

Leszek DĘBOWSKI
Antoni KRAHEL

KONCEPCJA ELASTYCZNEGO SYSTEMU STERUJĄCO-POMIAROWEGO Z UKŁADAMI DSP i FPGA DO BUDOWY SPECJALIZOWANYCH STANOWISK BADAWCZYCH

STRESZCZENIE *Efektywne prowadzenie prac badawczych w dziedzinie elektrotechniki bardzo często wiąże się z koniecznością tworzenia unikalnych, rozbudowanych stanowisk eksperymentalnych. Platformy sprzętowe stosowane do tych celów powinny charakteryzować się dużą mocą obliczeniową i elastycznością, gdyż podczas badań wielokrotnie może zachodzić konieczność modyfikacji konfiguracji. Współczesne procesory sygnałowe (DSP) i układy programowalne (FPGA) umożliwiają budowę zaawansowanych, zunifikowanych modułów pomiarowo-sterujących współpracujących z analogowymi i cyfrowymi blokami I/O oraz interfejsami komunikacyjnymi, dobranymi zgodnie z wymaganiami aplikacyjnymi. Referat prezentuje koncepcję modułowego systemu pomiarowo-sterującego z układami DSP i FPGA nowych generacji.*

Słowa kluczowe: *modułowe systemy pomiarowe i sterujące*

mgr inż. Leszek DĘBOWSKI, dr inż. Antoni KRAHEL
e-mail: leszek.debowski@iel.gda.pl, antoni.krahel@iel.gda.pl

Instytut Elektrotechniki
Oddział w Gdańsku

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 233, 2007

1. WSTĘP

Procesory DSP (ang. Digital Signal Processors) i układy programowalne FPGA (ang. Field Programmable Gate Arrays) są obecnie najczęściej stosowanymi elementami przeznaczonymi do realizacji funkcji cyfrowego przetwarzania sygnałów w systemach sterująco-pomiarowych. Systematycznie pojawiają się nowe generacje układów DSP i FPGA o wzrastającej mocy obliczeniowej i bardziej rozbudowanych właściwościach funkcjonalnych. Rośnie liczba aplikacji tych elementów w przemyśle i pracach badawczo-rozwojowych.

Szczególnym obszarem zastosowań są prace badawcze zakresu elektrotechniki wymagające zestawiania specjalizowanych stanowisk przeznaczonych do eksperymentalnej weryfikacji wyników badań [1], [2], [3]. Oprócz zaawansowanych funkcji pomiarowych wiele eksperymentów wymaga także części sterującej. Na rynku oferowanych jest szereg rozwiązań modułowych systemów pomiarowych przeznaczonych do wspomagania eksperymentów badawczych, m.in. systemy National Instruments, Keithley Instruments, Advantech. Jednak wysoki poziom kosztów zakupu i brak przystosowania do specyficznych wymagań związanych z elektrotechniką, a w szczególności z energoelektroniką sprawia, że przygotowanie kompletnego stanowiska badawczego stwarza liczne problemy. Dużą niedogodnością jest brak możliwości zaprojektowania przez użytkownika własnych modułów z funkcjami, których brak jest w zestawie standardowym (np. interfejsy światłowodowe lub tradycyjne sterowniki tranzystorów dużej mocy).

2. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ DOTYCHCZASOWYCH

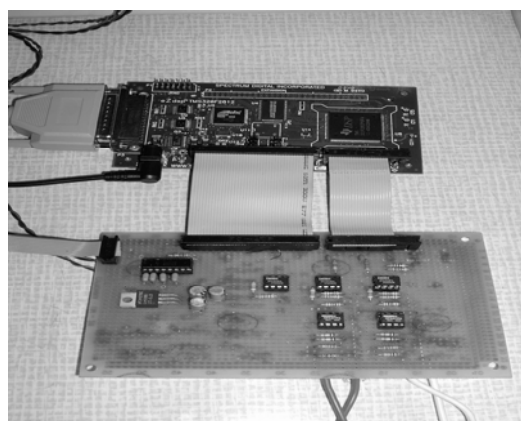
Na przestrzeni ostatnich lat Instytut Elektrotechniki Oddział w Gdańsku (IEL-OG) opracował szereg zestawów eksperymentalnych i prototypowych związanych z przetwarzaniem energii i metrologią wielkości elektrycznych. Początkowo do każdej aplikacji projektowano dedykowany system mikroprocesorowy oparty o szybki mikrokontroler (MCS-96) lub procesor sygnałowy (TMS320). W ten sposób wykonano m.in. następujące projekty:

- 3-fazowy miernik parametrów sieci, mikrokontroler Intel 8096KB,
- 6-kanałowy analizator przebiegów niesinusoidalnych, procesor TMS320LF2406 (rys. 1),

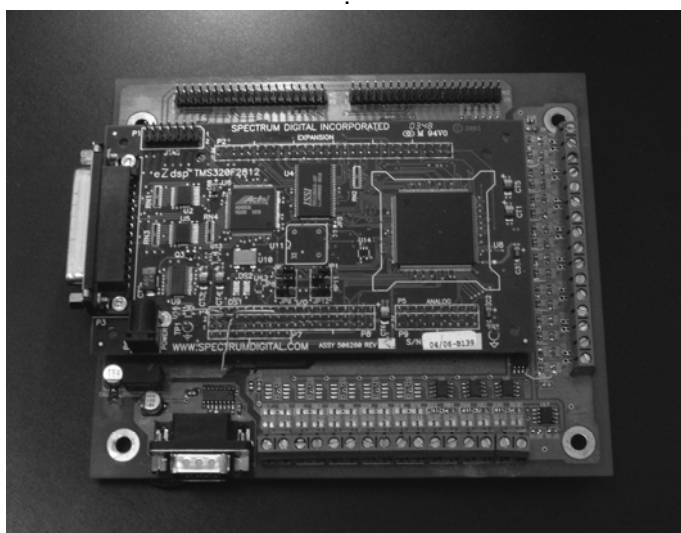
- 1-fazowy miernik mocy przebiegów odkształconych, procesor TMS320F2812 (rys. 2),
- modelowy zestaw badawczy do pomiaru przyrostu rezystancji uzwojeń silnika indukcyjnego w czasie pracy, procesor TMS320F2812 (rys. 3).



Rys. 1. 6-kanalowy analizator przebiegów nie-sinusoidalnych



Rys. 2. 1-fazowy miernik mocy przebiegów odkształconych

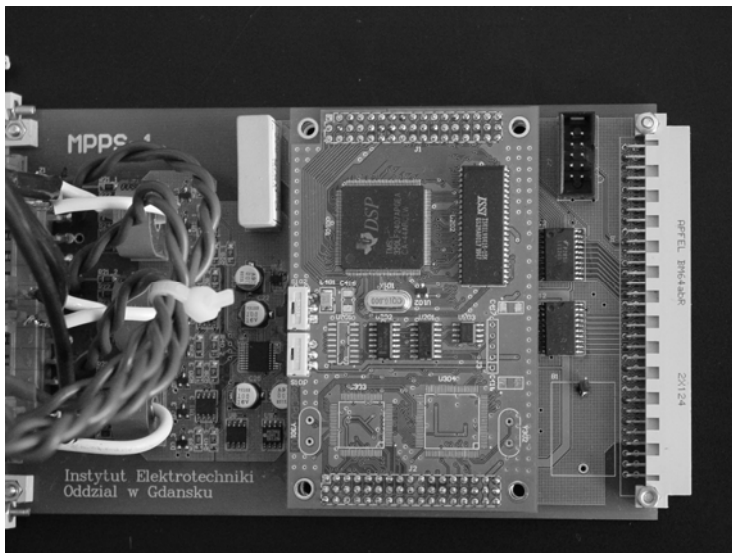


Rys. 3. Zestaw badawczy do pomiaru przyrostu rezystancji uzwojeń silnika indukcyjnego

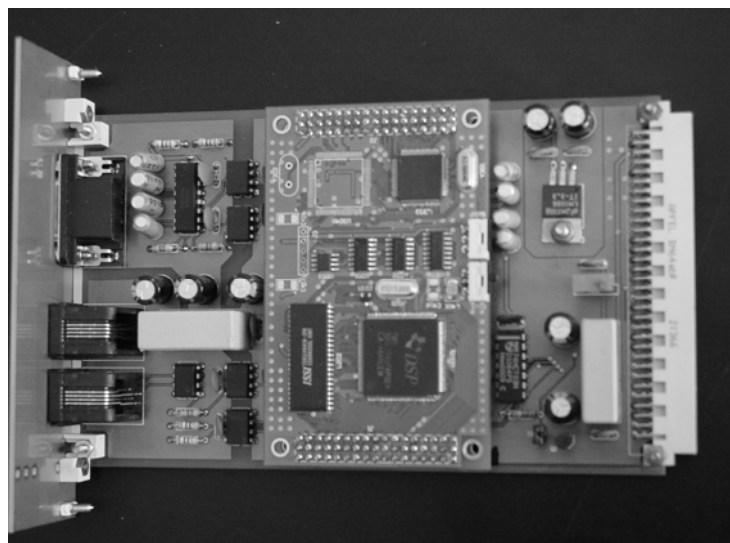
Doświadczenia zebrane podczas prac dały podstawę do opracowania nowego rozwiązania systemowego opartego o kasetę przystosowaną do modułów w standardzie Eurokarty o wymiarach 3U. Jako systemową magistralę

komunikacyjną wykorzystano sieć CAN (ang. Computer Area Network), w ramach której każdy moduł funkcjonuje jako odrębny węzeł. Podczas realizacji kolejnych aplikacji zaprojektowano typoszereg modułów o zróżnicowanych właściwościach i parametrach:

- moduł konsoli operatora,
- moduł regulatora,
- moduł pomiarowy prądów i napięć (rys. 4),
- moduł pomiarowy dla czujników temperatury typu termopara,
- moduł pomiarowo-zadający,
- moduł komunikacyjny z interfejsami RS-232 oraz Ethernet (rys. 5),
- moduł sterowania przetwornicą zasilającą.

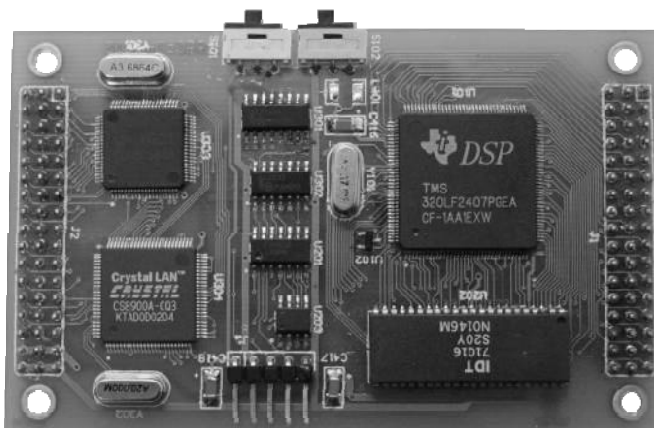


Rys. 4. Moduł pomiarowy prądów i napięć



Rys. 5. Moduł komunikacyjny

Każdy z powyższych modułów jest wyposażony w dedykowane złącza, na których osadzana jest zunifikowana jednostka centralna Mod-2003 (rys. 6) z procesorem sygnałowym TMS320LF2407, który ma wbudowaną sprzętowo obsługę sieci CAN. Część wymienionych wyżej modułów „inteligentnych” może współpracować z pasywnymi modułami I/O (separowane galwanicznie wejścia binarne, wyjścia przekaźnikowe), które dołączane są za pomocą dedykowanych złączy. W skład systemu wchodzi również moduły zasilające.



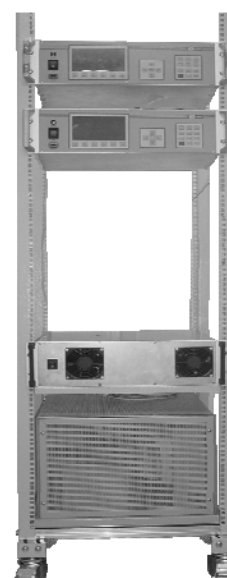
Rys. 6. Jednostka centralna Mod-2003 z 16-bitowym procesorem DSP

Odpowiednio skonfigurowane i oprogramowane zestawy modułów posłużyły do realizacji następujących projektów:

- regulator transformatora średniego napięcia (rys. 7),
- zestaw eksperymentalny do badania ogniw paliwowych (rys. 8),
- system monitoringu dla Laboratorium Aparatury Łączeniowej IEL-OG z wykorzystaniem sieci Internet.



Rys. 7. Regulator transformatora średniego napięcia



Rys. 8. Zestaw eksperymentalny do badania ogniw paliwowych

Praktyka eksploatacyjna przyniosła pozytywne oceny opracowanego systemu. Wykazała jednak także kilka niedogodności. Dla wymagających aplikacji pojawiają się problemy związane z ograniczoną prędkością transmisji danych poprzez magistralę CAN. Każda nowa, nawet stosunkowo prosta funkcja peryferyjna wymaga opracowania nowego modułu z płytką jednostki centralnej wyposażonej w procesor DSP zasilany napięciem 3.3 V. Brak jest możliwości wkomponowania w system prostych kart prototypowych umożliwiających wykorzystanie aktualnie dostępnych elementów do montażu przelekane go o napięciu zasilania 5 V.

3. NOWA KONCEPCJA SYSTEMU STERUJĄCO-POMIAROWEGO

Obserwowany wzrost liczby prac badawczo-rozwojowych wymagających zaawansowanej, a równocześnie elastycznej infrastruktury sprzętowej związanej z pomiarami i sterowaniem, stworzył przesłanki do wprowadzenia modyfikacji do istniejącego rozwiązania systemowego. Zaproponowano nową koncepcję architektury systemu, w którym w miejsce szeregowej magistrali CAN zastosowana została 16-bitowa magistrala równoległa wyposażona w bufony o napięciu zasilania 5 V. Pozwala to na znaczące skrócenie czasu transferu danych oraz zmniejszenie stopnia złożoności kart peryferyjnych, najprostsze ich odmiany nie będą wymagać stosowania układów mikroprocesorowych. Dzięki prostej strukturze sprzęgu z magistralą systemową użytkownik będzie miał możliwość szybkiego wykonania własnych modułów prototypowych w oparciu o dostępne układy scalone i uniwersalne płytki drukowane o wymiarach 3U.

Przewiduje się opracowanie i rozwój zestawu modułów o ustandaryzowanej topologii złącz. W planach projektowych znajdują się m.in. następujące elementy systemu:

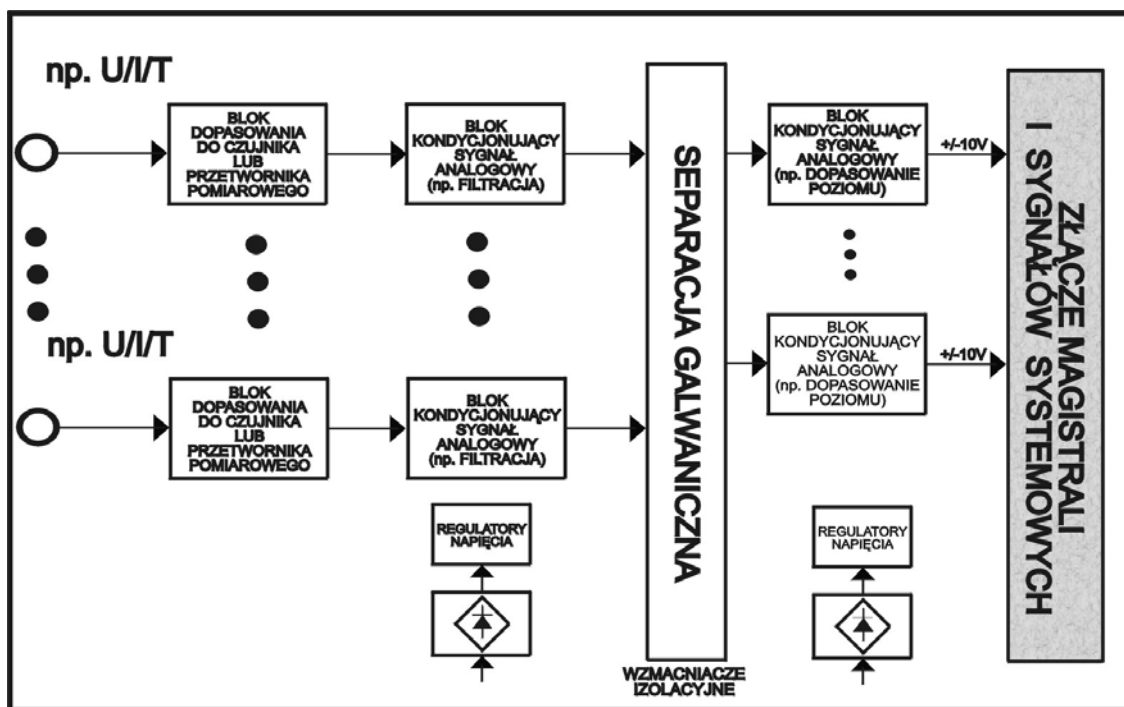
- moduły jednostek centralnych z procesorami i kontrolerami DSP (np. z rodzin TMS320C6000/2000),
- moduły kondycjonujące sygnały z czujników i przetworników pomiarowych do poziomu napięć $\pm 10V$,
- moduły wejść/wyjść analogowych z szybkimi przetwornikami A/C i C/A,
- moduły komunikacyjne,
- moduły wejść/wyjść binarnych,
- moduły specjalizowane wyposażone w układy FPGA, łącza światłowodowe, interfejsy inteligentnych modułów mocy IPM (ang. Intelligent

- Power Modules), bądź sterowniki tranzystorów IGBT (ang. Insulated Gate Bipolar Transistor),
- moduły zasilające.

W kolejnych podrozdziałach scharakteryzowano skrótowo kilka wybranych rozwiązań.

3.1. Moduł obiektowych wejść analogowych

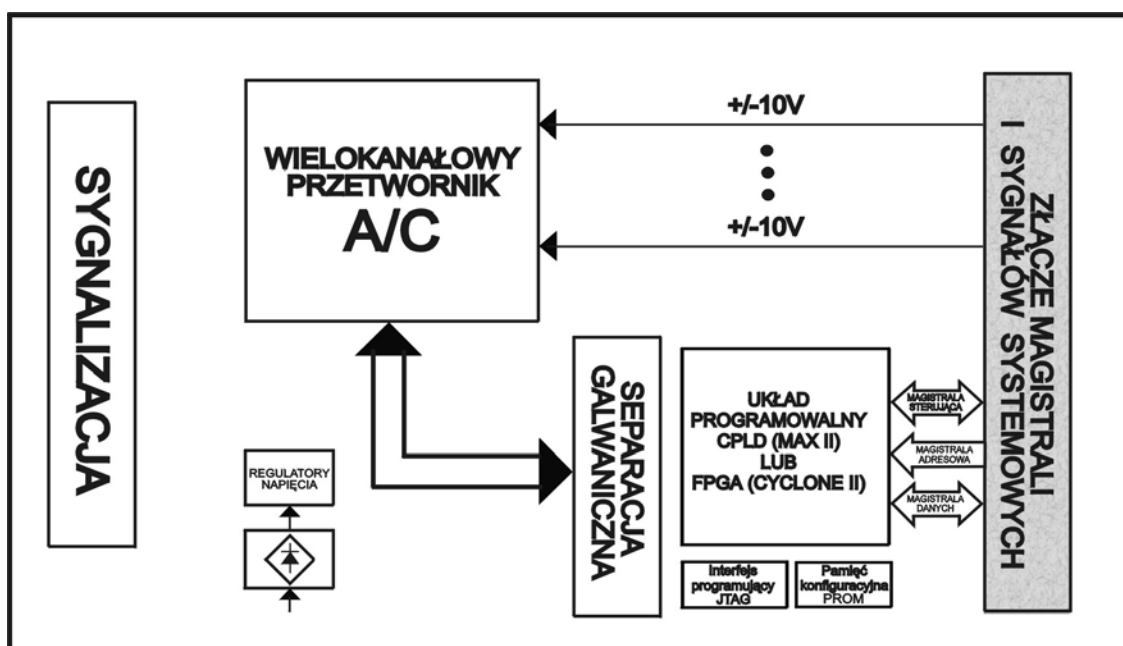
Moduł obiektowych wejść analogowych przeznaczony jest do współpracy z czujnikami lub przetwornikami wybranych wielkości elektrycznych lub nieelektrycznych (np. napięcie, prąd, temperatura). Realizuje funkcje wstępnej obróbki sygnałów analogowych (filtracja), zapewnia separację galwaniczną (wzmacniacze izolacyjne) pomiędzy wejściami analogowymi a pozostałymi elementami systemu i transformuje sygnały wejściowe do standardowego poziomu $\pm 10V$. Współpracuje z odpowiednimi modułami z wyposażonymi w przetworniki analogowo-cyfrowe, bądź kontrolery DSP z wbudowanymi przetwornikami A/C. Schemat blokowy modułu obiektowych wejść analogowych zamieszczono na rys. 9.



Rys. 9. Schemat blokowy modułu obiektowych wejść analogowych

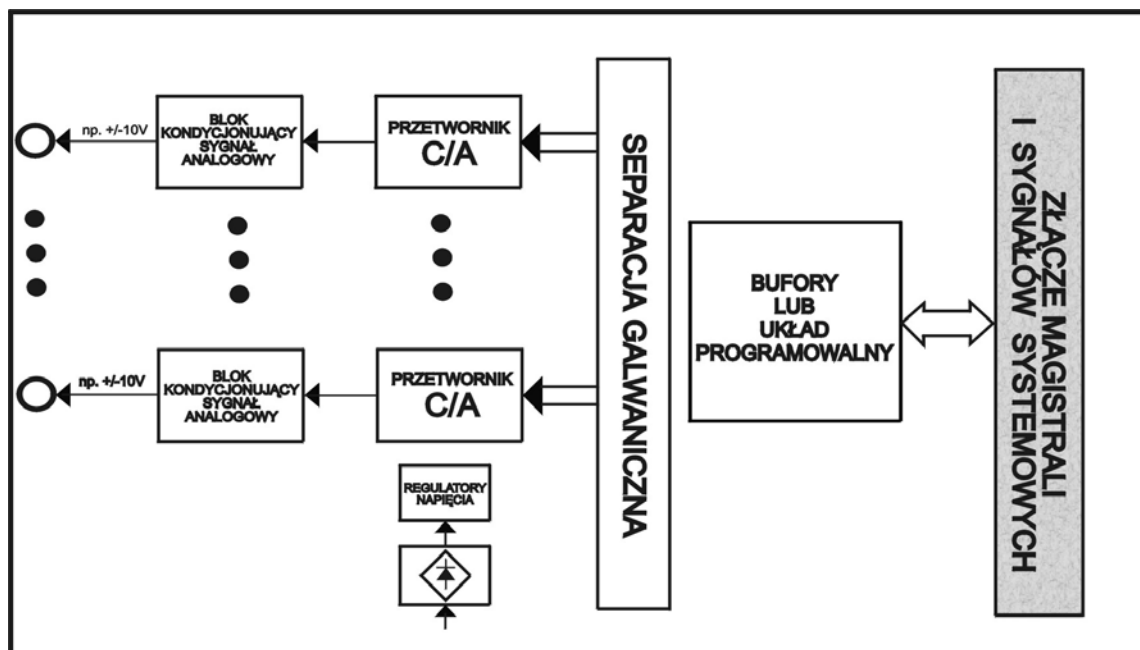
3.2. Moduły z przetwornikami A/C i C/A

W skład pierwszego z modułów wchodzi szybki wielokanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy o rozdzielczości 16÷18-bitów wyposażony w indywidualne układy próbkująco-pamiętające dla każdego z kanałów. Przewiduje się zastosowanie opcjonalnej separacji galwanicznej oraz układu programowalnego CPLD (ang. Complex Programmable Logic Device), bądź FPGA wspomagającego proces akwizycji danych pomiarowych. Elementy sygnalizacyjne na płycie czołowej prezentować będą informacje o statusie przetwarzania. Zwiększenie liczby wejściowych kanałów analogowych odbywać się będzie poprzez zainstalowanie w kasecie kolejnych identycznych modułów. Schemat blokowy modułu przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Schemat blokowy modułu z przetwornikiem analogowo-cyfrowym

Moduł wyjść analogowych z przetwornikami C/A posiada podobną architekturę. Wyposażony jest w separację galwaniczną. Analogowe sygnały wyjściowe w standardzie $\pm 10V$ wyprowadzone zostaną na płytę czołową. Sprężenie z wewnętrzną magistralą systemową zapewniać będą odpowiednie bufory i rejestry, bądź układ programowalny CPLD/FPGA. Schemat blokowy modułu zamieszczono na rys. 11.



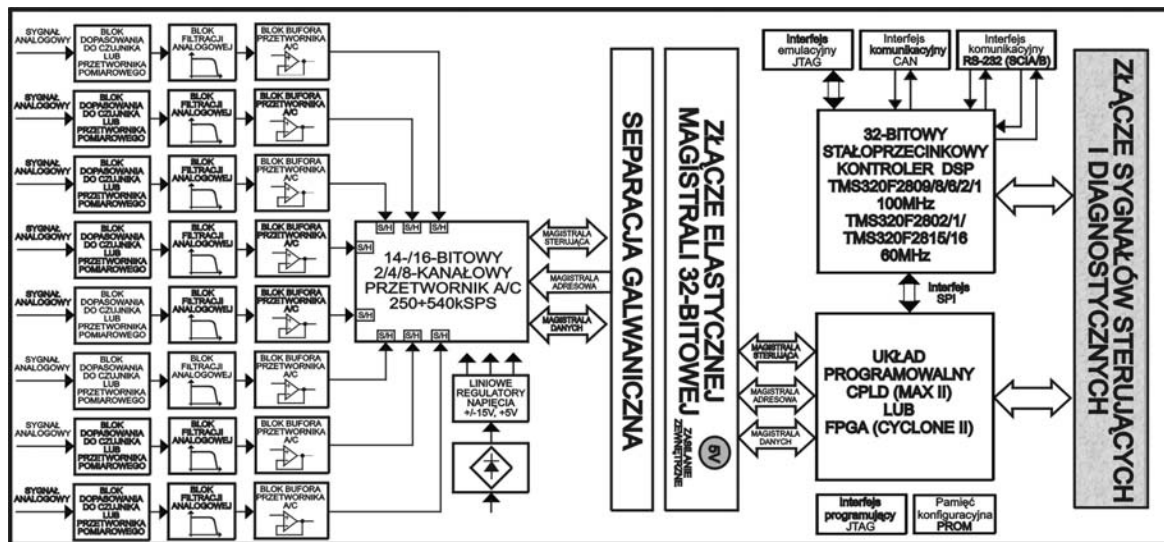
Rys. 11. Schemat blokowy modułu z przetwornikami cyfrowo-analogowymi

3.3. Elastyczny moduł sterująco-pomiarowy

Implementacja złożonych algorytmów pomiarowych, bądź sterujących wymaga zastosowania szybkich układów mikroprocesorowych lub/i zaawansowanych układów programowalnych FPGA. Elementy te wchodzi w skład struktury elastycznego modułu pomiarowo-sterującego, który wyposażony jest w szybki stałoprzecinkowy kontroler DSP rodziny TMS320F280x/2801x/2804x (60/100MIPS) [4], [5] oraz układ programowalny FPGA (Cyclone II) lub CPLD (MAX II). Dzięki elastycznym rozwiązaniom sprzętowym można wybrać odpowiednią konfigurację ze względu na kryteria wymagań aplikacyjnych oraz koszty. W razie potrzeby zwiększenia mocy obliczeniowej lub wielkości pamięci przez złącze lokalnej magistrali 32-bitowej z modułem mogą współpracować szybkie jednostki centralne systemu DLH (np. DLH-08 z 32-bitowym zmiennoprzecinkowym procesorem DSP) [6].

Moduł posiada 8 wejść analogowych wyposażonych w rozbudowane bloki kondycjonujące sygnały pomiarowe, realizujące dopasowanie standardu wejść do zastosowanego czujnika lub przetwornika oraz filtrację dolno- lub pasmowo-przepustową. Wykorzystano nową rodzinę szybkich wielokanałowych (8/4/2) przetworników A/C o rozdzielczości 14-/16-bitów i zróżnicowanych poziomach napięć wejściowych (± 10 V, ± 5 V, $0\div 5$ V). Każde wejście przetwornika ma układ próbkująco-pamiętający, co zapewnia jednoczesność próbkowania.

wania we wszystkich kanałach. Warunek jednoczesności próbkowania ma istotne znaczenie w wielu algorytmach pomiarowych i sterujących. Zależnie od liczby przetwarzanych kanałów (1÷8) częstotliwość próbkowania zmienia się w granicach 250÷540kSPS. Aby wyeliminować wpływ zakłóceń wnoszonych przez część cyfrową zawierającą kontroler DSP i układ programowalny wprowadzono separację galwaniczną o architekturze równoległej, która nie spowalnia procesu komunikacji z przetwornikiem A/C. Schemat blokowy modułu zamieszczono na rys. 12. Prezentowany moduł jest obecnie w końcowym etapie projektowania.



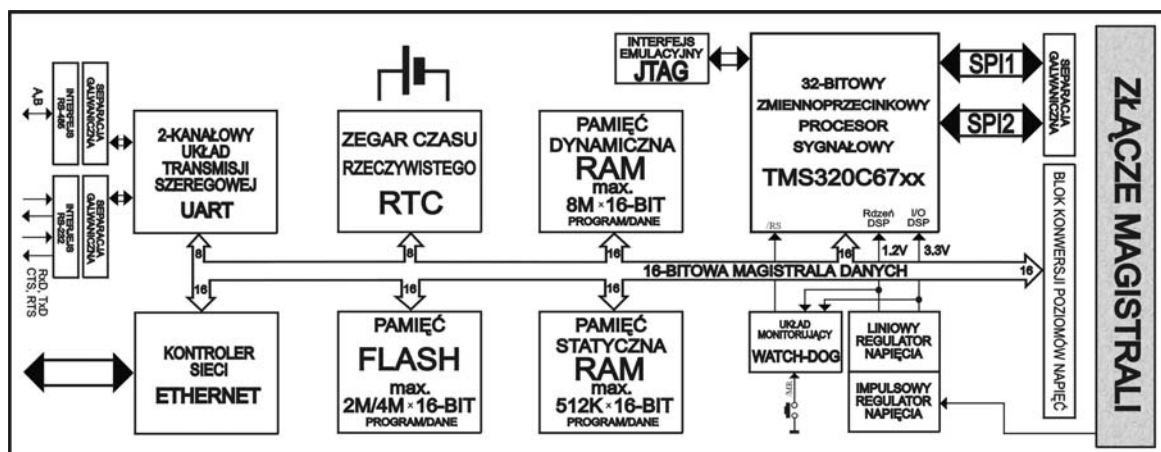
Rys. 12. Schemat blokowy elastycznego modułu sterująco-pomiarowego

3.4. Moduł szybkiej jednostki centralnej

Najbardziej zaawansowane algorytmy pomiarowe i sterujące wymagają szybkich jednostek centralnych wykonujących zmiennoprzecinkowe operacje arytmetyczne. Aby sprostać wymaganiom złożonych struktur algorytmicznych planowane jest opracowanie modułu jednostki centralnej (rys. 13) wyposażonego w 32-bitowy zmiennoprzecinkowy procesor DSP wchodzący w skład rodziny TMS320C6000 o dużej mocy obliczeniowej sięgającej 2000MIPS/1500MFLOPS. Procesory tej rodziny wyposażone są w kilka jednostek arytmetycznych i mnożących, posiadają także wewnętrzną pamięć RAM o dużej pojemności. Wewnętrzna pamięć ROM zawiera program ładujący (Bootloader), biblioteki matematyczne (FastRTS), funkcje DSP (DSPLIB) oraz procedury syste-

mowe DSP/BIOS. Do komunikacji z urządzeniami peryferyjnymi oprócz magistrali równoległej przewidziane są interfejsy SPI, I²C oraz szybkie łącza synchroniczne, w pracach uruchomieniowych wykorzystywany jest interfejs monitorujący JTAG

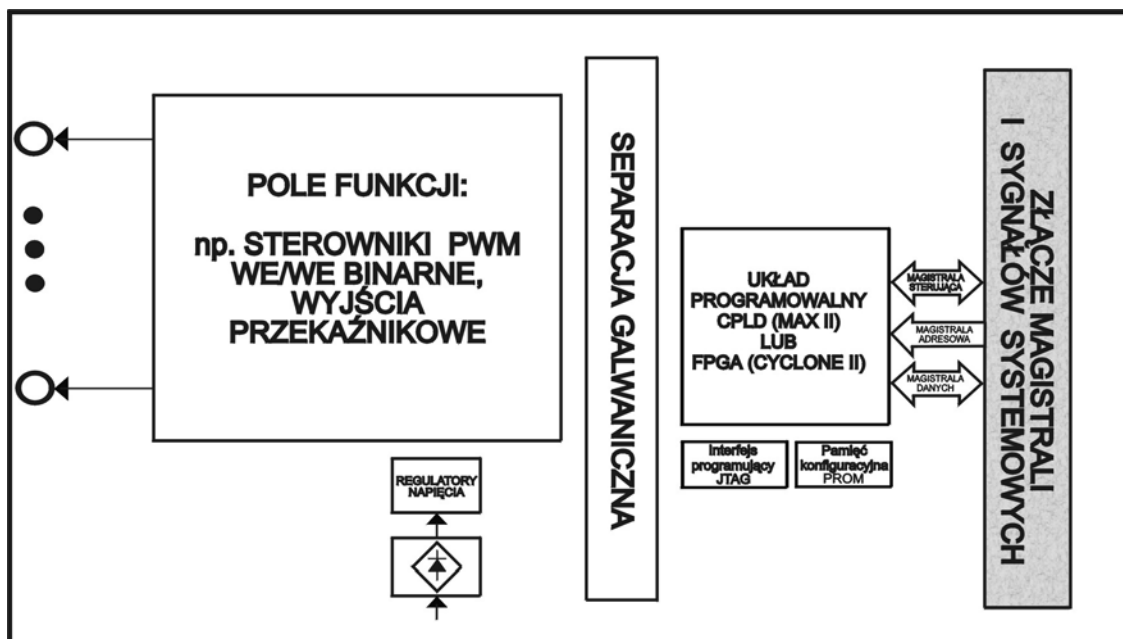
Oprócz wewnętrznych zasobów pamięci procesora DSP moduł zawiera 3 zewnętrzne bloki pamięci o dużych pojemnościach – pamięć dynamiczną i statyczną RAM oraz FLASH. Pozwala to na implementację rozbudowanych algorytmów i operowanie na dużych zestawach danych. Moduł wyposażony jest w 3 kanały komunikacyjne (Ethernet, RS-232, RS-485/422) i podtrzymywany bateryjnie zegar czasu rzeczywistego.



Rys. 13. Schemat blokowy modułu szybkiej jednostki centralnej

3.5. Rodzina modułów funkcyjnych I/O

W trakcie wykonywania eksperymentów badawczych bardzo często zachodzi potrzeba wykorzystania modułów funkcyjnych I/O ogólnego przeznaczenia. Niektóre stanowiska, w szczególności związane z energoelektroniką i techniką napędową, wymagają specjalizowanych modułów sprzęgających z elementami mocy. Moduły takie muszą współpracować z różnymi strukturami przekształtnikowymi i powinny być wyposażone w odpowiednią liczbę wyjść sterujących i linii diagnostycznych. Podobna sytuacja występuje w przypadku konieczności wykorzystania silników krokowych lub nietypowych urządzeń wykonawczych. Do powyższych zastosowań przewidziano rodzinę modułów funkcyjnych I/O, której strukturę blokową przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Schemat blokowy rodziny modułów funkcyjnych I/O

4. PODSUMOWANIE

Dokonano przeglądu rozwiązań sprzętowych stosowanych przy budowie specjalizowanych stanowisk badawczych, związanych głównie z metrologią elektryczną i energoelektroniką. Wskazano na niedogodności i ograniczenia wynikające ze stosowanych obecnie konfiguracji. Zaproponowano nową architekturę elastycznego systemu sterująco-pomiarowego, który zawierać może zarówno zaawansowane moduły z procesorami i kontrolerami DSP oraz układami FPGA, jak i proste moduły I/O projektowane i wykonywane przez użytkownika w formie kart prototypowych. Planuje się wykorzystanie przedstawionych modułów do budowy stanowisk eksperymentalnych, które znajdą zastosowanie w prowadzonych aktualnie pracach badawczo-rozwojowych.

LITERATURA

1. Tzou Y.-Y., Hsu H.-J.: FPGA Realization of Space-Vector PWM Control IC for Three-Phase PWM Inverters, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, No. 6, November, 1997.
2. Lakshminanth A., Morcos M. M.: A Power Quality Monitoring System: A Case Study in DSP-Based Solutions for Power Electronics, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 3, June, 2001.

3. Simon O., Mahlein J., Muenzer M. N., Bruckmann: Modern Solutions for Industrial Matrix-Converter Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 2, April, 2002.
4. Dębowski L.: Nowe rozwiązania układowe z 32-bitowymi kontrolerami DSP rodziny TMS320F28xx, Elektronika, Nr 11, str. 31+34, 2006r.
5. Dębowski L., Krahel A.: Moduły ze specjalizowanymi kontrolerami DSP do zastosowań energoelektronicznych i napędowych, Konferencja „Nowe techniki i technologie w energetyce, instalacjach, automatyce i napędach elektrycznych”, Gdańskie Dni Elektryki 22÷23.11.2006r.
6. Debowski L.: DSP/FPGA-based Flexible Digital Control System for Power Conversion, Motion Control, Industrial Data Processing and Educational Applications, European DSP Education & Research Conference (EDERS'2006), Munich, Germany, 2006.

Rękopis dostarczono, dnia 12.03.2007 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Jan Sikora

AN IDEA OF FLEXIBLE CONTROL AND MEASUREMENT
SYSTEM BASED ON DSPs AND FPGAs DEDICATED
FOR SPECIALIZED RESEARCH SETUPS

L. DEBOWSKI

A. KRAHEL

ABSTRACT

R&D projects in electrotechnics are often required the arrangement of specialized and complex experimental setups. Hardware platforms dedicated for these purposes should provide high computing power and flexibility, because the configuration can be changed many times during research and development process. Modern digital signal processors (DSPs) and programmable logic devices (FPGAs) are used for advanced designs of measurement and control modules based on unified architecture. It consists of analog and digital I/O blocks and data transmission interfaces tailored for application requirements. The paper presents an idea of modular control and measurement system based on new generation DSPs and FPGAs.