

# Trójfazowy falownik wektorowy – zestaw ewaluacyjny TMS320F28035, część 1

## Podstawy teoretyczne

*Falowniki są powszechnie stosowane do regulacji prędkości obrotowej silników prądu zmiennego, jednak najbardziej zaawansowane technicznie falowniki ze sterowaniem wektorowym były dotychczas oferowane tylko przez wyspecjalizowanych producentów. Dzięki najnowszym rozwiązaniom firmy Texas Instruments, falowniki wektorowe stają się dostępne dla szerokiej rzeszy konstruktorów-elektroników. Zastosowany w projekcie 32-bitowy mikrokontroler TMS320F28035 należy do intensywnie rozwijanej przez TI rodziny TMS320C2000.*

Falownik umożliwia regulację prędkości obrotowej trójfazowych silników AC poprzez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego. Najbardziej rozpowszechnione są asynchroniczne silniki z wirnikiem klatkowym, jednak ostatnio coraz większą popularność zdobywają silniki synchroniczne AC z wirującym magnesem (PMSM), ze względu na lepsze parametry dynamiczne, mniejszą masę i gabaryty. Silnik PMSM zasilany z falownika umożliwia utrzymywanie bardzo stabilnej prędkości obrotowej przy zmianach obciążenia, szybkie zmiany obrotów, możliwość pracy przy bardzo małych prędkościach obrotowych. Potrzeby rynku spowodowały ewolucję napędów z silnikami PMSM w dwóch kierunkach:

1. Precyzyjne napędy obrabiarek CNC i robotów przemysłowych. Silniki PMSM zasilane z wysokiej klasy falowników umożliwiają uzyskanie lepszych parametrów niż silniki krokowe, nawet dla mocy rzędu kilowatów. Wśród automatyków używana jest potoczna nazwa „napędy serwo AC”.
2. Sprzęt powszechnego użytku: AGD, klimatyzacja, wentylacja, automatyka budynków itp. Tutaj nie jest wymagana tak wysoka precyzja napędów, natomiast krytycznym parametrem jest niska cena sterownika. Stosuje się tutaj zarówno silniki PMSM, jak i silniki bezszczotkowe BLDC.

Układ TMS320F28035 jest dedykowany przez producenta do zastosowań w drugiej grupie urządzeń (ze względu na niską cenę), jednak jego parametry pozwalają na zbudowanie falownika o parametrach wystarczających do zastosowań w obydwu grupach.

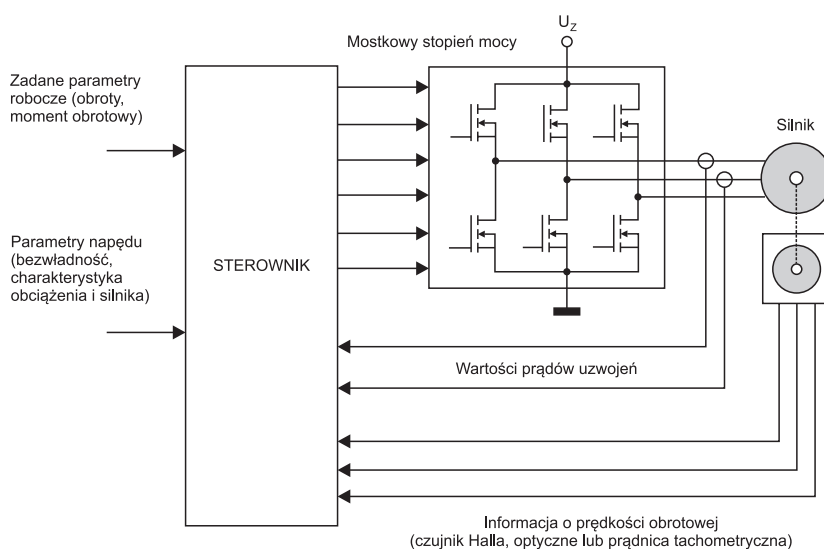
### Falownik U/f i wektorowy

Ze względu na indukcyjny charakter impedancji silnika, każdej zmianie częstotliwości napięcia zasilającego musi odpowiadać proporcjonalna zmiana amplitudy, co umożliwia zachowanie w miarę stałych wartości

momentu obrotowego i strumienia magnetycznego w całym zakresie zmian obrotów. Stały współczynnik V/Hz można obliczyć przykładowo:

$K = 230 \text{ V} / 50 \text{ Hz} = 4,6 \text{ V/Hz}$ . Przydatność takiej metody sterowania jest ograniczona do przypadków, gdy nie są wymagane częste i szybkie zmiany obrotów oraz nie występują gwałtowne zmiany momentu obciążenia. Trudno jest też zachować taki sam moment obrotowy dla bardzo niskich i bardzo wysokich (powyżej nominalnych) prędkości obrotowych. Poza tym przy skokowej zmianie częstotliwości na wyjściu falownika lub momentu obciążenia gwałtownie rośnie pobór prądu oraz pojawiają się niestabilności w pracy silnika.

Bardziej zaawansowane algorytmy sterowania wykorzystują zamkniętą pętlę sprzężenia zwrotnego (**rys. 1**). Stopień mocy w układzie mostkowym jest zasilany napięciem stałym o wartości równej maksymalnej amplitudzie napięcia wyjściowego, sinusoidalne napięcia fazowe są kształtowane me-



Rys. 1.

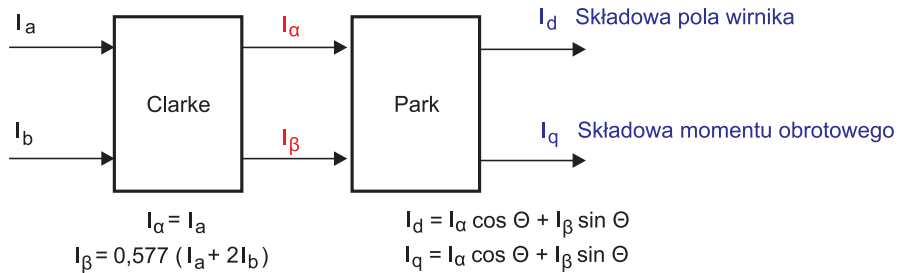
totą modulacji PWM. Zadaniem sterownika jest ukształtowanie fazowych napięć zasilających o takiej częstotliwości i amplitudzie, aby uzyskać zadaną prędkość obrotową i moment oraz zapewnić optymalną pracę silnika przy zmianach obciążenia. Algorytm sterujący musi uwzględniać specyficzne parametry napędu: bezwładność obciążenia, moc i charakterystykę silnika, wymaganą wartość momentu rozruchowego oraz zależność obciążenia od obrotów. Niestety nie można tu zastosować bezpośrednio klasycznych algorytmów sterowania proporcjonalnego PI/PID ze względu na skomplikowane zależności matematyczne i wielowymiarowość parametrów wejściowych. Wyniki analizy wektorowej muszą zostać przetworzone tak, aby mogły być zastosowane jako zmienne wejściowe pętli regulacji.

Wymagane moce obliczeniowe są dość duże, dlatego w falownikach wektorowych często stosuje się rozwiązania dwuprocessorowe: główny kontroler aplikacji (16- lub 32-bitowy) jest wspomagany szybkim procesorem DSP, służącym do zmiennoprzecinkowych obliczeń matematycznych.

W falownikach przeznaczonych do precyzyjnych napędów jako czujniki obrotów/położenia wirnika stosuje się enkodery lub resolwery. Tańsze rozwiązania wykorzystują bezczujnikowe metody estymacji obrotów i pozycji kątowej wirnika. Potocznie używa się nazwy „falownik wektorowy” do różnych rodzajów falowników z zamkniętą pętlą regulacji, chociaż prawidłowo nazwa ta odnosi się jedynie do algorytmów zorientowanych na wirujący wektor pola magnetycznego.

### Algorytm wektorowy FOC

Jednym z najbardziej popularnych algorytmów sterowania silnikiem trójfazowym jest FOC (*Field Oriented Control*) – metoda zorientowana na bezpośrednie sterowanie wirującym polem magnetycznym stojana. Ruch obrotowy wirnika jest wywołany przez oddziaływanie pola magnetycznego stojana na pole magnetyczne wirnika, ale oddziaływanie to jest wzajemne. W zależności od prędkości obrotowej i aktualnego położenia wirnika, występują określone zmiany wartości chwilowej prądów poszczególnych uzwojeń i przesunięć fazowych prądu względem napięcia. Porównując wartości zmierzone z teoretycznym modelem matematycznym, można uzyskać wszystkie niezbędne informacje o aktualnych parametrach roboczych silnika (strumień, moment, obciążenie itp.). Suma geometryczna prądów fazowych wynosi zawsze zero, dlatego wystarczy pomiar dwóch prądów fazowych, a trzeci prąd wynika z obliczeń. Jediną trudnością jest konieczność próbkowania wartości prądów z dość dużą częstotliwością i wykonywania skomplikowanych obliczeń w czasie rzeczywistym.



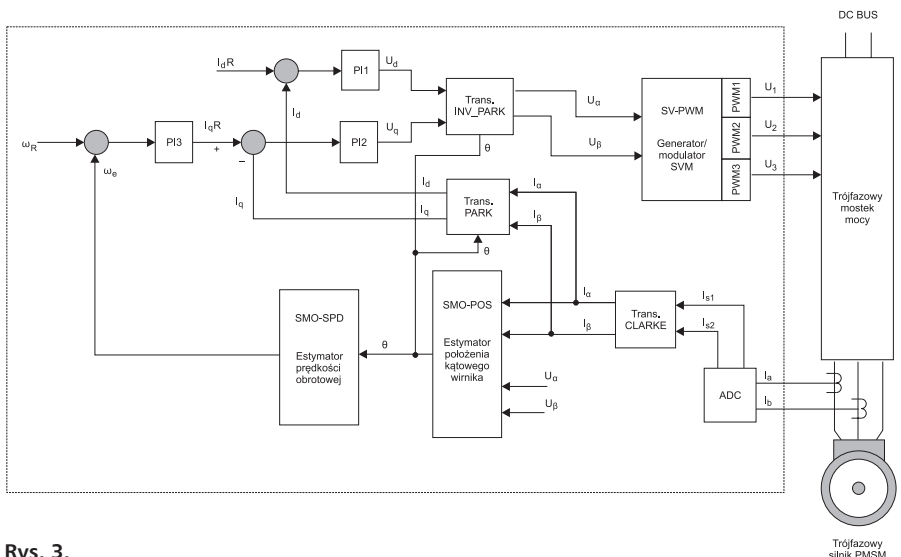
Rys. 2.

### Transformacje ułatwiają życie

Komplikacje matematyczne wynikają stąd, że zarówno model matematyczny wirującego pola, jak i prądy uzwojeń są przedstawiane jako wektory wirujące w przestrzeni trójwymiarowej, a wyniki analizy wektorowej nie mogą być bezpośrednio odniesione do fizycznych parametrów napędu (prędkość, moment). Z pomocą przychodzą transformacje matematyczne: Clarke’a i Parka (rys. 2). Wirujący wektor prądu łatwiej jest przedstawiać w dwuosiowym układzie współrzędnych prostokątnych, zatem transformacja Clarke’a w taki sposób przetwarza zmierzone prądy, że wektor prądu jest przedstawiany dwoma składowymi, zamiast trzema. Transformacja Clarke’a odwzorowuje trójfazowy wirujący wektor pola magnetycznego na dwuwymiarowy wektor zespolony wirujący na płaszczyźnie. Transformacja Parka wprowadza jako odniesienie wirujący układ współrzędnych, przetwarzając wektor zespolony na zmienne proste, zależne tylko od czasu. Jeżeli prądy fazowe będą cyklicznie próbkowane, to otrzymamy ciąg wartości statycznych, które mogą być traktowane jako stałoprądowe. Parametr  $\theta$  występujący w transformacji Parka to chwilowe położenie kątowe wirnika, uzyskiwane w metodzie bezczujnikowej za pomocą cyfrowego estymatora pozycji, a w metodzie czujnikowej – z czujnika pozycji wirnika.

Działanie transformacji Parka można pokazać na przykładzie transmisji telewizyjnych z zawodów sportowych. W konku-

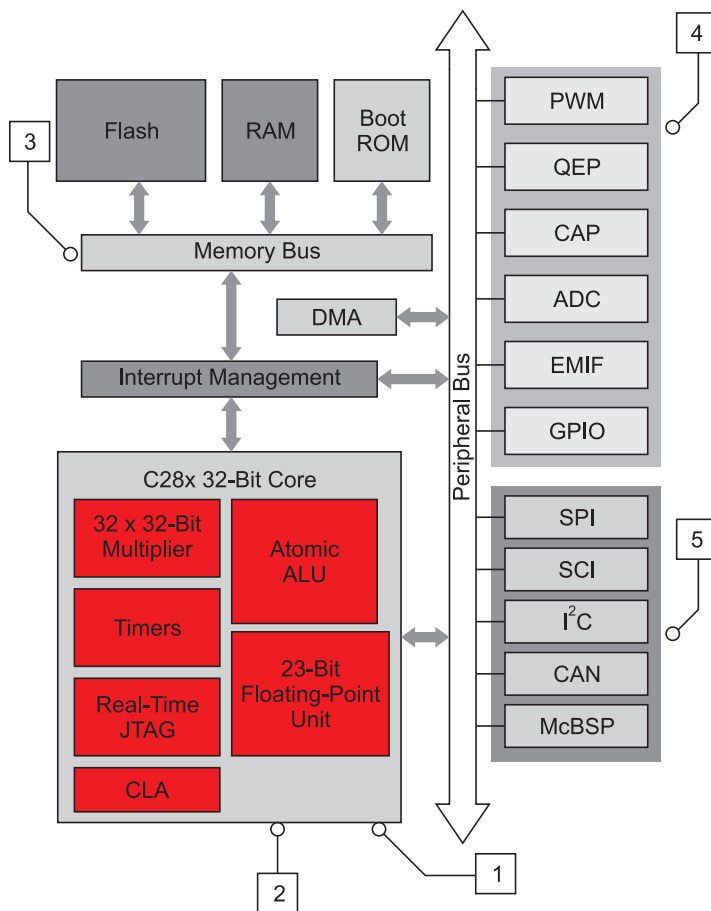
rencjach biegowych często stosuje się kamerę poruszającą się po specjalnym torze, równoległe do biegnących zawodników. Na obrazie z takiej kamery, biegacze wydają się stać w miejscu, tylko nieznacznie zmieniają pozycje względem siebie. Jeżeli teraz wydzielimy z tego obrazu pojedyncze klatki, to otrzymamy ciąg statycznych obrazów, przedstawiających kolejne fazy wyścigu. Transformacja Parka to odpowiednik takiej kamery, zamontowanej na wirniku silnika i obserwującej wirujące pole magnetyczne stojana. Efektem zastosowania transformacji Clarke’a i Parka w algorytmie sterowania wektorowego są dwie stałoprądowe składowe  $I_d$  oraz  $I_q$ . Obydwie składowe mają swoją interpretację fizyczną:  $I_d$  odpowiada wartości strumienia magnesującego, a  $I_q$  – wartości momentu obrotowego silnika. Algorytm regulacji powinien dążyć do maksymalizacji składowej  $I_q$ , a minimalizacji składowej  $I_d$ , wtedy sprawność silnika będzie największa. Dzięki transformacji prądów uzwojeń stojana do wartości stałoprądowych można bez problemu zastosować do nich algorytmy regulacji proporcjonalnej PID. W praktycznych rozwiązaniach obie składowe prądowe są regulowane za pomocą oddzielnych regulatorów PID. Wartość odniesienia dla sterownika  $I_d$  jest stała, aby uzyskać niezmienną wartość strumienia magnetycznego, regulator  $I_q$  współpracuje z trzecią pętlą PID, tworząc układ regulacji prędkości obrotowej i momentu. Sygnały wyjściowe regulatorów PID są poddawane



Rys. 3.

**Słowniczek skrótów angielskich:**

- ACIM** (AC Induction Motor) – silnik indukcyjny AC
- BLDC** (Brushless DC Motor) – silnik bezszczotkowy prądu stałego
- FOC** (Field Oriented Control) – sterowanie zorientowane zgodnie z wektorem pola magnetycznego
- PFC** (Power Factor Correction) – korekcja współczynnika mocy
- PMSM** (Permanent Magnet Synchronous Motor) – silnik synchroniczny AC ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, umieszczonych w wirniku
- SMO** (Sliding Mode Observer) – obserwator z ruchem ślizgowym; algorytm matematyczny, umożliwiający estymację wartości nieznanego parametru procesu na podstawie obserwacji próbek innych parametrów tego procesu
- SVM** (Space Vector Modulator) – algorytm obliczający czas przewodzenia poszczególnych tranzystorów w mostku falownika na podstawie zadanego, zespolonego wektora napięcia ( $U_\alpha$ ,  $U_\beta$ ).
- VSI** (Voltage Source Inverter) – falownik (z pośredniczącym obwodem napięcia stałego)



odwrotnej transformacji Parka i Clarke'a, a następnie sterują generowaniem sinusoidalnych napięć fazowych, zasilających stojan. Schemat blokowy kompletnego systemu sterowania wektorowego silnikiem z wirującym magnesem jest przedstawiony

Rys. 4.

R
E
K
L

A
M
A

**ul. Grabiszyńska 240**  
53-235 Wrocław

tel. (0-71) 339 00 29  
339 00 30  
faks (0-71) 339 05 01  
lemibis@lemi.pl

**złącza HDC**

**złączki listwowe**

**przyciski sterownicze**

**przełączniki elektromagnetyczne**

**SSR**

**przełączniki czasowe**

**czujniki indukcyjne i pojemnościowe**

**czujniki fotoelektryczne**

**regulatory temperatury PID**

**impulsowe zasilacze przemysłowe**

**www.lemi.pl**

**SKLEP INTERNETOWY 24h**

SPRZEDAŻ PEŁNEGO ASORTYMENTU Z MAGAZYNU ✦ NAJLEPSZE CENY NA RYNKU

✦ POSZUKUJEMY DYSTRYBUTORÓW LOKALNYCH  
✦ DOSKONAŁE WARUNKI HANDLOWE  
✦ DUŻE RABATY

## KOMPLEKSOWE ROZWIĄZANIA DLA PRODUCENTÓW ELEKTRONIKI

- produkcja • modyfikacje • kompletacje •
- KLAWIATURY** dopasowane do aplikacji:
- membranowe • silikonowe • STK • PCB •
- OBUDOWY** najlepsze w swojej kategorii •
- od światowych liderów:

**OKW** elegancja i smak

**ROLEC** wyjątkowa ochrona

**apra norm** ładne i użyteczne

panelowe i 19"

## TECHNOLOGIE

bogaty wybór opcji:  
podświetlanie • ochrona EMI/RFI • połączenia elastyczne • folie SPeDO i wiele, wiele innych...

# ELEKTRONIK

www.lcel.com.pl

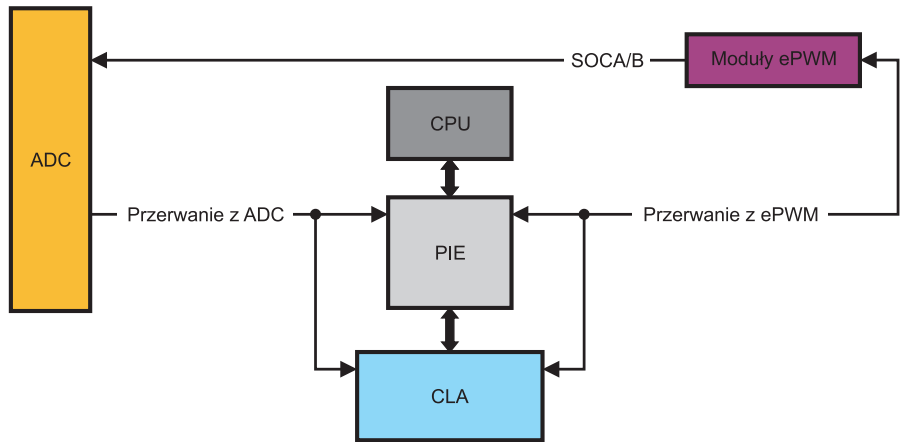
LC Elektronik 01-969 Warszawa ul. Pułkowska 58  
tel +48 22 569 53 00 fax +48 22 569 53 10

na rys. 3. Poszczególne moduły sprzętowe i programowe pełnią następujące funkcje:

- Moduł ADC odpowiada za pomiar dwóch prądów uzwojeń i ich przetworzenie na wartości cyfrowe  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ .
- Wartości prądów  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$  przetworzone przez moduły transformacji CLARKE i PARK na składowe  $I_d$  oraz  $I_q$  trafiają na wejścia dwóch regulatorów proporcjonalnych PI1 (strumienia magnetycznego) i PI2 (momentu obrotowego). Trzeci regulator PI3 służy do regulacji prędkości obrotowej na podstawie zadanej wartości referencyjnej  $\omega_r$ .
- Moduł odwrotnej transformacji Parka INV-PARK przetwarza napięcia wyjściowe regulatorów PI1, PI2 na zmienne wektorowe, odpowiednie do sterowania trójfazowym generatorem napięć sinusoidalnych, SV-PWM.
- Generator SV-PWM integruje w sobie funkcje odwrotnej transformaty Clarke'a oraz modulatora pracującego według algorytmu SVM *Space Vector Modulation*. Zastosowanie układu SVM umożliwia minimalizację strat mocy w mostku i ograniczenie zawartości harmonicznych w sygnale wyjściowym. Moduł SV-PWM steruje trzema generatorami PWM tak, aby uzyskać zadane obwiednie napięć sinusoidalnych. Zmodulowane napięcia PWM1...PWM3 są podawane na wejścia stopnia mocy ( tranzystorowego mostka trójfazowego).
- Dwa bloki SMO to tzw. obserwatory ślizgowe – algorytmy estymatorów położenia kąowego wirnika (SMO-POS) oraz prędkości obrotowej (SMO-SPD). Estymator SMO-POS przekazuje informacje o położeniu kątowym wirnika (parametr  $\Theta$ ) do modułów transformacji PARK oraz INV-PARK. Estymator SMO-SPD określa wartość bieżącej prędkości  $\omega_e$ , która jest następnie porównywana z wartością referencyjną  $\omega_r$ .

### Od teorii do praktyki – mikrokontroler TMS320F28035

Mikrokontroler zastosowany w projekcie należy do rodziny 32-bitowych układów TMS320C2000, które mogą być bardzo dobrą alternatywą dla kontrolerów z rdzeniem ARM Cortex-M3. Rodzina C2000 dzieli się na 2 podrodziny: *Piccolo* – tanie układy do mniej wymagających aplikacji oraz *Delfino* – układy wyższej klasy, o bardzo dużych możliwościach obliczeniowych i sprzętowych. Co prawda TMS320F28035 należy do serii *Piccolo*, ale jego możliwości i tak przekraczają potrzeby falownika wektorowego. Dlatego



Rys. 5.

też w projekcie przewidziano możliwość niezależnego sterowania dwoma silnikami PMSM oraz dodatkowo – aktywną korekcję współczynnika mocy (PFC). Rys. 4 przedstawia schemat blokowy mikrokontrolera TMS320F28035. Poszczególne bloki funkcjonalne mają następujące właściwości:

1. Rdzeń 32-bitowy, pracujący z zegarem 60 MHz, wyposażony w sprzętowy układ mnożący  $32 \times 32$  bity, jednostkę wspomagającą arytmetykę zmiennoprzecinkową oraz trzy 32-bitowe timery. CPU może wykonywać instrukcje 16- i 32-bitowe, zachowana jest kompatybilność oprogramowania w ramach całej rodziny C2000.
2. Akcelerator operacji logicznych i pętli sterujących CLA (Control Law Accelerator) wspomaga wykonywanie pętli regulacyjnych, obsługę przerw i urządzeń peryferyjnych. Układ CLA ma własny zestaw rejestrów, szynę dostępu do pamięci oraz jednostkę centralną. Dzięki bezpośredniemu dostępowi do układów peryferyjnych i własnemu systemowi obsługi przerw, CLA może przejąć obsługę wybranych przerw od głównego kontrolera przerw (PIE) i obsłużyć je bez angażowania CPU, może też generować sygnały sterujące do urządzeń peryferyjnych. Typowa pętla regulacyjna, wykorzystująca generator PWM oraz przetwornik A/C, może zostać obsłużona przez CLA, zwalniając moc obliczeniową CPU do innych zadań (rys. 5). Dzięki temu wydajność mikrokontrolera w aplikacjach czasu rzeczywistego może być nawet o 50% większa. Przesyłanie informacji pomiędzy CPU i CLA odbywa się poprzez wydzielony obszar pamięci RAM. Jest to ciekawe rozwiązanie, odmienne od typowych konfiguracji: CPU + koprocesor arytmetyczny. Jednostka CLA może też wykonywać operacje ary-

metyczne, ale jej głównym zadaniem jest odciążenie CPU poprzez przejęcie wykonywania krytycznych czasowo procedur decyzyjnych.

3. Mikrokontroler wykorzystuje zmodyfikowaną architekturę Harvard, z oddzielnymi szynami danych dla pamięci i dla urządzeń peryferyjnych. TMS320F28035 jest wyposażony w 128 kB pamięci Flash, 20 kB RAM oraz 2 kB pamięci OTP, wykorzystywanej jako Boot-ROM. System obsługi przerw może obsłużyć do 96 wektorów przerw.
4. Wyposażenie w urządzenia peryferyjne jest bardzo bogate: 12 generatorów PWM o wysokiej rozdzielczości (do 150 ps) z indywidualnymi 16-bitowymi timerami, przetwornik kwadraturowy do współpracy z enkoderem (QEP), liczniki/komparatory cyfrowe, szybki (217 ns) przetwornik ADC o 12-bitowej rozdzielczości, do 45 konfigurowanych we/wy cyfrowych (GPIO) z filtracją sygnałów wejściowych.
5. Interfejsy komunikacyjne:  $1 \times$ UART,  $2 \times$ SPI,  $1 \times$ I<sup>2</sup>C,  $1 \times$ LIN,  $1 \times$ CAN.

Układ TMS320F28035 nie jest jedynie kolejnym mikrokontrolerem dedykowanym do sterowania silnikami. Inżynierowie z Texas Instruments wykonali całą czarną robotę konstruktorską, oferując klientom kompletny projekt falownika wektorowego, szczegółowo dopracowany zarówno od strony sprzętowej, jak i oprogramowania. Opis falownika zbudowanego na bazie zestawu ewaluacyjnego – w kolejnej części artykułu.

**Jacek Przepiórkowski**

*Podziękowania dla dr. inż. Stefana Brocka z Zakładu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej za konsultacje i korektę merytoryczną tekstu.*