



Komputerowo wspomagane projektowanie systemów przetwarzania sygnałów pomiarowych na procesorach sygnałowych

ŁUKASZ ĆWIKLIŃSKI, WIESŁAW KICIŃSKI

Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Instytut Fizyki,
87-100 Toruń, ul. Grudziądzka 5

Streszczenie. Praca dotyczy zagadnienia projektowania systemów analizy wielorozdzielczej sygnałów z wykorzystaniem procesorów sygnałowych. Problem implementacji algorytmów przetwarzania sygnałów pomiarowych przedyskutowano w aspekcie konstrukcji sprzętu oraz oprogramowania użytkowego. Przedstawiono przykład implementacji procedur analizy wielorozdzielczej z wykorzystaniem falki Malvara.

Słowa kluczowe: wielorozdzielcza analiza sygnałów, procesory sygnałowe, falka Malvara, sygnały pomiarowe

Symbole UKD: 621.317

Wstęp

W analizie sygnałów niestacjonarnych niezbędne jest stosowanie dwuwymiarowej reprezentacji sygnału, odzwierciedlającej zmiany jego charakterystyk w czasie. Jedną z technik przetwarzania sygnałów pomiarowych jest wielorozdzielcza analiza falkowa [1]. Dla sygnałów szerokopasmowych preferowana jest analiza z wykorzystaniem falki Malvara, bazującej na dyskretnym przekształceniu kosinusowych typu DCTII. Podstawy teoretyczne zagadnienia wielorozdzielczej analizy falkowej z wykorzystaniem falki Malvara można znaleźć między innymi w pracy [2].

Współczesne systemy pomiarowe o zaawansowanych algorytmach przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym z powodzeniem można projektować na procesorach sygnałowych za sprawą ich cech funkcjonalnych: superskalarności, po-

tokowości wykonywania operacji, bogatej listy instrukcji wykonywanych w jednym cyklu zegarowym oraz wbudowanej arytmetyce zmiennoprzecinkowej. Wymienione cechy skutkują łatwą oraz oszczędną czasowo implementacją typowych operacji dla cyfrowego przetwarzania sygnałów, takich jak: szybka transformacja Fouriera, filtracja, splot, korelacja itd. Co więcej, ich architektura umożliwiła szybką wymianę danych, gdzie istotną rolę odgrywają specjalistyczne bloki umożliwiające efektywne tworzenie buforów cyklicznych, niezwykle przydatnych w obsłudze między innymi torów przetwarzania analogowo-cyfrowego [3].

W artykule przedyskutowano technologię projektowania systemów wielorozdzielczej analizy sygnałów niestacjonarnych z wykorzystaniem procesora sygnałowego. Strukturę funkcjonalną systemów przetwarzania sygnałów pomiarowych omówiono w rozdziale 2. W rozdziale 3 zamieszczono metodykę projektowania omawianej klasy systemów ze szczególnym uwzględnieniem cech funkcjonalnych oprogramowania wspomagającego proces projektowania. Treścią rozdziału 4 jest przykład implementacji w procesorze TMS320C6713 procedur analizy wielorozdzielczej z wykorzystaniem falki Malvara. W algorytmach obliczeniowych zastosowano standardowe biblioteki DSP (*Digital Signal Processing*) dla procesora TMS320C6713. Dla systemów czasu rzeczywistego istotna jest znajomość czasu realizacji algorytmów przetwarzania sygnałów, stąd też dokonano oceny czasochłonności zaimplementowanych procedur, a jej wyniki zamieszczono w końcowej części rozdziału.

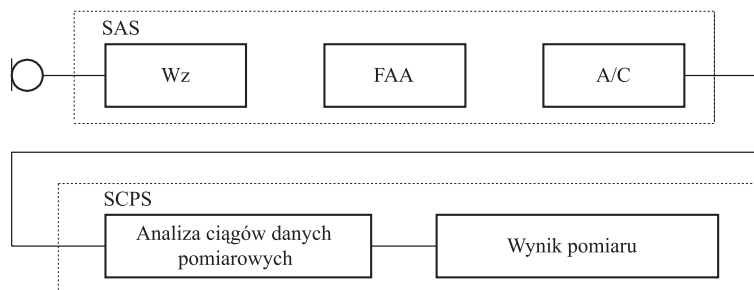
Struktura funkcjonalna systemów przetwarzania sygnałów pomiarowych

W konstrukcji systemów przetwarzania sygnałów pomiarowych na procesorach sygnałowych wydzielić można dwa podstawowe bloki funkcjonalne [4]:

- Sekcję Akwizycji Sygnału pomiarowego (SAS),
- Sekcję Cyfrowego Przetwarzania Sygnału pomiarowego (SCPS).

Sekcja Akwizycji Sygnału zawiera wzmacniacz wejściowy (Wz), filtr antyaliasingowy (FAA) ograniczający pasmo analizowanego sygnału oraz przetwornik analogowo-cyfrowy A/C. Dyskretne wartości sygnału na wyjściu przetwornika A/C traktowane są jako ciągi surowych danych pomiarowych, które są następnie ewidencjonowane i przetwarzane w Sekcji Cyfrowego Przetwarzania Sygnału systemu pomiarowego.

Implementacja obu sekcji zależy od rodzaju procesora sygnałowego. Czołowi producenci oferują gotowe zestawy funkcjonalne, przy czym można uznać za zasadę, że SAS oraz SCPS są implementowane w oddzielnych modułach, co zapewnia projektantowi systemu użytkowego dużą swobodę działania.



Rys. 1. Schemat funkcjonalny przetwarzania sygnału pomiarowego

Metodyka projektowania systemów wielorozdzielczej analizy sygnałów pomiarowych

Systemy bazujące na wielorozdzielczej analizie sygnałów¹ należą do szerokiej klasy informacyjnych systemów pomiarowych, spełniających funkcje detekcji, klasyfikacji i identyfikacji źródeł pochodzenia sygnałów pomiarowych. Znamienną ich cechą jest wprowadzenie do struktury systemu rozbudowanej SCPS, której działanie opiera się na wykorzystaniu zaawansowanych metod analizy sygnałów i procedur sztucznej inteligencji [5].

Projektowanie Systemów Wielorozdzielczej Analizy Sygnałów (SWAS) jest na ogół przedsięwzięciem jednostkowym, realizowanym w stosunkowo długim czasie, w warunkach stale zmieniającego się poziomu technologii, powstawania nowych alternatyw konstrukcyjnych implikujących potrzebę elastycznego podejścia do realizacji zadania.

O powodzeniu procesu projektowania decyduje bardzo dokładne określenie celu, tzn. postawienie problemu i przedstawienie koncepcji jego rozwiązania. Z powyższych rozważań wynika wniosek, że nie można ustalić jednoznacznego algorytmu inżynierskiego projektowania takich systemów. Możliwe jest jedynie sformułowanie dyrektyw heurystycznych bazujących na analogii i uogólnieniu pewnych procesów projektowych, a także własnym wycuciu i doświadczeniu projektanta [5].

W przypadku omawianej klasy systemów dodatkową trudnością przy planowaniu prac projektowych jest brak przykładów w literaturze lub ograniczony dostęp do informacji firmowych.

Zaproponowany ogólny algorytm projektowania SWAS obejmuje etapy różniące się między sobą zakresem rozwiązywanych zagadnień, pracochłonnością

¹ W literaturze systemy bazujące na wielorozdzielczej analizie sygnałów są określane terminem Systemów Wielorozdzielczej Analizy Sygnałów (SWAS) i takie określenie będzie stosowane w dalszej części referatu.

oraz rodzajem angażowanych zespołów twórczych. Etapy te omówione zostaną w kolejności ich realizacji.

Zdefiniowanie zagadnienia metrologicznego

Etap dotyczy zagadnienia identyfikacji cech osobniczych niestacjonarnych sygnałów pomiarowych, których znajomość jest niezbędna do rozpoznawania ich źródeł. Obejmuje opracowanie modelu przetwarzania sygnałów pomiarowych, badania eksploracyjne sygnałów zaewidencjonowanych w procesie pomiarowym, a także badania symulacyjne algorytmów ukierunkowane na weryfikację skuteczności rozpoznawania źródeł sygnałów.

Opracowanie modelu przetwarzania sygnału oraz analiza reprezentatywnego zbioru sygnałów pomiarowych umożliwiają określenie rodzaju stosowanej transformaty falkowej, dobór funkcji bazowych przekształcenia, a także selekcję znamiennych dla danej klasy sygnałów współczynników falkowych. Do realizacji powyższych zadań szczególnie użytecznym narzędziem jest środowisko programowe pakietu MATLAB oraz STATISTICA.

Projekt struktury funkcjonalnej

Celem tego etapu jest zaprojektowanie Systemu Wielorozdzielczej Analizy Sygnałów w postaci sieci działań i schematu blokowego struktury sprzętowej tak, aby możliwe było sformułowanie szczegółowych wymagań w odniesieniu do modułów Sekcji Akwizycji Sygnału i Sekcji Cyfrowego Przetwarzania Sygnału. W etapie tym powinny być podjęte kluczowe dla sukcesu całego projektu decyzje dotyczące określenia wymaganych parametrów przetwornika A/C w Sekcji Akwizycji Sygnału, rodzaju procesora realizującego przekształcenie falkowe oraz algorytmu klasyfikacji współczynników falkowych w Sekcji Cyfrowego Przetwarzania Sygnału. Jego rezultatem jest koncepcja Systemu Wielorozdzielczej Analizy Sygnałów. Kolejne etapy projektowania mają już charakter bardziej praktyczny i prowadzą do opracowania konstrukcji i oprogramowania przy użyciu dostępnych na rynku narzędzi technicznych.

Symulacja struktury funkcjonalnej SWAS

Symulacja SWAS ma na celu ocenę funkcjonowania modułów oraz projektowanego systemu. Umożliwia optymalizację przyjętych rozwiązań oraz weryfikację algorytmów przetwarzania sygnałów.

W rezultacie badań symulacyjnych podejmowana jest ostateczna decyzja dotycząca szczegółowej struktury funkcjonalnej systemu, poprawności implementacji algorytmów analizy wielorozdzielczej. Umożliwia również optymalizację zagadnienia

realizacji procedur pomiarowych w zakresie wykorzystania procesora sygnałowego oraz specjalizowanych modułów wykonanych np. w technologii FPGA.

Projektowanie sprzętu i oprogramowania

Etap ten jest ukoronowaniem dotychczasowych kroków projektowych, na podstawie których wybierana jest odpowiednia baza sprzętowa służąca do realizacji systemu. Należy podkreślić, że wybór cyfrowych procesorów sygnałowych wiąże się z wyborem firmowego oprogramowania wspomagającego tworzenie programów użytkowych, które powinny być spójne z ogólną koncepcją oprogramowania.

Projektant systemu przetwarzania sygnałów pomiarowych dokonuje integracji jego modułów, tworzy szczegółowy schemat połączeń elementów systemu. Równocześnie, na podstawie algorytmów opracowywane jest oprogramowanie systemu.

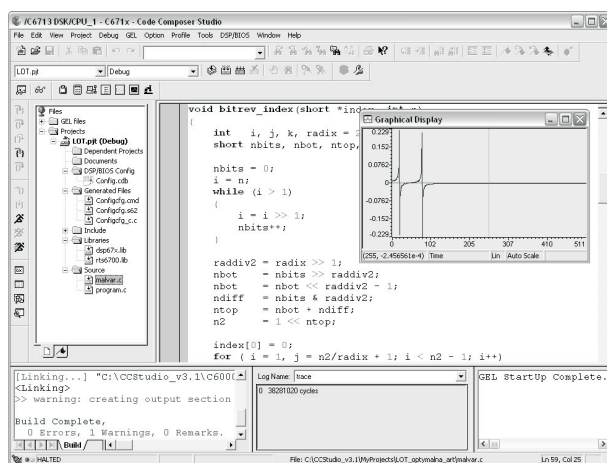
Projektując sprzęt systemu, można wykorzystać gotowe zestawy funkcjonalne, oferowane przez czołowych producentów procesorów sygnałowych. Zestawy takie, w zależności od ich przeznaczenia, poza procesorem sygnałowym, mogą być wyposażone w wiele dodatkowych akcesoriów, ułatwiających uruchamianie i testowanie systemu prototypowego. Wśród nich można wymienić różnego rodzaju pamięci, interfejsy do emulatorów, wejścia i wyjścia analogowe, cyfrowe oraz audio, dekodery audio, złącza umożliwiające rozszerzanie zestawów rozwojowych o dodatkowe moduły tzw. „płyty córek” i wiele innych. Płyty córki umożliwiają rozbudowę zestawów funkcjonalnych o dodatkowe moduły, dzięki czemu całość może stanowić gotowy prototyp systemu przetwarzania sygnałów. Na szczególną uwagę zasługują moduły rozszerzeń, w których strukturze znajdują się tory przetwarzania analogowo-cyfrowego i cyfrowo-analogowego, wejścia i wyjścia audio oraz wideo, różnego rodzaju dekodery i enkodery, wyświetlacze ciekłokrystaliczne, dodatkowe moduły pamięci oraz moduły umożliwiające komunikację z innymi urządzeniami peryferyjnymi w różnych standardach [8, 9].

Gotowe zestawy funkcjonalne oraz udostępnione przez producentów schematy znacznie skracają czas konstrukcji sprzętu, umożliwiając prawie natychmiast testowanie nowo opracowywanego systemu. Cały wysiłek projektanta leży po stronie opracowania oprogramowania.

Do zestawów funkcjonalnych producenci procesorów dostarczają własne oprogramowanie, wspomagające projektowanie systemów pomiarowych. Oprogramowanie wspomagające tworzy środowisko programowe (rys. 2), które ściśle integruje inne narzędzia programowe dostarczane przez producenta, takie jak [10]:

- edytor kodu programu,
- narzędzia generujące kod: kompilator C/C++, assembler, linker,
- biblioteki cyfrowego przetwarzania sygnałów,
- narzędzia optymalizacji aplikacji,
- narzędzia wizualizacji danych,

- system operacyjny czasu rzeczywistego, który można konfigurować z wykorzystaniem dołączonego interfejsu graficznego lub z poziomu języka C, umożliwiający m.in. analizę działania oprogramowania w czasie rzeczywistym, zarządzanie przerwaniem, a także konfigurację peryferiów.

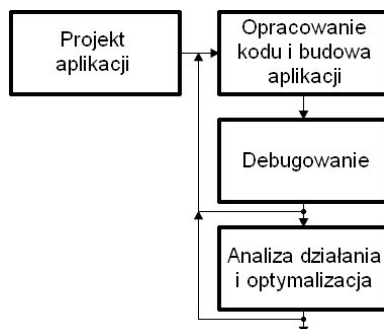


Rys. 2. Środowisko programowe Code Composer Studio

Procesory sygnałowe mogą być programowane w językach niskiego i wysokiego poziomu. Oprócz języków wysokiego poziomu, takich jak C i C++, aplikacje dla procesorów sygnałowych mogą być również przygotowywane w środowiskach programowych znanych pakietów, takich jak: Matlab czy LabView. W tym celu dostarczane są narzędzia programowe stanowiące swoisty interfejs pomiędzy oprogramowaniem zestawu uruchomieniowego procesora a środowiskiem programowym pakietu wyższego poziomu.

W oferowanym przez producentów procesorów środowisku programowym, wspomaganym przez pakiety wyższego poziomu można projektować algorytmy przetwarzania sygnałów, tworzyć oprogramowanie użytkowe, a także weryfikować przyjęte koncepcje poprzez ich symulację.

Etapy projektowania oprogramowania systemu bazującego na procesorze sygnałowym przedstawiono na rysunku 3. Opracowanie kodu aplikacji powinno być poprzedzone rozpoznaniem standardów oprogramowania dostarczanego przez producentów oraz możliwościami samego procesora. W kodzie aplikacji celowe jest wykorzystanie bibliotek wspomagających obsługę urządzeń peryferyjnych oraz biblioteki gotowych algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów. Funkcje edycji kodu, usuwania błędów oraz optymalizacji kodu wynikowego są standardem w tzw. oprogramowaniu firmowym. Czołowi producenci sprzętu dostarczają również gotowe systemy operacyjne czasu rzeczywistego.



Rys. 3. Etapy projektowania oprogramowania systemu

Sprawdzenie i ocena własności funkcjonalnych

Po wykonaniu i uruchomieniu systemu ma miejsce testowanie prototypu, a także wprowadzenie niezbędnych poprawek. Dla projektantów systemów przetwarzania sygnałów pomiarowych z wykorzystaniem SWAS etap ten umożliwia weryfikację założeń i przyjętych rozwiązań w zakresie konstrukcji i oprogramowania systemu. Daje on okazję do uogólnień przydatnych w dalszych pracach.

Opracowanie dokumentacji eksploatacyjnej

Zaprojektowany i wykonany system przetwarzania sygnałów pomiarowych ma być narzędziem w ręku człowieka. Ten aspekt musi być brany pod uwagę w czasie całego okresu jego projektowania, również w czasie opracowywania dokumentacji eksploatacyjnej, która służyć ma użytkownikowi oraz obsłudze serwisowej. Uruchomienie systemu u użytkownika i przeszkolenie obsługi to dodatkowe konieczne warunki pełnego i właściwego wykorzystania efektów pracy projektantów, których zaangażowanie w tych czynnościach kończy cykl opracowania systemu.

Przykład implementacji procedur analizy wielorozdzielczej

Przykład projektowania systemów pomiarowych przedstawiono na zestawie TMS320C6713 SDK firmy Texas Instruments. Jest to tzw. zestaw uruchomieniowy zawierający procesor sygnałowy, zewnętrzną pamięć oraz układy wejścia/wyjścia. Projektowanie systemu obejmowało opracowania kodu programu do analizy sygnałów niestacjonarnych w środowisku Code Composer Studio dostarczanym przez producenta zestawu.

Podstawą konstrukcji zestawu uruchomieniowego jest zmiennoprzecinkowy procesor TMS320C6713 o zmodyfikowanej architekturze harwardzkiej, pracujący z czę-

stotliwością taktowania 225 MHz. W jego strukturze można wyróżnić osiem niezależnych jednostek funkcjonalnych, sterowanych potokowo (*pipelining*), co w połączeniu z architekturą słowa typu Velocity (ang. *Very Long Instruction Word*) istotnie przyspiesza realizację złożonych algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów [3, 11].

Omawiany przykład implementacji algorytmów analizy sygnałów niestacjonarnych jest kontynuacją tematyki realizowanej w projekcie badawczym [5] i dotyczy wielorozdzielczej analizy przebiegów szumowych z wykorzystaniem falki Malvara. Do obliczania współczynników przekształcenia falkowego wykorzystano algorytm szybkiego przekształcenia Fouriera.

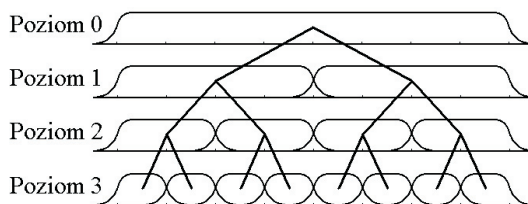
Analiza wielorozdzielcza z wykorzystaniem falki Malvara

Falka Malvara jest opisana funkcją oscylacyjną, zmodulowaną obwiednią w celu minimalizacji tzw. efektów przejściowych na granicach przedziałów segmentacji. Opisuje ją zależność

$$\Psi_{jk} = \sqrt{\frac{2}{|I_j|}} \cos \frac{\pi}{|I_j|} \left(k + \frac{1}{2} \right) t \cdot g_j(t), \quad (1)$$

gdzie: $g_j(t)$ — obwiednia falki;
 I_j — przedział czasowy;
 j — numer przedziału czasowego;
 k — numer bazy.

Analiza wielorozdzielcza z wykorzystaniem falki Malvara (rys. 4) polega na podziale ciągu próbek wartości chwilowych sygnału na segmenty, dla których oblicza się współczynniki dyskretnego przekształcenia kosinusowego typu DCTII [2], przy czym długość segmentów zmniejsza się w stosunku 1:2 ze wzrostem numeru poziomu dekompozycji.



Rys. 4. Schemat analizy wielorozdzielczej z wykorzystaniem falki Malvara

Warunkiem poprawnej wielorozdzielczej dekompozycji sygnału jest

$$g_{j,p}^2(t) + g_{j+1,p}^2(t) = 1, \quad (2)$$

gdzie: $g_{j,p}$ jest j -tym oknem czasowym dla p -tego poziomu.

Lokalizację czasową niestacjonarnych segmentów sygnału uzyskuje się w wyniku analizy współczynników falkowych na kolejnych poziomach dekompozycji.

Ocena czasochłonności realizacji procedur analizy wielorozdzielczej

Do implementacji algorytmu wielorozdzielczej analizy sygnału pomiarowego z wykorzystaniem falki Malvara wykorzystano procedurę FFT pochodzącą z biblioteki DSP dla procesora TMS320C6713.

Specyfika obliczeń współczynników dyskretnego przekształcenia kosinusowego typu DCTII z wykorzystaniem standardowego algorytmu FFT powoduje, że dla ciągu próbek wartości chwilowych sygnału o długości N , niezbędne jest obliczanie $2 \cdot N$ współczynników przekształcenia Fouriera, co ma swoje bezpośrednie odbicie w czasie wykonywania procedury FFT (tab. 2) oraz w sumarycznym czasie obliczania współczynników przekształcenia falkowego (tab. 3).

TABELA 1

Czasy wykonania procedury FFT

Liczba próbek	Czas wykonania procedury FFT [ms]
1024	0,19
2048	0,41
4096	0,83
8192	2,02

TABELA 2

Czasy wykonania procedury przekształcenia Malvara

Liczba próbek	Czas wykonania procedury przekształcenia Malvara opartej o algorytm FFT [ms]
1024	8,97
2048	18,02
4096	36,33

TABELA 3

Czasy wykonania procedury analizy wielorozdzielczej z wykorzystaniem falki Malvara dla ciągu próbek wartości chwilowych sygnału o długości 4096

Liczba poziomów	Czas wykonania procedury analizy wielorozdzielczej opartej o algorytm FFT [ms]
2	79,74
3	132,50
4	167,62

Zamieszczone wyniki są przydatne w ocenie właściwości dynamicznych systemu przetwarzania sygnałów pomiarowych w czasie rzeczywistym. Należy podkreślić, że procedury zawarte w bibliotece DSP zostały zaprojektowane z uwzględnieniem najlepszego wykorzystania dostępnych zasobów procesora.

Podsumowanie

Zaproponowana metodyka projektowania systemów przetwarzania sygnałów na procesorach sygnałowych jest pewną koncepcją zalgorytmizowania tego procesu poprzez specyfikację etapów i problemów, które należy rozwiązać w trakcie realizacji zadania. Nie stanowi zatem kanonu, którego należy bezwzględnie przestrzegać, a jest raczej podsumowaniem doświadczeń nabytych przez autorów w trakcie projektowania informacyjnego systemu pomiarowego, przeznaczonego do analizy pewnej klasy sygnałów niestacjonarnych.

Dla implementacji procedur analizy wielorozdzielczej z wykorzystaniem falki Malvara w procesorze TMS320C6713 dokonano oceny ich czasochłonności. Wyniki tej oceny mogą być przydatne w procesie projektowania systemów pomiarowych bazujących na analizie wielorozdzielczej sygnałów szerokopasmowych z wykorzystaniem podobnej klasy procesorów.

Wybór procesora TMS320C6713 do implementacji procedur wielorozdzielczej analizy sygnałów nie jest przypadkowy. Zdecydowały o nim jego cechy funkcjonalne oraz narzędzia wspomagające proces projektowania aplikacji. Nie bez znaczenia były również parametry kart rozszerzeń, oferowanych przez producenta, zwłaszcza przeznaczonych do konfigurowania sekcji akwizycji sygnałów pomiarowych.

W toku dalszych badań nad implementacją procedur analizy wielorozdzielczej z wykorzystaniem falki Malvara celowe jest podjęcie prac dotyczących możliwości konstrukcji systemu o rozłożonej mocy obliczeniowej z implementacją wybranych procedur w układach FPGA, sterowanych z poziomu procesora sygnałowego.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] M. GONERA, W. KICIŃSKI, *Czasowo-częstotliwościowe metody analizy sygnałów*, Prace Przemysłowego Instytutu Elektroniki, nr 149, 2004, 7.
- [2] S. MALLAT, *A wavelet tour of signal processing*, Academic Press, 1999.
- [3] R. CHASSAING, *Digital signal processing and applications with the C6713 and C6416 DSK*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
- [4] W. KICIŃSKI, *Problemy pomiarów szumów podwodnych*, Prace Przemysłowego Instytutu Elektroniki, nr 140, 2000, 111.
- [5] M. GONERA, W. KICIŃSKI, T. OPARA, *Pomiar i badanie cech osobniczych sygnałów szumowych powodowanych przez płetwonurków*, Raport grantu MniI, nr 0 T00A 016 23.
- [6] M. GONERA, *Problemy projektowania informacyjnych systemów pomiarowych (ISP)*, Prace Przemysłowego Instytutu Elektroniki, nr 53, 1975, 33-42.
- [7] W. KICIŃSKI, *Dyskretne przekształcenie kosinusowe — nowe narzędzie w przetwarzaniu sygnałów pomiarowych*, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 9, 2007, 115-118.
- [8] *DSP Selection Guide*, Texas Instruments, Dallas, 2007.
- [9] *Embedded processors and DSP selection guide*, Analog Devices, Norwood, 2007.
- [10] *Code Composer Studio IDE v3 White Papers*, Texas Instruments, Dallas, 2004.
- [11] *TMS320C6713B Floating-Point Digital Signal Processor Data Sheet*, Texas Instruments, Dallas, 2006.
- [12] *TMS320C6713 DSK Technical Reference*, Texas Instruments, Dallas, 2003.
- [13] *TMS320C67x DSP Library Programmer's Reference Guide*, Texas Instruments, Dallas, 2006.

Ł. ĆWIKLIŃSKI, W. KICIŃSKI

Computer-aided designing of signal processing systems on digital signal processors

Abstract. The paper deals with designing of multiresolution signal analysis systems with use of digital signal processors. Implementation of signal processing algorithms was discussed in aspect of hardware and software construction. An example of implementation of multiresolution analysis procedures with Malvar wavelet was shown.

Keywords: multiresolution signal analysis, digital signal processors, Malvar wavelet, measuring signals

Universal Decimal Classification: 621.317

