

# Początki DSP



Po wakacyjnej przerwie wracamy do tematyki DSP. Tym razem omawiamy początki tej, bardzo nowej, technologii obróbki sygnałów analogowych. Na pytania dlaczego i jak powstały specjalizowane procesory sygnałowe odpowiadamy w artykule.

Rozwój cyfrowego przetwarzania sygnałów został zapoczątkowany przez projektantów systemów analogowego przetwarzania sygnałów, którzy usiłowali symulować procesy zachodzące w tych układach bez budowania bardzo kosztownych prototypów. Nikt z prowadzących te pionierskie prace nie przewidywał, że mogą one być przyczynkiem do powstania w latach 80-tych dużego działu elektroniki zajmującego się cyfrową obróbką sygnałów.

Wprowadzenie cyfrowego przetwarzania sygnałów było uzależnione od możliwości obliczeniowych stosowanych komputerów oraz odpowiednich algorytmów, nad którymi pracowali matematycy już od początku lat 50. Gdy wybrano grupę algorytmów stanowiących podstawę działania przyszłego układu, projektanci rozpoczęli poszukiwania optymalnej architektury komputera, która pozwoliłaby na osiągnięcie maksymalnej efektywności. Wczesne systemy potrafiły jedynie gromadzić dane w pamięci, aby później móc przeprowadzić obliczenia. Dzisiaj realizuje się układy pracujące w czasie rzeczywistym, na bieżąco reagujące na zmiany przetwarzanego sygnału.

Podstawowe algorytmy modelowania sygnałów, wykorzystywane w dzisiejszych układach DSP, bazują na przekształceniach Laplace'a i Fouriera powstałych w XIX wieku.

Jean Fourier był francuskim matematykiem i fizykiem. Szereg Fouriera jest używany do opisu dowolnych sygnałów okresowych, zaś transformata Fouriera do opisu sygnałów nieokresowych.

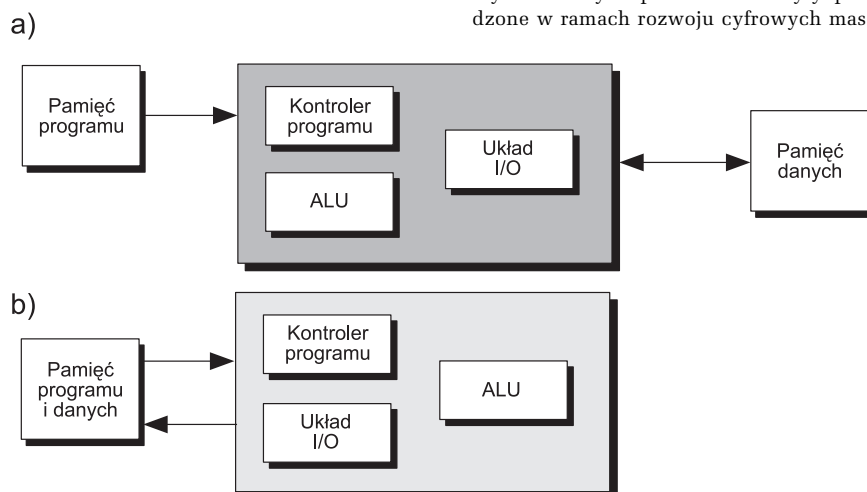
Pierre Simon de Laplace był z kolei francuskim astronomem, matematykiem i fizykiem, który pracował nad opisem matematycznym ruchu planet. Jednak jego prace znalazły zastosowanie również w innych dziedzinach. Za pomocą transformaty Laplace'a opisuje się pojedyncze sygnały, zaś po odpowiednim rozszerzeniu i właściwej interpretacji jest nazywana transformatą Z, będącą podstawową zależnością opisującą bloki filtrów cyfrowych. Prace nad wykorzystaniem tych przekształceń były prowadzone w ramach rozwoju cyfrowych maszyn

liczących w latach 40-tych i 50-tych. Dopiero jednak w roku 1965 opracowano nowy algorytm, znany jako *fast Fourier transform* (FFT), który zasadniczo ograniczył liczbę wykonywanych operacji mnożenia, wymaganych dla uzyskania wyniku. Było to szczególnie istotne, ponieważ operacja mnożenia jest wąskim gardłem w obliczeniach większości algorytmów DSP.

Dzisiejsze procesory DSP to pojedyncze układy scalone. Podstawowe bloki funkcjonalne tych układów były dobrze znane wcześniej, lecz dopiero na początku lat 80-tych wymyślono technologie, dzięki którym możliwe było zrealizowanie i zamknięcie ich w jednej strukturze. Generalnie architektury wewnętrzne procesorów można podzielić na dwie grupy. Architektura pierwszego, elektromechanicznego komputera miała oddzielną pamięć przeznaczoną na program i oddzielną przeznaczoną dla danych, tak że był możliwy równoczesny dostęp do obu tych pamięci. Jest ona znana jako architektura typu Harvard (rys.1a) i powstała w końcu lat 30-tych. Pierwszy komputer Harvard Mark I rozpoczął pracę w 1944 roku. Pierwszym naprawdę elektronicznym komputerem był ENIAC (ang. Electronic Numerical Integrator and Calculator) i również przy jego budowie wykorzystano architekturę typu Harvard. Jednakże z powodu złożonej budowy dwóch niezależnych układów pamięci, architektura ta stała się mało popularną przy projektowaniu kolejnych komputerów (procesorów).

W czasie powstawania ENIACA-a jednym z konsultantów był John von Neumann, matematyk węgierskiego pochodzenia. Był on twórcą nowej i zupełnie różniącej się architektury procesora. W opublikowanej w 1946 roku pracy przedstawił ideę opierającą się na dwóch przesłankach: nie ma żadnych wewnętrznych różnic pomiędzy instrukcjami i danymi oraz, że instrukcja może zostać podzielona na dwie części zawierające polecenie czyli rozkaz oraz adres operandu. Dzięki temu można było używać tylko jednej pamięci dla instrukcji i danych. Architektura von Neumanna (rys.1b) stała się standardową dla projektowanych systemów komputerowych właściwie do dzisiaj. Pierwszy komputer, o nazwie IAS (ang. Institute of Advanced Studies), wykorzystujący ten rodzaj architektury powstał w 1951 roku w Princeton, USA.

Nowy typ architektury znacznie ułatwił projektowanie komputerów, lecz miał jedną istotną wadę: procesor miał w danej chwili dostęp tylko do programu (instrukcji) lub do danych. Jednakże okazało się, że w ogólnym rozwoju komputerów fakt ten nie miał prawie znaczenia. Popularne procesory x86 Intela wykorzystują również ten typ architektury. Podstawowy blok liczący zawiera ALU (ang. arithmetic logic unit) oraz rejestry. Operacje takie jak dodawanie, przeniesienia czy odejmowanie są wykonywane w pojedynczych cyklach maszynowych. Złożone operacje mnożenia czy dzielenia są



Rys. 1. Schemat architektury procesora: a) typu Harvard, b) von Neumana.

realizowane jako ciąg dodawań, odejmowań lub przeniesień i są realizowane w wielu taktach zegara.

Przy cyfrowym przetwarzaniu sygnałów, wiele obliczeń przyjmuje formę:  $A=B+CD$ .

Ten prosty wzór zawiera zarówno operację dodawania jak i mnożenia. Ponieważ jednak w procesorach o architekturze von Neumanna operacja ta zajmuje relatywnie dużo czasu, nie są one idealnym narzędziem do przeprowadzania tego typu obliczeń. W procesorach sygnałowych jest bowiem ważne jak najszybsze wykonanie takich operacji, najlepiej w jednym takcie zegara.

Pierwsze systemy DSP były budowane ze standardowych podzespołów używanych do normalnych elektronicznych maszyn cyfrowych. Jednakże długi czas potrzebny do obliczeń dramatycznie obniżył słabość i ograniczenia tych systemów. Zwiększenie wydajności próbowano osiągnąć poprzez zastosowanie technik pipeliningu, używanego obecnie powszechnie w procesorach Pentium. Pierwsze układy wykorzystujące pipelining pojawiły się na początku lat 70. W tych latach przodowało w dziedzinie DSP *Lincoln Laboratories*. Zbudowany w 1971 roku *Lincoln FDP* (ang. *Fast Digital Processor*) miał czas wykonywania operacji 600ns, ale zbudowany został z 10000 układów scalonych! Próba równoległego wykonywania kilku działań, przy wykorzystaniu architektury von Neumanna, była przyczyną tak dużej złożoności układu.

Nauczona doświadczeniem firma zbudowała urządzenie LSP/2 wykorzystujące starą i prawie zapomnianą architekturę Harvard. Dzięki temu osiągnięto 4-krotne skrócenie czasu wykonywania operacji, przy równoczesnym zmniejszeniu liczby elementów do 1/3. Jednakże nadal systemy DSP były niesłychanie złożone oraz bardzo drogie. Końiec lat 70-tych przyniósł układy scalone NMOS wykonane w technologii 3µm, która umożliwiała upakowanie 100 000 tranzystorów w jednym takim układzie. Sprawiało to, że w latach 1980-82 pojawiły się aż cztery jednoukładowe procesory sygnałowe. Ostatnim z nich był procesor firmy Texas Instruments TMS32010 i od tego czasu możemy mówić o pojawieniu się prawdziwych jednoukładowych procesorów DSP. Jego poprzednicy wykorzystywali architekturę Harvard z dwoma niezależnymi układami pamięci. Dopiero w TMS32010 zastosowano zmodyfikowaną architekturę typu Harvard - użytkownik dołącza do procesora jedną pamięć zawierającą program i dane, które są rozdzielane na niezależne magistrale dopiero wewnątrz procesora (rys.2). Tego typu zmodyfikowana architektura jest stosowana powszechnie do dzisiaj praktycznie we wszystkich procesorach DSP.

Wiedząc już ile wysiłku włożono w powstanie procesorów DSP możemy zadać pytanie: po co to wszystko? Przecież można w wielu przypadkach użyć zwykłe układy analogowe zamiast tychże procesorów. Co więc sprawia, że procesory DSP stają się coraz bardziej popularne? Odpowiedź nie jest prosta.

Jednym z powodów jest programowalność tych układów. Przecież powszechnie używane komputery PC można używać do pisan

tekstów (jak w tym przypadku), by po kilku sekundach przeistoczyć go w konsolę do grania. Podobne możliwości mają również układy DSP. Możliwe jest zaprojektowanie układu, który przy niezmienianej konfiguracji będzie realizował różne funkcje, w zależności od załadowanego programu. Dobrym przykładem jest układ filtru cyfrowego, który może być filtrem dolno-, górnoprzebiegowym lub pasmowym, w zależności od programu - w technice analogowej rzecz praktycznie nie do zrealizowania.

Systemy cyfrowe w porównaniu z systemami analogowymi charakteryzują się znacznie lepszą stabilnością parametrów, zarówno czasowych, jak i temperaturowych. W układach cyfrowych nie psują parametrów starzejące się kondensatory i rezystory o zmieniającej się z czasem rezystancji. Ponadto, procesory DSP mogą być tak zaprogramowane, że identyfikują i automatycznie kompensują zmiany parametrów elementów analogowych systemu.

Niezaprzeczalną zaletą układów cyfrowych jest ich powtarzalność. Dzięki temu możemy gotowe urządzenie znacznie łatwiej uruchomić (praktycznie brak operacji strojenia) oraz zapewnić powtarzalność parametrów wejściowych i wyjściowych urządzenia.

Kilka lat temu zaprojektowano układy do tłumienia hałasu w kabinie samochodu, samolotu lub śmigłowca. System opierał się na generacji dźwięku o identycznej częstotliwości lecz o przeciwnej fazie, co powodowało znoszenie się fal dźwiękowych. Czujnikami były umieszczone w kabinie mikrofony, które wykrywały zmiany natężenia i częstotliwości dźwięku. Opierając się na zmianach wykrywanych przez mikrofony system reagował zmianami parametrów generowanego sygnału, stopniowo dostosowując go do nowego źródła hałasu.

Układy DSP bardzo szybko znalazły zastosowanie w systemach redukcji hałasu. Dzięki wykorzystaniu adaptacyjnych algorytmów udało się, przy różnych poziomach hałasu, zachować podobny sposób reagowa-

nia na zmieniający się sygnał z mikrofonów.

Z innych dziedzin życia: praktycznie każdy z posiadanych przez nas odtwarzaczy CD zawiera specjalizowany procesor DSP służący do korekcji błędów. Podobnie rzecz wygląda z nowoczesnymi modemami, w których oprócz korekcji błędów następuje również kompresja danych. Systemy telekonferencyjne, dzięki którym za pomocą zintegrowanej sieci cyfrowej ISDN można przesyłać obraz z dźwiękiem z bardzo małym opóźnieniem (rzędu kilkunastu milisekund) również zbudowane są w oparciu o procesory DSP.

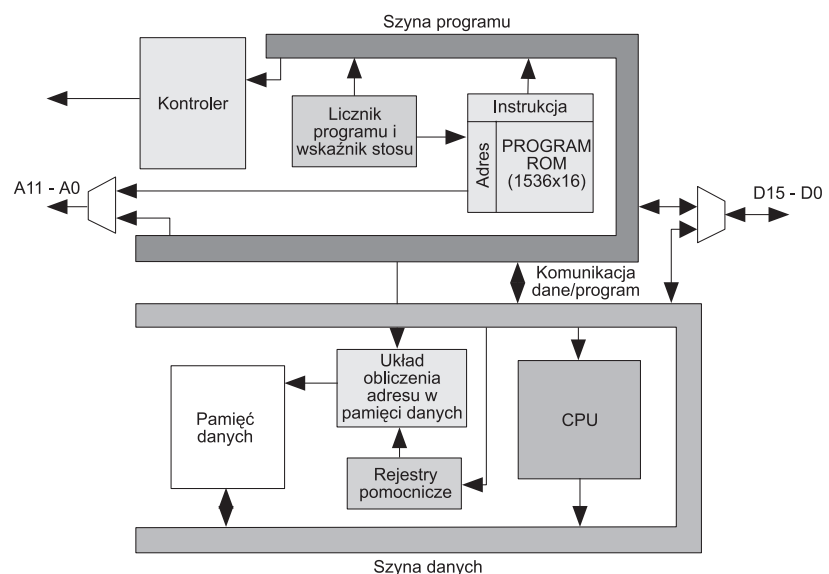
Istnieją również układy, których praktyczna realizacja w postaci analogowej nie jest możliwa. Klasycznym przykładem jest filtr pasmowy o zerowym kącie przesunięcia. W typowych filtrach (np. LC) jedynie dla częstotliwości środkowej filtr ma charakter rezystancyjny i nie następuje przesunięcie fazowe między prądem a napięciem sygnału. Im bardziej odstroimy się od częstotliwości środkowej, tym bardziej filtr zmienia swój charakter na pojemnościowy lub indukcyjny, przez co zwiększa się kąt przesunięcia, pomimo iż ciągle znajdujemy się w paśmie przepustowym. W przypadku realizacji filtru na procesorze DSP tego typu zjawisko nie występuje.

Oczywiście, układy DSP nie są idealne. Ich podstawową wadą jest ograniczone pasmo pracy. Ograniczenie to wynika zarówno z czasów wykonywania pojedynczych operacji, jak również z samej szybkości przetwarzania układów wejściowych i wyjściowych, którymi najczęściej są przetworniki A/C i C/A. Jednakże stały rozwój techniki cyfrowej (telefonia komórkowa, telewizja cyfrowa, wideofony itp.) sprawia, że układy DSP stają się coraz bardziej popularne i częściej zaczynają pojawiać się w naszych domach.

**Krzysztof Różyc, AVT**

**Ryszard Szymaniak, AVT**

*Autorzy dziękują firmom: Motorola i Texas Instruments za nadesłane materiały wykorzystane podczas pisania tego artykułu.*



Rys. 2. Zmodyfikowana architektura typu Harvard zastosowana w procesorze TMS32010 firmy Texas Instruments.