

Rys. 6. Zestawu Piccolo Motor Control Developer's Kit

# Trójfazowy falownik wektorowy (2)

## Opis zestawu TMS320F28035

*Po odpowiednim przygotowaniu teoretycznym możemy już przyrzeć się zawartości zestawu ewaluacyjnego. Texas Instruments oferuje dwie wersje zestawu, prostsza umożliwi sterowanie jednym silnikiem, a bardziej rozbudowana – dwoma silnikami jednocześnie. Do testów została udostępniona bogatsza wersja zestawu.*

Od pierwszej chwili zestaw robi wrażenie swoimi rozmiarami i bogactwem wyposażenia. Sporej wielkości pudło zawiera wszystkie komponenty (rys. 6), umożliwiające budowę i przetestowanie falownika. Nie zapomniano o kablach sieciowych z trzema standardami wtyczek ani o kabelku USB, co się nagminnie zdarza na przykład producentom drukarek. W skład zestawu *Piccolo Motor Control Developer's Kit* wchodzi:

1. Główna płyta bazowa, zawierająca dwa stopnie mocy w układzie mostka trójfazowego, zbudowana w oparciu o scalone sterowniki DRV8402. Poza tym płyta zawiera aktywny 2-fazowy układ korekcji

współczynnika mocy (PFC), gniazdo dla modułu mikrokontrolera oraz optoizolowany emulator interfejsu USB « JTAG do komunikacji z PC.

2. Płyta Piccolo Control Card z mikrokontrolerem TMS320F28035, wykonana w postaci modułu DIMM 100-pin, wkładanego w gniazdo na płycie bazowej (rys. 7). Takie rozwiązanie umożliwia wymienne stosowanie modułów z różnymi typami kontrolerów rodziny F2000, w różnych płytach bazowych. Moduł jest przystosowany do zasilania 5 V, zawiera stabilizator napięcia z filtrem zakłóceń, kwarc zegarowy, izolowany interfejs RS-

232, przełączniki konfiguracyjne oraz wprowadzone na złącze wszystkie istotne piny mikrokontrolera. Moduły Control Card mogą być też zakupione oddzielnie i wykorzystywane przez konstruktorów we własnych projektach.

3. Dwa 3-różfazowe silniki z wirującym magnesem (PMSM) o mocy 30 W/24 V.
4. Zasilacz sieciowy 24 V/60 W
5. Płyta z oprogramowaniem: Code Composer Studio IDE V3.3. Załączona wersja jest przeznaczona do mikrokontrolerów rodziny TMS320C2000. Jest to bezpłatna wersja demo, bez ograniczeń funkcjonalności, ale z ograniczeniem kodu wynikowego do 32 kB.
6. Broszura *Quick Start Guide* – instrukcja przygotowania zestawu do pracy. Zawiera krótki opis funkcjonalny sprzętu, sposób ustawienia zworek i przełączników konfiguracyjnych, opis instalacji oprogramowania.



Rys. 7. Płytką Piccolo Control Card z mikrokontrolerem TMS320F28035

### Konfiguracja sprzętowa

Na rys. 8 pokazano schemat blokowy kompletnego falownika, sterującego dwoma silnikami trójfazowymi z wirującym magnesem (PMSM). Stopnie wyjściowe mocy wykorzystują układy scalonych mostków tranzystorowych DRV8402. Każdy układ DRV8402 zawiera 4 gałęzie półmostkowe i może sterować mocą wyjściową do 250 W (50 V/5 A), przy sprawności do 96%. Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne płytki demonstracyjnej, moc maksymalna zestawu wynosi 40 W przy chłodzeniu naturalnym i 80 W przy wymuszonym obiegu powietrza. Wewnętrzny układ kombinacyjny sterownika DRV8402 generuje sygnały sterujące górnymi i dolnymi tranzystorami mostka trójfazowego na podstawie trzech sygnałów wejściowych. Czwarta gałąź mostka nie jest wykorzystywana w tej aplikacji, jednak jest też okablowana i może posłużyć np. do eksperymentów z silnikami krokowymi lub BLDC. Pomiar prądów fazowych umożliwiają rezystory szeregowe, włączone w gałęzie mostka od strony masy, napięcia pomiarowe są dołączone do wejść przetwornika ADC w procesorze za pośrednictwem wzmacniaczy

operacyjnych (OPA2350). Dla silnika nr 1 dokonywany jest także pomiar napięć fazowych. Napięcie zasilające DC-Bus (24 V) jest kontrolowane przez układ dwufazowego, aktywnego korektora współczynnika mocy (PFC). Układ PFC optymalizuje kształt prądu pobieranego oraz stabilizuje napięcie DC-Bus.

Procesor TMS320F28035 jest przystosowany do programowania ISP i debugowania programów za pośrednictwem standardowego interfejsu JTAG. Na płytce bazowej znajduje się emulator USB « JTAG, zbudowany na układzie FT2232.

Płytką bazową jest wyposażona w dużą liczbę zwerek konfiguracyjnych oraz złączy z wyprowadzonymi sygnałami. Daje to możliwość przeprowadzania eksperymentów w różnorodnych konfiguracjach układowych i podłączania dodatkowych urządzeń jak:

- Enkoder lub czujnik prędkości obrotowej silnika. Płytką zawiera złącza do przyłączenia enkodera do wejść demodulatora kwadraturowego (QEP) lub czujnika obrotów do wejść licznika/komparatora (CAP-1).
- Optoizolowane i buforowane we/wy komunikacji szeregowej, umożliwiające sterowa-

nie falownika z komputera nadrzędnego (host) w standardach RS-232, CAN.

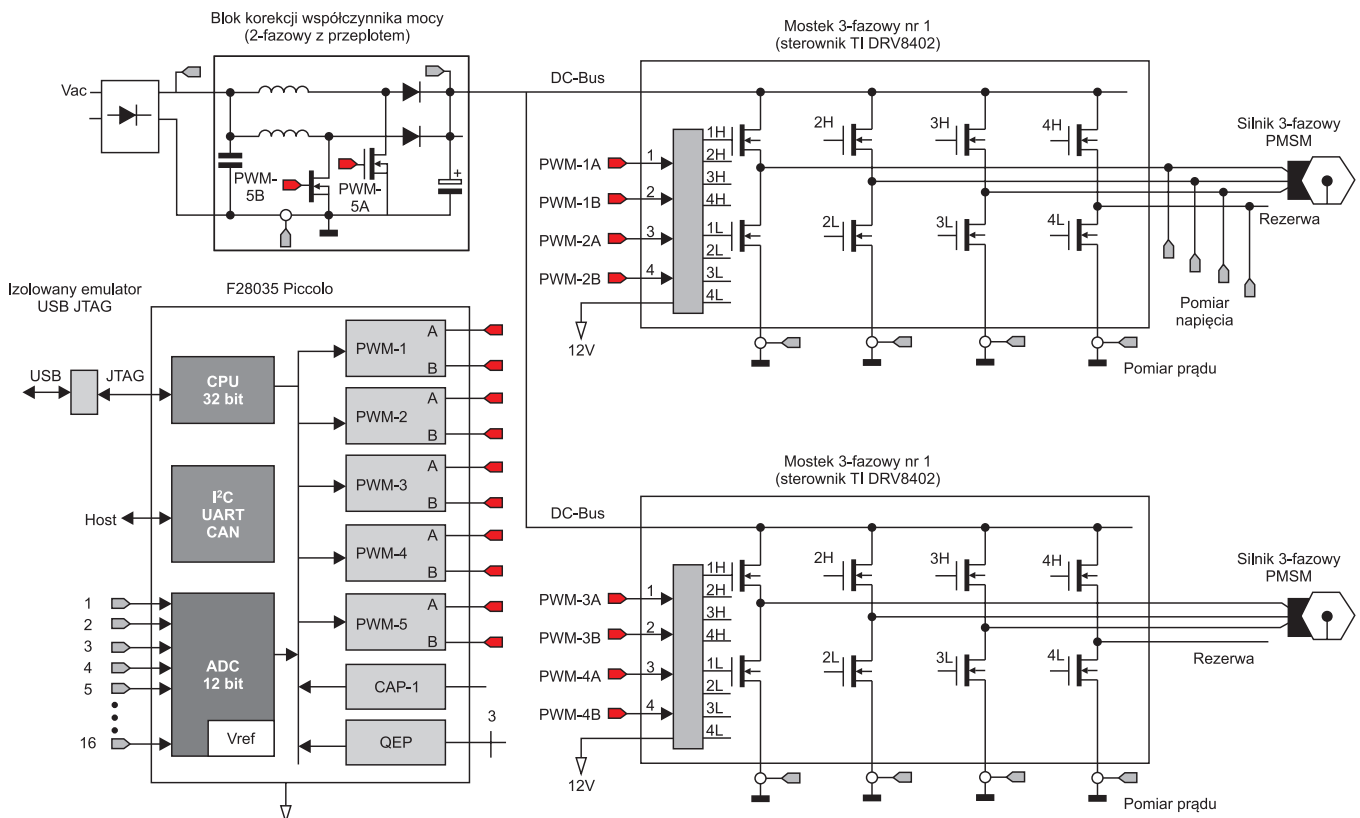
- Gniazdo zewnętrznego emulatora/programatora JTAG.
- Możliwość zewnętrznego zasilania szyny DC-Bus z pominięciem korekcji PFC.

Zgodnie z broszurą informacyjną, pierwszym krokiem jest zainstalowanie na PC środowiska Code Composer Studio oraz pobranie uzupełniającej dokumentacji zestawu ewaluacyjnego ze strony internetowej TI.

### Code Composer Studio IDE

CCStudio jest zintegrowanym środowiskiem programistycznym (IDE), umożliwiającym tworzenie oprogramowania dla wszystkich mikrokontrolerów i procesorów sygnałowych firmy Texas Instruments. Praca z tym oprogramowaniem nie różni się znacząco od pracy w innych środowiskach programistycznych. Podstawowymi językami programowania są C/C++ oraz assembler. Budowa programu oparta jest o projekt, będący zbiorem plików zawierających między innymi: kod źródłowy aplikacji, polecenia konfiguracyjne, odwołania do funkcji bibliotecznych, skrypty budowy aplikacji. Podstawowe cechy środowiska Code Composer Studio:

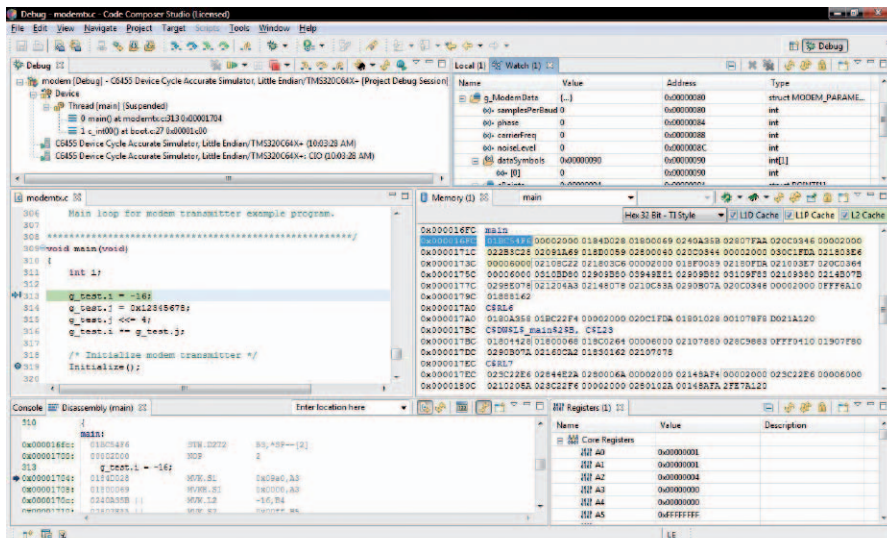
- Obsługa wszystkich rodzin mikrokontrolerów i procesorów DSP produkcji Texas Instruments oraz procesorów z rdzeniem ARM7, ARM9, ARM11, Cortex.
- Rozbudowany kompilator C/C++ z możliwością profilowania i optymalizacji kodu programu.



Rys. 8. Schemat blokowy kompletnego falownika

- Bogata oferta bibliotek dodatkowych: funkcji matematycznych, współpracy z urządzeniami peryferyjnymi (wbudowanymi i zewnętrznymi), algorytmów sterowania (transformacje, pętle regulacyjne).
- Współpraca z procesorami poprzez emulator JTAG – podgląd całej mapy pamięci z możliwością podglądania zmiennych, markerów, pułapek programowych i punktów próbkowania.
- Możliwość graficznego przedstawienia przetwarzanych zmiennych (także analiza FFT)
- Możliwość bezpośredniego wydawania poleceń z okna dialogowego, łącznie z trybem pracy RealTime.
- Współpraca z systemami operacyjnymi DSP-BIOS i RTOS.
- Możliwość rozbudowy środowiska za pomocą wtyczek (plug-in).

Rys. 9 przedstawia typowy pulpit roboczy środowiska CCStudio, z otwartymi następującymi oknami: zarządzania projektem, podglądu zmiennych, kodu źródłowego, mapy pamięci, kodu wynikowego assemblera, podglądu rejestrów CPU.



Rys. 9. Przedstawia typowy pulpit roboczy środowiska CCStudio

- Wersja *Microcontroller* z ograniczeniem rozmiaru kodu wynikowego do 32 kB dla TMS320C2000 oraz do 16 kB dla MSP430.

### Dokumentacja dołączona do zestawu

Po rozpakowaniu pobranych plików na dysku komputera tworzone są dwa foldery:

*TI\_F28xxx\_SysHW* – Dokumentacja sprzętu: opisy i schematy wszystkich płytek elektroniki. Dostępne są pliki tekstowe i graficzne PDF, a także schematy w formacie .SCH i .PCB oraz Gerbera. Dokumentacja obejmuje nie tylko płytki wchodzące w skład zestawu ewaluacyjnego, ale też moduły z innymi procesorami rodziny C2000.

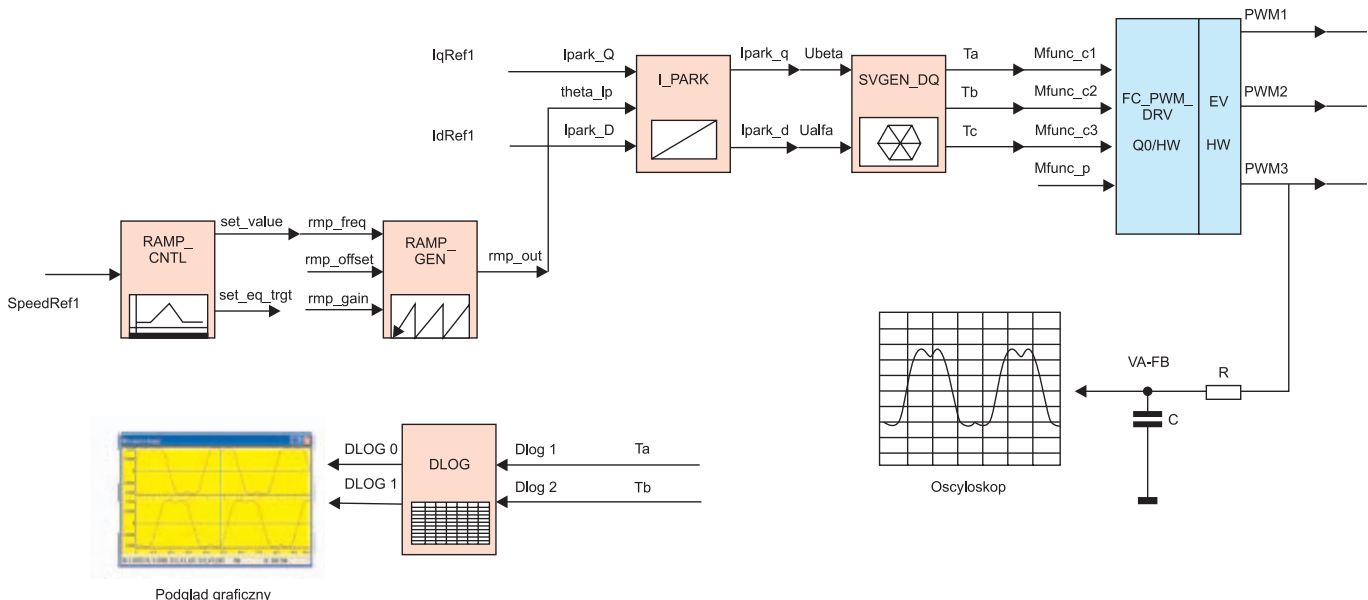
*TI\_F28xxx\_SysSW* – Dokumentacja oprogramowania: podstawy obsługi Code Composer Studio, przykładowe projekty programów, biblioteki pomocnicze, materiały szkoleniowe itp. Podobnie jak w przypadku sprzętu, dokumentacja zawiera także wiele informacji dodat-

kowych, niepowiązanych bezpośrednio z zestawem ewaluacyjnym.

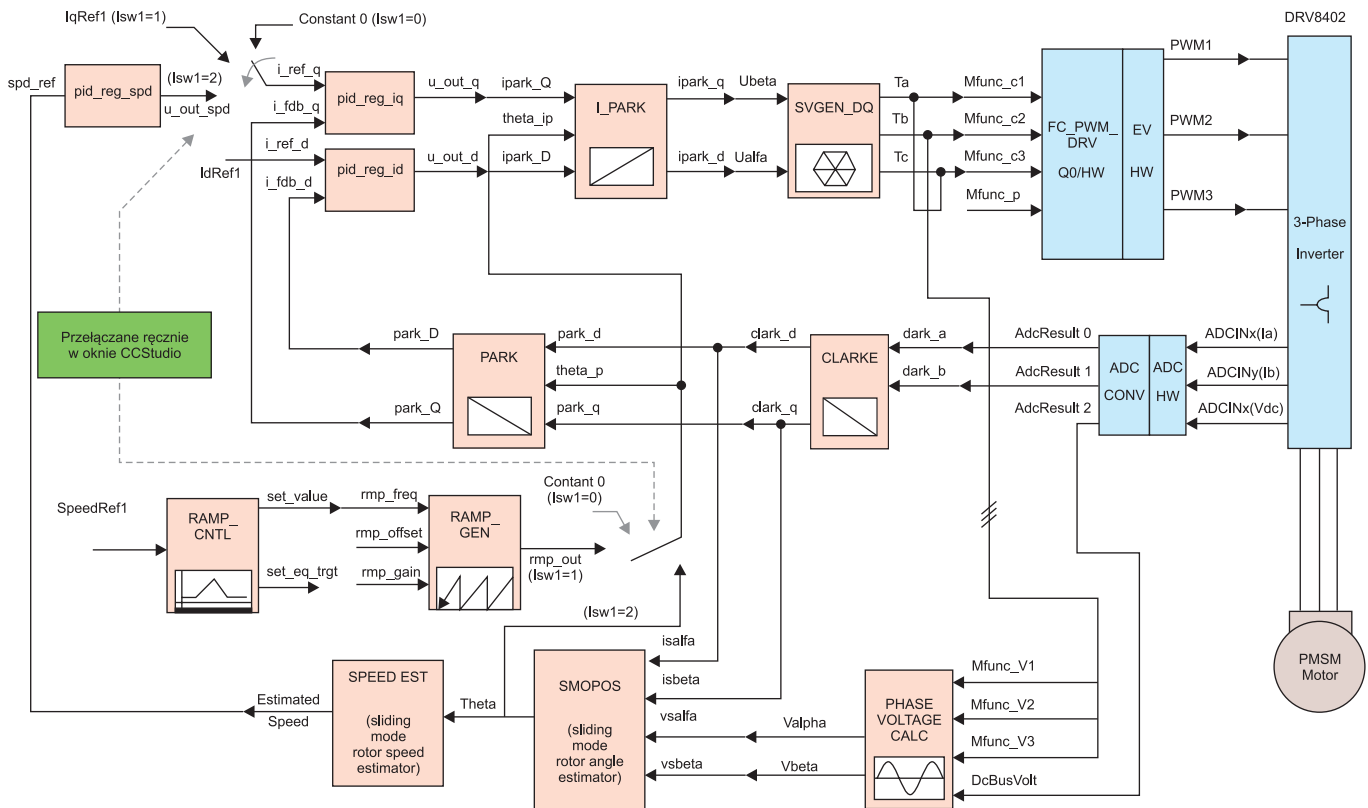
Dokumentacja jest tak obszerna, że zadowolili najbardziej wymagającego konstruktora. Jedyną wadą jest brak spisu – przewodnika po dziesiątkach plików, co utrudnia znalezienie najbardziej potrzebnych informacji.

### Ćwiczenia praktyczne

Do dalszej pracy z zestawem ewaluacyjnym najbardziej przydatny jest dokument „Field Oriented Control of PM Motors” (plik *2xPM\_Motors.pdf*). Tekst rozpoczyna się od teoretycznego wykładu na temat zasady działania silnika PMSM i falownika wektorowego. Następnie, po krótkim opisie konfiguracji sprzętowej, przechodzimy do uruchomienia i testowania zestawu. Proces budowania oprogramowania falownika jest podzielony na 6 etapów o coraz wyższym poziomie komplikacji, poczynając od uruchomienia pojedynczych modułów programu, a kończąc na



Rys. 10. Minimalna konfiguracja do kontroli poprawności działania modułu odwrotnej transformacji I\_PARK, generatora napięć wyjściowych SV\_GEN i modulatorów PWM



Rys. 11. Kompletny falownik po dodaniu pętli regulacji prędkości *pid\_reg\_spd*

kompletnym, działającym urządzeniu. Kolejne czynności są opisane tak szczegółowo, że można je poprawnie wykonać nawet bez doświadczenia w pracy ze środowiskiem Code Composer Studio. Do wykonania testów i regulacji potrzebny będzie woltomierz i amperomierz, przyda się też oscyloskop (nie jest niezbędny). Po otwarciu projektu 2xPM\_Motors i skonfigurowaniu pulpitu roboczego CCSstudio, przystępujemy do uruchomienia aplikacji. Zasoby sprzętowe mikrokontrolera są na tyle duże, że można załadować aplikację do pamięci RAM, bez programowania flash. W takiej konfiguracji CCSstudio umożliwia załadowanie i uruchomienie aplikacji jednym kliknięciem, a kolejne wersje oprogramowania falownika startują bardzo szybko. Zmiana poziomu 1...6 odbywa się poprzez edycję parametru LEVEL w pliku konfiguracyjnym.

**Poziom 1:** Minimalna konfiguracja, do kontroli poprawności działania modułu odwrotnej transformacji I\_PARK, generatora napięć wyjściowych SV\_GEN i modulatorów PWM (rys. 10). Pomocnicze moduły oprogramowania RAMP\_CNTL i RAMP\_GEN służą do zadawania prędkości obrotowej. Efekt działania układu można oglądać w oknie rejestratora graficznego lub na ekranie oscyloskopu podłączonego do wyjść PWM1...PWM3. Na tym etapie silniki nie są jeszcze podłączone do wyjść falownika.

**Poziom 2:** Wreszcie mamy możliwość pokręcić silnikami. Testowane są moduły: przetwornika A/C i obliczania napięć fazowych, transformacji CLARKE i PARK. Zgodnie z instrukcją należy wykonać kalibrację przetworników A/C i prądów fazowych dla obu silników.

**Poziom 3:** Po dołączeniu pętli regulacyjnych momentu obrotowego i strumienia magnetycznego falownik jest już prawie gotowy. Na tym etapie dobieramy optymalne parametry regulatorów PI, kolejno dla silnika 1 i 2.

**Poziom 4:** Estymatory pozycji. W poprzednich etapach informacja o pozycji rotora i prędkości obrotowej była symulowana przez generator RAMP\_GEN. Teraz uruchamiamy estymatory pozycji (SMOPOS) i prędkości (SPEED EST) oraz włączamy je w pętlę regulacyjną.

**Poziom 5:** Po dodaniu pętli regulacji prędkości *pid\_reg\_spd* falownik jest kompletny (rys. 11). Ostatnią czynnością regulacyjną jest optymalizacja parametrów pętli regulacji prędkości obrotowej i jej współpracy z estymatorami prędkości i pozycji. Pokazany na rysunku programowy przełącznik *Lsw1* umożliwia zmianę konfiguracji: wirnik unieruchomiony prądem trzymania (*Lsw1* = 0), wirnik obraca się, zamknięta tylko pętla prądowa (*Lsw1* = 1), pełna regulacja wektorowa FOC (*Lsw1* = 2).

**Poziom 6:** Teraz obydwie silniki jednocześnie. Po wyregulowaniu wszystkich parametrów osobno dla obu silników, możemy teraz uruchomić obydwie i sterować nimi niezależnie od siebie. Parametry konfiguracyjne i robocze (prędkość, moment) można zadawać w czasie rzeczywistym, bezpośrednio z ekranu roboczego CCSstudio.

Na końcu instrukcji mamy jeszcze odsyłacze do innych zestawów ćwiczeń, np. testowanie układu korekcji współczynnika mocy, dostosowanie układu i oprogramowania do

sterowania silnikiem indukcyjnym. Odpowiednie opisy znajdują się w już pobranych plikach dokumentacji lub są dostępne na stronie TI.

## Podsumowanie

Pomimo dość skomplikowanych zagadnień, zestaw ewaluacyjny i ćwiczenia są tak przygotowane, że w pewnym momencie praca staje się przyjemnością – jak zabawa zestawem klocków „Lego Robotics”. Efektem tej zabawy jest zdobycie dużego zasobu wiedzy na temat falowników wektorowych i korzystania z Code Composer Studio. Gratulacje dla Texas Instruments za interesujący sposób prezentacji swoich produktów.

**Jacek Przepiórkowski**

### Literatura:

1. Dokumentacja zestawu „Piccolo Motor Control and PFC Developer's Kit” – Texas Instruments
2. Designing High-Performance and Power-Efficient Motor Control Systems – opracowanie Texas Instruments
3. Wektorowe sterowanie silnikami indukcyjnymi – „Elektronik” nr 10/2008
4. Code Composer Studio Getting Started – Texas Instruments
5. Sensorless Field Oriented Control (FOC) for a Permanent Magnet Synchronous Motor – nota aplikacyjna Microchip Technology
6. Modulacja napięcia w przemienniku napięciowym, metoda napięciowego wektora przestrzennego – opracowanie firmy CEiA ELPOL – Radom