

**Marek KORZENIEWSKI**  
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

## Mikroprocesorowy układ sterowania do trójpoziomowego przekształtnika napięcia

Dr inż. Marek KORZENIEWSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej. Od 2001 roku zatrudniony w Katedrze Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych na stanowisku asystenta. Zainteresowania naukowe obejmują zastosowania techniki cyfrowej (CPLD, FPGA, DSP) w układach sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi oraz nieliniowe metody bezpośredniego sterowania momentem i strumieniem silników indukcyjnych (DTFC).



e-mail: m.korzeniewski@pb.edu.pl

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano mikroprocesorowy układ sterowania zaprojektowany na potrzeby sterowania przekształtnikami trójpoziomowymi. Dzięki zastosowaniu jednostki obliczeniowej typu DSP (digital signal processor) układ sterowania charakteryzuje się wysoką wydajnością obliczeniową co umożliwia realizację skomplikowanych algorytmów sterowania w czasie rzeczywistym. Otwarta architektura systemu mikroprocesorowego zapewnia łatwą i szybką rozbudowę dzięki czemu możliwe jest zastosowanie układu w różnych aplikacjach przemysłowych.

**Słowa kluczowe:** DSP, CPLD, PWM, przekształtnik trójpoziomowy.

### Microprocessor control system for a three-level voltage converter

#### Abstract

The paper presents a microprocessor control system (Fig. 1) consisting of: a processor card (Fig. 3), an AD/DA converter card (Fig. 5), an interface card (PWM, deadtime, watchdog timer) for a voltage converter (Fig. 6) and a keyboard interface with LCD display (Fig. 7). The microprocessor control system was designed according to requirements for a three-level converter. Due to application of a floating point DSP (digital signal processor) unit, the system is characterised by high efficiency, which enables it to realise complicated control algorithms in real time. The open microprocessor control system architecture providing easy and fast development (Fig. 2) makes it possible to apply this system to industry. The presented control system is very useful for laboratories having AC/DC converters and DC/AC two and three-level converters. The microprocessor control system with a DSP unit is used for realisation of complex control algorithms, e.g. the ones described in [9, 10, 11].

**Keywords:** DSP, CPLD, PWM, three-level converter.

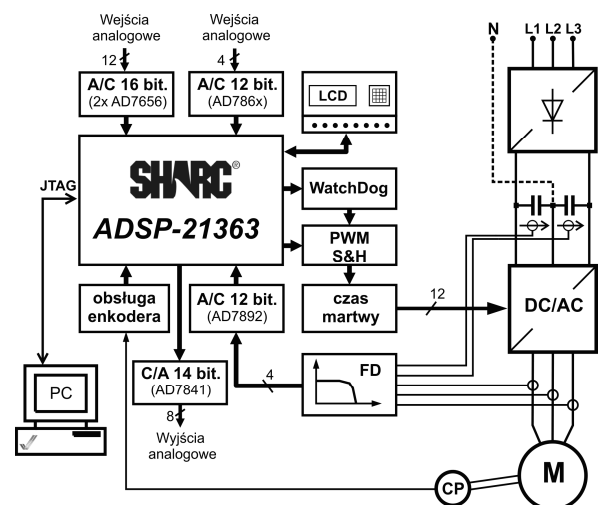
### 1. Wstęp

Przekształtniki energoelektroniczne w zasadniczy sposób zmieniły oblicze napędu elektrycznego. Intensywny rozwój technologii półprzewodnikowej i techniki mikroprocesorowej, w pełni sterowalne energoelektroniczne elementy mocy, ich łatwa dostępność są powodem tego, że buduje się znaczną ilość przekształtników energii (prostowniki, falowniki, kompensatory mocy), które pozwalają przekształcać pobieraną energię elektryczną w energię o regulowanej częstotliwości i amplitudzie. Obecnie standardem przemysłowym w układach sterowania jest stosowanie techniki cyfrowej, dzięki której możliwe jest osiągnięcie coraz to większej niezawodności, miniaturyzacji oraz funkcjonalności urządzenia. W nowoczesnych układach napędowych, gdzie występują zjawiska o bardzo małych stałych czasowych wymagane jest aby układ sterowania generował sygnał sterujący na podstawie danych z czujników pomiarowych, wykonując obliczenia w czasie rzeczywistym. Zastosowanie szybkich jednostek obliczeniowych typu DSP wspomaganymi układami programowalnymi typu CPLD (complex programmable logic device) i FPGA (field programmable

gate array) daje możliwość implementacji niezwykle złożonych algorytmów sterowania [1]. Ciągły rozwój energoelektroniki i związany z nim postęp w dziedzinie przekształtników powoduje, że coraz powszechniej stosowane są przekształtniki wielopoziomowe o różnych topologiach [2, 3]. Zwiększone możliwości przekształtników wielopoziomowych, z jednej strony sprawiają, że są one w stanie sprostać wymaganiom stawianym nowoczesnym układom napędowym, a z drugiej strony wymagają rozbudowanych układów sterowania, ze względu na zwielokrotnioną liczbą łączników półprzewodnikowych. Na rynku dostępnych jest wiele specjalizowanych układów DSP oraz mikrokontrolerów, które zostały zaprojektowane pod kątem zastosowań w energoelektronice i napędzie elektrycznym [4, 5, 6]. Do czołowych producentów tego typu układów należą: Analog Devices, Microchip, Texas Instruments oraz STMicroelectronics. Jednakże producenci ci w swoich rozwiązaniach stosują standardowe interfejsy współpracujące głównie z trójfazowymi przekształtnikami dwupoziomowymi typu 6T6D. Brak gotowych rozwiązań sprzętowych umożliwiających sterowanie przekształtnikami trój- i wielopoziomowymi przyczynił się do opracowania i wykonania niezbędnych interfejsów pośredniczących pomiędzy układem mikroprocesorowym, a trójpoziomym przekształtnikiem napięcia.

### 2. Charakterystyka układu sterowania

Mikroprocesorowy układ sterowania współpracujący z trójpoziomym przekształtnikiem DC/AC został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Układ z procesorem SHARC sterujący trójpoziomym przekształtnikiem napięcia

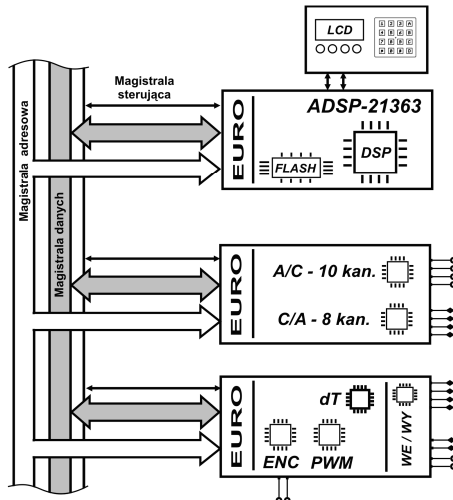
Fig. 1. System with a SHARC processor controlling the three-level converter

Głównym elementem układu sterowania jest zmiennoprzecinkowy procesor sygnałowy (DSP) należący do trzeciej generacji rodziny procesorów SHARC firmy Analog Devices. Zastosowany procesor ogólnego przeznaczenia ADSP-21363, charakteryzuje się wysoką wydajnością obliczeniową. Dzięki swojej uniwersalności jest chętnie stosowany w komunikacji, przetwarzaniu dźwięku i obrazu, jak również sprawdza się w energoelektronicznych układach sterowania napędami elektrycznymi.

Zaprojektowany i wykonany od podstaw cyfrowy układ sterowania posiada otwartą architekturę (rys. 2). Konceptcja taka umożliwia dowolną konfigurację poprzez wymianę lub dołączenie kart rozszerzeń w standardzie 64-wyprowadzeniowego złącza typu

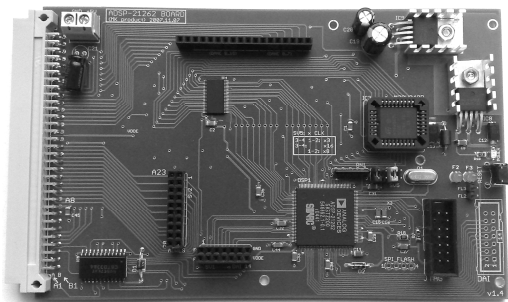
EURO. Spośród zaprojektowanych i wykonanych kart rozszerzeń stanowiących układy peryferyjne procesora DSP znajdują się:

- karta przetworników A/C (AD7864, AD7892) oraz C/A (AD7841),
- karta przetworników A/C (AD7865, AD7656),
- karta interfejsu do współpracy z przekształtnikiem trójfazowym oraz inkrementalnym czujnikiem położenia,
- karta obsługi wyświetlacza alfanumerycznego i klawiatury.

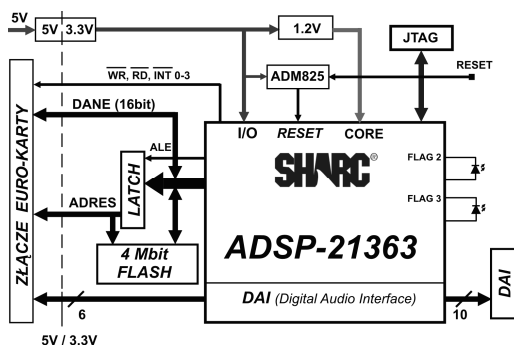


Rys. 2. Struktura układu sterowania w standardzie EURO  
Fig. 2. Structure of the control system in EURO standard

Procesor sygnałowy, który odpowiedzialny jest za realizację większości algorytmów sterujących pracą przekształtnika został umieszczony wraz z niezbędnymi peryferiami na osobnej karcie (rys. 3). Procesor posiada 3 Mbit wewnętrznej pamięci SRAM oraz 4 Mbit wewnętrznej pamięci ROM, co umożliwia przechowywanie rozbudowanych algorytmów sterowania i przetwarzania danych.



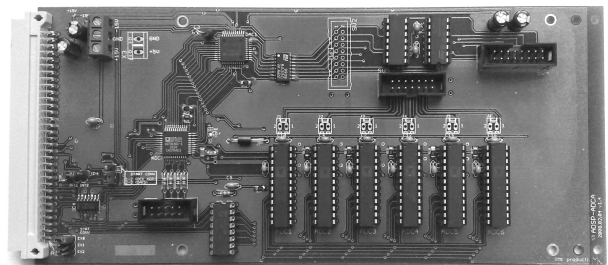
Rys. 3. Wygląd zaprojektowanej karty z procesorem DSP  
Fig. 3. View of the designed processor DSP card



Rys. 4. Schemat blokowy karty z procesorem DSP  
Fig. 4. Block diagram of the processor DSP card

Architektura tego procesora jest ukierunkowana na maksymalne szybkie wykonywanie operacji arytmetycznych na liczbach zmiennoprzecinkowych. Każda instrukcja w rdzeniu może być wykonywana w pojedynczym cyklu zegara, a wewnętrzne rozdzielone magistrale danych i adresu wraz z podręczną pamięcią instrukcji umożliwiają bardzo szybki przepływ danych do rdzenia procesora, osiągając wysoką szybkość wykonywanych instrukcji. Na karcie procesora (rys. 4), poza samym procesorem, znajdują się układy zasilania i kontroli poziomu napięcia, pamięć typu flash, układy translacji poziomów napięć sygnałów logicznych magistral danych, adresowej oraz sterującej. Zainstalowana zewnętrzna pamięć flash o pojemności 4 Mbit umożliwia wstępne ładowanie kodu programu do procesora oraz pracę autonomiczną bez sondy emulatora JTAG i oprogramowania narzędziowego.

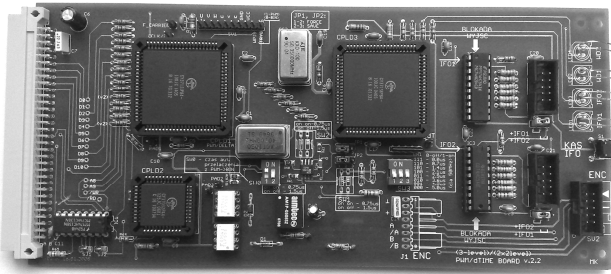
Na karcie przetworników (rys. 5) zostały zastosowane układy firmy Analog Devices typu AD7864 i AD7892 (A/C) oraz jeden układ typu AD7841 (C/A). Układ przetwornika AD7864 o rozdzielczości 12 bitów, którego łączny czas konwersji (cztery wejścia analogowe) wynosi  $4 \times 1,65 \mu\text{s}$ , posłużył do konwersji sygnałów ręcznego zadawania (potencjometri). Do konwersji sygnałów proporcjonalnych do prądów fazowych oraz napięć w obwodzie pośredniczącym napięcia stałego, zastosowano sześć szybkich układów AD7892 o rozdzielczości 12 bitów. Dzięki równoległemu próbkowaniu i przetwarzaniu łączny czas konwersji w torze pomiarowym prądów i napięć układu sterowania wynosi  $1 \mu\text{s}$ . Wszystkie wejścia przetworników A/C przystosowane są do standardu napięć zmieniających się w zakresie  $\pm 10 \text{ V}$ . Sygnały pomiarowe napięć oraz prądów pochodzące z czujników typu LEM, poddawane są procesowi filtracji w celu eliminacji wyższych harmonicznych leżących powyżej częstotliwości próbkowania i doprowadzone są do wejść przetworników A/C. Na karcie przetworników poza układami A/C umieszczony został ośmiokanałowy układ przetwornika AD7841 (C/A) o rozdzielczości 14 bitów. Umożliwił on wizualizację i rejestrację dowolnych sygnałów dostępnych w układzie sterowania za pośrednictwem oscyloskopu.



Rys. 5. Wygląd karty przetworników układu sterowania  
Fig. 5. View of the designed converter card for the control system

Zastosowany w układzie sterowania zmiennoprzecinkowy procesor sygnałowy, jako jednostka DSP ogólnego zastosowania, nie zawiera w swojej strukturze wyspecjalizowanych układów peryferyjnych, niezbędnych w aplikacjach takich jak spotykane w energoelektronice i napędzie elektrycznym. Z tego powodu niezbędne było zaprojektowanie i wykonanie interfejsu (rys. 6) pośredniczącego pomiędzy układem DSP a trójfazowym przekształtnikiem napięcia czy też układem odczytu kąta położenia wału maszyny. Tego typu interfejsy najczęściej realizuje się z wykorzystaniem układów logiki programowalnej CPLD [7] lub też FPGA [8]. Zaprojektowana i wykonana na potrzeby stanowiska badawczego karta interfejsów została zrealizowana z wykorzystaniem trzech układów typu CPLD. Na karcie został zaimplementowany interfejs enkodera (odczyt kąta położenia wału maszyny), modulator PWM (pulse width modulation), układy typu watchdog timer oraz układ formowania czasów martwych w impulsach sterujących. Realizacja tego typu interfejsów odciąża jednostkę DSP w operacjach obliczeniowych, upraszczając wymagany kod programu. Karta interfejsu współpracując z przekształtnikiem może pracować w dwóch trybach: modulatora PWM (wykorzystywanym np.

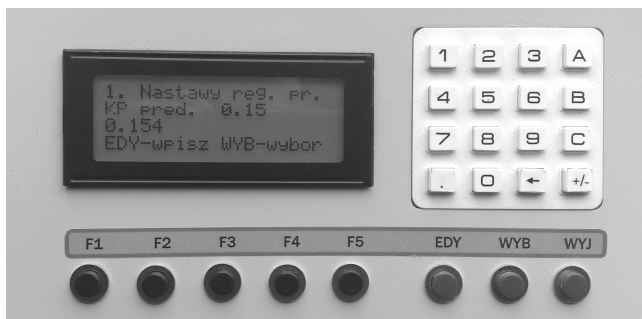
w metodzie sterowania DTC-SVM) oraz w trybie delta-modulacji używanym w algorytmach sterowania z regulatorami nieliniowymi.



Rys. 6. Wygląd zaprojektowanej karty zawierającej modulator PWM wraz z interfejsem enkodera  
Fig. 6. View of the designed card with PWM modulator and encoder interface

Rozdzielczość modulatora PWM wynosi 12 bitów z maksymalną częstotliwością sygnału nośnego na poziomie 10 kHz. Sygnały sterujące łącznikami tranzystorowymi z regulowanym czasem martwym wyprowadzone są na dwa wyjścia umożliwiające sterowanie jednym przekształtnikiem trójpoziomowym lub dwoma przekształtnikami typu 6T6D. Zabezpieczenie każdego z wyjść w stanach awaryjnych zrealizowane zostało w postaci układów typu watchdog timer. Zabezpieczenie to działa nie tylko w sytuacjach awaryjnych (np. zawieszenia procesora), ale również podczas rutynowego zatrzymania procesora przez sondę JTAG z poziomu komputera-hosta. Interfejs enkodera współpracuje z inkrementalnym czujnikiem położenia o rozdzielczości 2048 impulsów na jeden obrót wału zespołu napędowego.

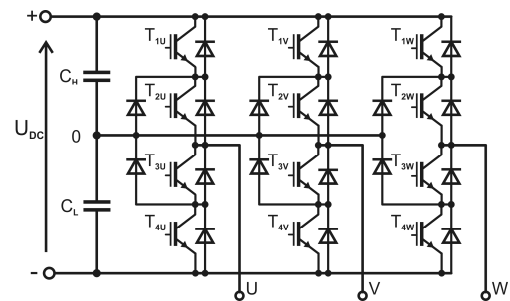
Komunikacja użytkownika z układem sterowania realizowana jest przez moduł wyświetlacza alfanumerycznego wraz z blokiem klawiatury numerycznej i przycisków funkcyjnych (rys. 7). Na wyświetlaczu zawierającym 4 linie po 40 znaków możliwe jest wyświetlanie komunikatów tekstowych oraz danych liczbowych stosowanych w układzie sterowania. Przyciski funkcyjne ułatwiają poruszanie się pomiędzy poszczególnymi opcjami dostępnymi z poziomu programu. Blok klawiatury numerycznej umożliwia wprowadzanie danych liczbowych (sygnały zadane, parametry regulatorów, itp.). Programowa obsługa protokołu wyświetlacza LCD, obsługa klawiatury numerycznej oraz wymiana danych pomiędzy wyświetlaczem a procesorem DSP została zrealizowana za pomocą 8-bitowych mikrokontrolerów PIC firmy Microchip.



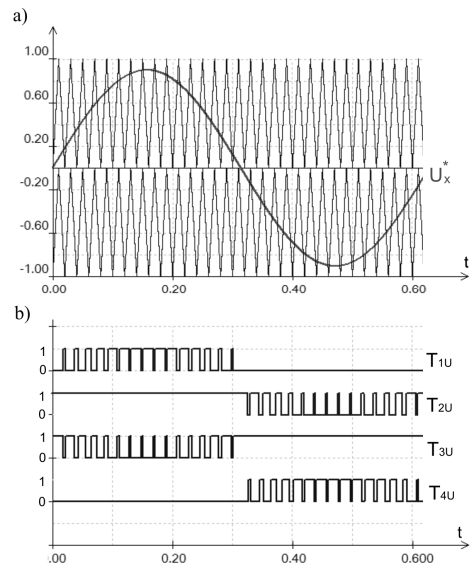
Rys. 7. Wygląd konsoli operatora z wyświetlaczem LCD  
Fig. 7. View of the operator panel with LCD display

W części silnoprądowej stanowiska badawczego zastosowano przekształtnik trójpoziomowy (rys. 8), który w porównaniu do przekształtnika dwupoziomowego zawiera dwukrotnie większą liczbę tranzystorów. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie większej liczby wektorów napięcia (rys. 11), komplikując tym samym strukturę układu sterowania oraz sam modulator PWM. Zasada formowania impulsów sterujących jednej fazy przekształtnika trójpoziomowego DC/AC z jednego kanału modulatora PWM została przedstawiona na rysunku 9. Impulsy sterujące łącznikami

tranzystorowymi przekształtnika DC/AC powstają w wyniku porównania sygnału zadanego  $U_x^*$  z dwoma trójkątnymi sygnałami nośnymi. Impulsy sterujące dla każdego z czterech łączników w danej fazie zależą od chwilowych wartości sygnałów zadanego  $U_x^*$  oraz trójkątnych sygnałów nośnych. Dla wartości sygnału zadanego  $U_x^*$  leżących w przedziale dodatnich wartości przełączany jest łącznik  $T_{1X}$  przy załączonym  $T_{2X}$  (rys. 9b). Natomiast dla ujemnych wartości przełączany jest  $T_{2X}$  przy wyłączonym łączniku  $T_{1X}$  (rys. 9b). Sygnały sterujące łącznikami  $T_{3X}$  lub  $T_{4X}$  powstają poprzez zanegowanie sygnałów odpowiednio  $T_{1X}$  oraz  $T_{2X}$ .



Rys. 8. Schemat przekształtnika trójpoziomowego  
Fig. 8. Circuit diagram of the three level converter



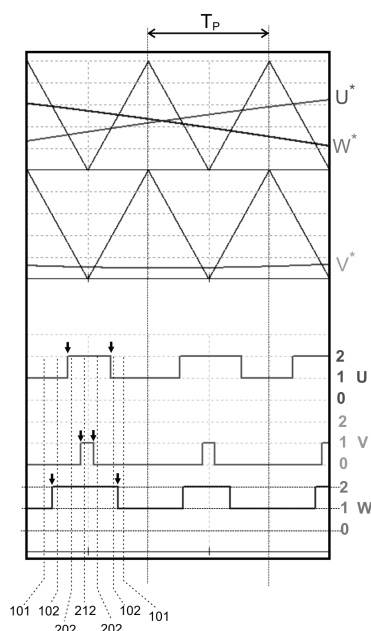
Rys. 9. Zasada formowania impulsów sterujących łącznikami przekształtnika trójpoziomowego w modulatorze PWM (faza U)  
Fig. 9. Principle of forming the switching signals of the three level converter in a PWM modulator (phase U)

Na przykładzie powyższej analizy działania jednego kanału modulatora PWM, sterującego przekształtnikiem trójpoziomowym, można przeprowadzić analizę działania oraz właściwości pełnego modulatora trójfazowego. Na rysunku 10 została wyjaśniona przykładowa zasada działania modulatora PWM, na wejście którego zostały podane trzy sygnały sinusoidalne przesunięte względem siebie o kąt  $2/3\pi$ , tworzące zadany wektor napięcia. W okresie sygnału nośnego  $T_p$  zadany wektor napięcia odtwarzany jest poprzez załączanie określonych wektorów w przekształtniku wynikających z porównania sygnałów zadanych ( $U^*$ ,  $V^*$ ,  $W^*$ ) oraz trójkątnych sygnałów nośnych. Aktualne stany łączników w każdej z faz (odpowiadająca określonemu wektorowi napięcia w przekształtniku) na rysunku 10 zakodowane są w postaci prostokątnych sygnałów o zmieniających się wartościach od 0 do 2, zdefiniowanych w ostatniej kolumnie w tabeli 1. Wartości te określają potencjały poszczególnych wyjść przekształtnika trójpoziomowego. W każdym okresie  $T_p$ , związanym ze zmianą sygnału trójkątnego, następuje sześć zmian stanów łączników (zaznaczone

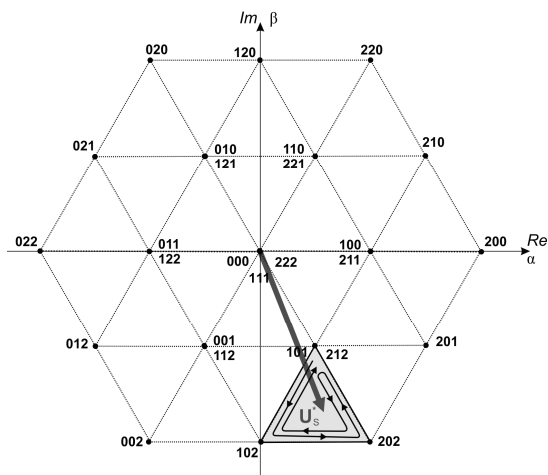
strzałkami na rysunku 10). Powoduje to wybranie kolejnego wektora napięcia ( $U_{101}$ ,  $U_{102}$ ,  $U_{202}$ ,  $U_{212}$ ,  $U_{202}$ ,  $U_{102}$ ,  $U_{101}$ ), który zgodnie z rysunkiem 11, bierze udział w odtwarzaniu zadanego wektora napięcia  $U_s^*$ . Wybrane kolejne wektory napięcia stanowią wierzchołki trójkąta równobocznego opisującego koniec zadanego wektora napięcia  $U_s^*$ .

Tab. 1. Stany łączników przekształtnika  
Tab. 1. Switch states of the three level converter

|                | $T_{1X}$ | $T_{2X}$ | $T_{3X}$ | $T_{4X}$ | $U, V, W$   |   |
|----------------|----------|----------|----------|----------|-------------|---|
| Stan łączników | 1        | 1        | 0        | 0        | $+U_{DC}$   | 2 |
|                | 0        | 0        | 1        | 1        | $-U_{DC}$   | 0 |
|                | 0        | 1        | 1        | 0        | 0           | 1 |
|                | 1        | 0        | 0        | 1        | Nie używany | - |



Rys. 10. Zasada działania trójfazowego modulatora PWM  
Fig. 10. Principle of operation of the three phase PWM modulator



Rys. 11. Kolejność wybieranych wektorów napięcia w przekształtniku trójpoziomym  
Fig. 11. Sequence of selected voltage vectors in the three level converter

Do programowania procesora sygnałowego SHARC firmy Analog Devices wykorzystano zintegrowane środowisko programistyczne VisualDSP++. Oprogramowanie zawiera kompilator języka wysokiego poziomu C/C++, narzędzia edycyjne, narzędzia

służące do uruchamiania programu w pracy ciągłej i krokowej z możliwością zastawiania pułapek programowych oraz podglądem i zmianą komórek pamięci i rejestrów procesora.

Oprogramowanie narzędziowe zainstalowane na komputerze PC, komunikuje się z procesorem sygnałowym za pośrednictwem sondy JTAG, która umożliwia wprowadzanie kodu programu do procesora oraz pozwala programować pamięć flash na karcie. Podstawową zaletą programowania z wykorzystaniem języka wysokiego poziomu jest fakt, że nie ogranicza on możliwości wykorzystania zaproponowanych algorytmów sterowania do jednego wybranego procesora lub rodziny procesorów, ale pozwala na przenoszenie opracowanych algorytmów na nowe, szybko rozwijające się i bardziej wydajne platformy procesorowe.

### 3. Wnioski

Przedstawiony układ sterowania był testowany w warunkach laboratoryjnych na stanowiskach badawczych z przekształtnikami typu AC/DC oraz DC/AC dwu- i trójpoziomymi. Umożliwił on implementację wielu odmian algorytmów sterowania opisywanych w literaturze [9, 10, 11]. Dzięki otwartej architekturze istnieje możliwość szybkiej rozbudowy i adaptacji układu sterowania o nowe karty rozszerzeń zaprojektowane na potrzeby różnego rodzaju przekształtników, zarówno trój- jak i wielofazowych. Podczas badań laboratoryjnych z sześciofazowym przekształtnikiem DC/AC zasilającym reaktor plazmy zainstalowany na Politechnice Lubelskiej, układ odznaczał się wysoką odpornością na zakłócenia pochodzące od wyładowań elektrycznych reaktora.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę S/WE/1/08.

### 4. Literatura

- [1] Petko M., Karpel G., Uhl T.: "Implementacja algorytmów sterowania w układach FPGA na przykładzie robota równoległego", PAK nr 5/2006, s. 27-30.
- [2] Hartman M. T.: Wielopoziomowe falowniki napięcia, PAN, Gdynia 2006.
- [3] Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z.: Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls and Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics 2002 August, Vol. 49, no. 4, s. 724-739.
- [4] Materiały źródłowe firmy Microchip: <http://www.microchip.com/Home/Products/16-bit-PIC-MCUs-&dsPIC-DSCs>.
- [5] Materiały źródłowe firmy Texas Instruments: <http://www.ti.com/Motor-Control-Guide>, 2008.
- [6] Materiały źródłowe firmy Analog Devices: <http://www.analog.com/>.
- [7] Aleksandrowicz S., Korzeniewski M.: Realizacja interfejsu procesora DSP z przekształtnikiem z zastosowaniem struktur CPLD, Czasopismo: Elektronizacja, 2003, nr 12, s. 24-29.
- [8] Lopez O., Alvarez J., Doval-Gandoy J., Freijedo F.D., Nogueiras A., Lago A., Penalver C.M.: Comparison of the FPGA Implementation of Two Multilevel Space Vector PWM Algorithms, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 55, Issue 4, April 2008 s. 1537-1547.
- [9] Sikorski A., Korzeniewski M., Ruszczyk A., Kaźmierkowski M.P., Antoniewicz P., Kołomyjski W., Jasiński M.: A comparison of properties of direct torque and flux control methods (DTC-SVM, DTC- $\delta$ , DTC-2x2, DTFC-3A). Computer as a tool: International Conference: EUROCON'2007, Warsaw, September 9-12, 2007.
- [10] Sikorski A., Korzeniewski M.: Porównanie właściwości trójpoziomowego przekształtnika DC/AC sterowanego metodami DTC-ST i DTC-SVM, Przegląd Elektrotechniczny 6/2008, s. 117-120.
- [11] Sikorski A., Korzeniewski M.: Trójpoziomowy przekształtnik napięcia sterowany nową metodą bezpośredniej regulacji strumienia i momentu silnika indukcyjnego, Przegląd Elektrotechniczny 6/2009, s. 46-49.