowej zmianie prądu obciążenia. Proces przejścia z trybu poboru energii do jej zwrotu pokazano na rys. 10. W przekształtnikach współpracujących z siecią jest to typowy test weryfikujący pracę algorytmu sterowania.



Rys. 9. Stan ustalony przy  $I_{obc} = 10\text{A}$ ,  $L = 2\text{mH}$ ,  $C = 2\text{mF}$ , (1- $U_a$ , 2- $U_b$ , 3- $I$ , 4- $U_{dc}$ )



Rys. 10. Przejście z trybu poboru energii do jej zwrotu, (1- $U_w$ , 2- $U_b$ , 3- $I$ , 4- $U_{dc}$ )

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdzają możliwość wykorzystania w technice HIL mikrokontrolera STM32F4 pracującego jako model przekształtnika z odpowiednim obiektem. Uzyskane czasy wykonywania obliczeń są wystarczające do prawidłowego modelowania działania przekształtnika i obiektu. Uzyskane przebiegi wyjściowe są zgodne z oczekiwaniami i przebiegami uzyskiwanymi w rzeczywistych układach. Symulator napędu zachowuje się tak jak napęd rzeczywisty, umożliwiając podgląd wielkości mechanicznych i elektrycznych. Podobnie model przekształtnika z siecią odwzorowuje przebiegi wartości rzeczywistych prądów i napięć.

Opisany układ jest wygodnym i tanim rozwiązaniem, co stanowi jego zdecydowaną zaletę w stosunku do dostępnych systemów szybkiego prototypowania. Umożliwia testowanie układu sterowania bez dostępu do rzeczywistego obiektu. Dodatkowo możliwe jest badanie odporności algorytmu sterowania na zakłócenia, np. odkształcenia napięć w przekształtniku współpracującym z siecią, czy zmiany napięcia obwodu pośredniczącego w przekształtniku zasilającym silnik. Zaletą rozwiązania opisanego w artykule jest jego odporność na zadane wartości i błędne nastawy parametrów, które nie wpłyną na uszkodzenie obiektu. Równocześnie, przy prawidłowej parametryzacji istnieje możliwość testowania na przykład zabezpieczeń sterownika.

## 7. Literatura

- [1]. T. Biskup, B. Grzesik, J. Michalak: „Symulacja w czasie rzeczywistym układu kondycjonera mocy z wykorzystaniem karty dSPACE 1104”, *Elektronika*, nr 1, 2005.
- [2]. S. Szkolny, O. Małyszko: „Symulator typu Hardware-In-The-Loop do testowania generatorów

turbin wiatrowych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3, str. 269-274, 2014.

[3]. “Discovery kit for STM32F407/417 line, User Manual”, STMicroelectronics, 2014.

[4]. “DS1104 R&D Controller Board – Hardware Installation and Configuration”, dSPACE, Paderborn, 2005.

[5]. M. Malinowski: “Sensorless Control Strategies for Three- Phase PWM Rectifiers”, *Ph.D. Thesis, Warsaw University of Technology*, Warsaw, 2001.

[6]. D. Sotor: „Modele fizyczne napędu przekształtnikowego z silnikiem klatkowym i przekształtnika sieciowego do testowania sterowników”. *Praca dyplomowa, Politechnika Śląska*, Gliwice, 2014.

## Autorzy

dr inż. Jarosław Michalak  
Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki  
Napędu Elektrycznego i Robotyki  
ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice  
e-mail: jaroslaw.michalak@polsl.pl

mgr inż. Dominik Sotor  
e-mail: doniu.sot@wp.pl