

1 Dodatek B: obwody scalone i mikroprocesory.

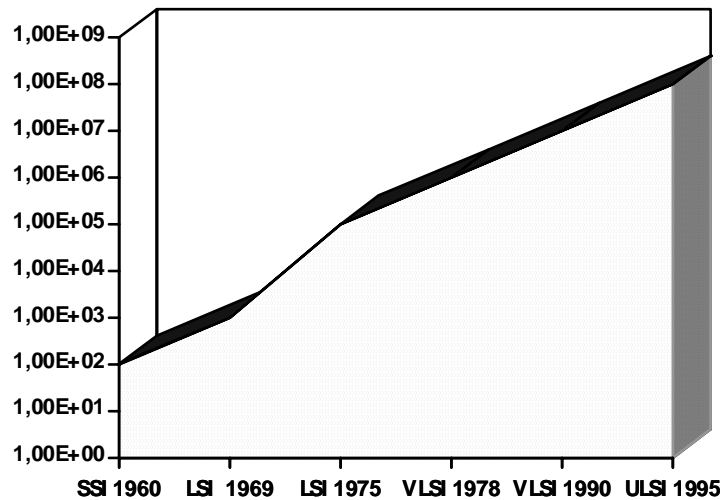
W rozdziałach wstępnych omówiłem już pobieżnie rodzaje elementów scalonych kryjących się we wnętrzu komputera. Tutaj Czytelnik znajdzie nieco więcej informacji o technologii i o rodzajach mikroprocesorów, kości pamięci i innych obwodów scalonych. Zaczniemy od elementów scalonych, od ich technologii.

1.1 Technologia produkcji obwodów scalonych

Półprzewodniki zawdzięczają swoją nazwę temu, że nie przewodzą równie dobrze prądu, jak niektóre metale, ale też nie stawiają mu tak wysokiego oporu jak izolatory. Półprzewodniki tworzą kryształy. Opisem ich własności zajmuje się fizyka ciała stałego, a szczególnie jej dział nazywany fachowo elektroniką kwantową. Nie będziemy się tu wgłębiać w teorię, wystarczy wiedzieć, że najczęściej używanym półprzewodnikiem jest krzem, powszechnie występujący w postaci piasku. Narodziny obwodów scalonych rozpoczynają się w piecu, w którym hodowany jest wielki - może liczyć ponad pół metra i mieć średnicę 20 centymetrów - i bardzo czysty - zanieczyszczenia stanowiąc mogą nie więcej niż 0.00000001% - kryształ. Z jednego takiego kryształu można zrobić ponad milion obwodów scalonych.

Kryształ kroi się na cieniutkie plasterki o grubości 2/100 milimetra, a w nich tworzy się mikroskopijnej wielkości złożone struktury, wprowadzając do krzemu domieszki, różne substancje mniej lub bardziej przewodzące. Wielkości domieszkowanych struktur mierzy się w mikrometrach (μm), czyli milionowych częściach metra lub tysięcznych częściach milimetra. Na płytkę krzemu nakłada się kolejno miniaturowe maski, naświetla ultrafioletem i wytrawia strumieniem gorących gazów zawierających pożądane domieszki.

Używana obecnie technologia fotolitograficzna (litografia to technika „odciskania” obrazu z twardego podłoża) pozwala na tworzenie połączeń o szerokościach 1-1.5 mikrometra. Najmniejsze struktury w produkowanych pod koniec 1995 roku obwodach scalonych mają szerokość 0.35 mikrometra. Bardziej wyrafinowane techniki, stosowane na razie eksperymentalnie, takie jak litografia laserowa, pozwalają na tworzenie struktur o rozmiarach 0.25 mikrometra. Jeszcze mniejsze struktury, rzędu 0.1 mikrometra, uzyskać można wykorzystując promienie Roentgena lub używając promieniowanie



Wzrost gęstości elementów w obwodach scalonych. Jedna komórka pamięci wymaga kilku elementów (struktur logicznych).

synchrotronowego (wytwarzanego przez akceleratory cząstek elementarnych). Bardzo dobrych efektów spodziewać się można po bezpośredniej implantacji (wstrzykiwaniu) jonów przy pomocy akceleratorów, czyli urządzeń przyspieszających naładowane cząstki. Cząstki te wbijane są bezpośrednio w krzem tworząc w nim złożone struktury.

Proces wytwarzania obwodów scalonych jest tak skomplikowany, że najdrobniejsze niedoskonałości kryształu krzemu, zanieczyszczenia powietrza w hali produkcyjnej czy mechaniczne niedoskonałości procesu litografii i wytrawiania powodują, że znaczny procent produkowanych obwodów nie nadaje się do użytku. Chociaż technologia jest skomplikowana materiały do produkcji obwodów nie są drogie a ich produkcja tak masowa, że ceny nawet bardzo skomplikowanych obwodów ciągle spadają. Główny koszt produkcji obwodów scalonych to koszty czystej myśli technicznej, czyli pracy nad projektem. Szczególnie kosztowne jest opanowanie nowych technologii, np. wiele lat pracowano nad technologią zastępującą krzemem arsenkiem galu GaAs. Jest to materiał pozwalający na budowę obwodów scalonych o większej szybkości niż obwody z krzemu. Firmy produkujące superkomputery, szczególnie firma Cray, zainwestowały wiele w rozwój tej technologii lecz okazała się ona trudniejsza, niż przypuszczano. Nowy model Cray 3 oparty na technologii arsenku galu pojawił się z opóźnieniem kilku lat co stało się jedną z przyczyn trudności finansowych firmy. Wydaje się obecnie, że pozycja krzemu

jako głównego materiału do produkcji obwodów scalonych nie będzie przez długie lata zagrożona.

1.2 Kości pamięci

Kości pamięci dzielą się na pamięć dynamiczną, zwaną **DRAM** (dynamic RAM) i pamięć statyczną, zwaną **SRAM** (static RAM). W kartach wideo używa się specjalny rodzaj kostek pamięci obrazu zwany **VRAM**. Jeszcze na początku lat 80-tych stosowano pamięci ferrytowe ze względu na wysoką cenę pamięci półprzewodnikowych. Pamięci ferrytowe mają już tylko historyczne znaczenie i należą do zupełnie innej technologicznie epoki. W komputerach trzeciej generacji pracujących jeszcze w nielicznych miejscach na świecie pamięci te wymienione zostały na pamięci półprzewodnikowe.

Pamięć dynamiczna czyli DRAM to rodzaj miniaturowych kondensatorów, prostych w budowie, ale wymagających w krótkich odstępach czasu **odświeżania** (refreshing) ich ładunku, by zawartość komórek pamięci nie została zapomniana. Stąd pochodzi nazwa „pamięć dynamiczna”. Częstość tego odświeżania jest jednym z parametrów, jakie można ustawić w zaawansowanym programie (advanced setup) pozwalającym zmieniać konfigurację komputera. Jest to jednak czynność, którą lepiej pozostawić specjalistom od serwisu.

Pamięć statyczna to zbiór miniaturowych przerzutników bistabilnych (multiwibratorów), znacznie bardziej skomplikowanych niż elementy pamięci DRAM, nie wymagających natomiast odświeżania. Raz zapamiętane wartości pozostają w pamięci SRAM do momentu wyłączenia prądu. Stąd nazwa „pamięć statyczna”. Jej zaletą jest większa szybkość działania, wadą natomiast wyższa cena.

Podstawowe parametry dla kości pamięci to ich pojemność podawana najczęściej w kilobitach (Kb) a nie w kilobajtach (KB) oraz czas dostępu, czyli czas potrzebny na przeczytanie lub zapisanie w niej danych, mierzony w nanosekundach (ns). Dla pamięci DRAM czas dostępu do danych wynosi nie więcej niż 150 ns dla starszych kości, najczęściej spotyka się kości o czasie dostępu 100 ns a w szybszych komputerach 80 a nawet 60 ns. Cykl odświeżania w pamięciach DRAM jest 2-5 razy dłuższy niż czas dostępu. Pamięci SRAM są kilkukrotnie droższe ale ich szybkość wynosi od 5 ns do około 60 ns. Oprócz czasu dostępu istotna jest również liczba cykli zegara w czasie których pamięć zapisze grupę bajtów i będzie gotowa do zapisania następnej. Nazywa się ją „stanem oczekiwania” (wait state) gdyż w tym czasie mikroprocesor czeka na gotowość pamięci do dalszego współdziałania. W starszych komputerach było to często kilka cykli, w nowszych często pamięć jest tak zorganizowana, że nadaje za procesorem, czyli stan oczekiwania jest zerowy. Pamięć może być również podzielona na części o

adresach parzystych i nieparzystych - nazywa się to pamięcią z przeplotem i pozwala zmniejszyć liczbę stanów oczekiwania.

Organizacja komórek pamięci w kościach może być różna: w komórkach kości „z kontrolą parzystości” przy każdym bajcie, składającym się z 8 bitów, zapisuje się jeszcze dodatkowy bit, zwany bitem parzystości. Pozwala to na pewną kontrolę błędów: bit parzystości jest uzupełniany tak, by liczba bitów o wartości 1 była parzysta. Przy odczycie sprawdza się, czy jest ona nadal parzysta. Nie daje to całkowitej pewności, że dane odczytane zostały bez błędu, ale większość błędów polega właśnie na zmianie wartości jednego bitu i wówczas są one wykrywane. Błędy pamięci prowadzą do nieprzewidywalnego działania komputera, mogą powodować zablokowanie jego działania i utratę danych, stąd oszczędność na kontroli parzystości w niektórych tanich komputerach nie jest dobrym pomysłem. Megabajt pamięci z parzystością najczęściej sprzedaje się jako zestaw 9 kości po 1 Mbit każda.

Z punktu widzenia funkcji, jaką spełniają kości pamięci w komputerach, wyróżnia się dwa rodzaje obwodów pamięci. Pierwszych z nich nazywany jest **RAM** (**R**andom **A**ccess **M**emory, dosłownie „Pamięć Przypadkowego Dostępu”). Ta dość dziwna nazwa pochodzi z czasów, gdy były tylko pamięci sekwencyjne, takie jak taśma magnetofonowa, wymagające odczytania po kolei wszystkich danych, które poprzedzały te do których chcieliśmy dotrzeć w danym momencie. Wprowadzenie pamięci bezpośrednio adresowalnej utrwalone zostało w nazwie RAM. Drugi rodzaj kości pamięci nazywany jest **ROM** (**R**ead **O**nly **M**emory), czyli pamięć, z której możliwy jest jedynie odczyt, ale nie można zmienić jej zawartości. Pamięć ROM również po wyłączeniu zasilania nie traci swojej zawartości. Dzięki temu przechowywać w niej można programy konieczne do uruchomienia komputera i wszystkie te programy, które chcemy mieć bez przerwy „pod ręką”.

Innym rodzajem pamięci, pośrednim pomiędzy pamięcią RAM i ROM, są **EPROMy** (**E**rasable **P**rogrammable **R**OM, czyli wymazywalna programowalna pamięć ROM). Są to kości pamięci nie tracące danych po wyłączeniu zasilania, które można wymazywać przy pomocy promieniowania ultrafioletowego i zapisywać ponownie. Nową odmianą EPROMów, stosowaną w niektórych urządzeniach zamiast pamięci ROM, są **EEPROM**, czyli EPROMy wymazywalne szkielem elektrycznym.

Kostki pamięci sprzedaje się w czterech różnych obudowach:

DIP (**D**ual **I**n-line **P**ackage) czyli obudowa dwurzędowa, z rzędami 16 metalowych nóżek wciskanych do gniazd na płycie głównej;

SIMM (**S**ingle **I**n-line **M**emory **M**odule) czyli obudowie jednorzędowej, przypominającej miniaturowaną kartę, w której znajduje się dziewięć kości RAM, wciskanej do szczeliny na płycie głównej lub karcie rozszerzenia pamięci.

Rzadziej spotyka się obudowy **SIP** i **ZIP**, które można uznać za odmianę obudowy SIMM wyposażoną w jeden lub dwa rzędy nóżek zamiast złącza krawędziowego. Na kostkach podawane są numery seryjne i zazwyczaj ostatnie cyfry określają szybkość w nanosekundach a poprzedzające je pojemność w kilobitach, np. symbol 41256-80 znaleźć można na kostce o szybkości 80 nanosekund i pojemności 256 Kb. Oprócz pojedynczych kostek pamięci montowanych na płycie głównej pamięć można rozszerzać korzystając z kart pamięci stronicowanej (expanded memory).

Kanały bezpośredniego dostępu (DMA, Direct Memory Access) pozwalają na omijanie mikroprocesora przy transmisji danych z urządzeń zewnętrznych (np. dysków) do pamięci operacyjnej.

Pamięci na domenach magnetycznych zwanych „pęcherzykami magnetycznymi” (magnetic bubble memories) nie spotyka się w komputerach chociaż przed laty wiele o nich pisano ze względu na ich dużą pojemność i utrzymywanie danych nawet po wyłączeniu zasilania. Trudności technologiczne z zapewnieniem wysokiej niezawodności i szybkości porównywalnych z pamięcią DRAM oraz wysokie koszty produkcji nie zostały do tej pory przezwyciężone. Podobnie pamięci holograficzne są w dalszym ciągu kwestią przyszłości i specyficznych zastosowań, związanych z przechowywaniem obrazów i innych danych, dla których niedoskonałości pamięci w postaci przekłamania kilku bitów nie mają istotnego znaczenia.

Innym rodzajem pamięci, które coraz bardziej nabierają znaczenia jest pamięć określana jako „błyskowa” lub „**flash memory**”. Taka pamięć działa podobnie do EEPROMów, tzn. po wyłączeniu prądu nie traci swojej zawartości, a jednocześnie można w niej zapisywać dane tak jak w normalnej pamięć RAM. Stowarzyszenie Compact Flash Association stawia sobie za zadanie opracowanie standardowych kości takiej pamięci. Firma SanDisk wprowadziła już na rynek moduły pamięci CompactFlash (CF), przeznaczone do przenoszenia dowolnych danych pomiędzy komputerami. Zadaniem tej pamięci jest więc zastąpienie dyskietek. Początkowo oferowano pojemności kości pamięci CF od 2 do 15 MB ale w ciągu kilku lat mogły one wzrosnąć do setek megabajtów dzięki wprowadzeniu technologii kości pamięci 256 MB. Na dłuższą metę jest to więc poważne zagrożenie dla technologii dysków twardych, gdyż pamięć półprzewodnikowa jest bardziej niezawodna (brak części mechanicznych), mniejsza, pobiera mniej energii i działa szybciej.

Ceny pamięci DRAM ciągle się zmniejszają ze względu na postępy w rozwoju technologii produkcji i pojawianie się kostek o coraz większych pojemnościach. Koszty pamięci zależą oczywiście od jej parametrów, głównie od szybkości i rodzaju.

1.3 Mikroprocesory

Zajrzyjmy teraz do wnętrza mikroprocesora. Z zewnątrz wygląda on jak duży obwód scalony z wyjątkowo wielką liczbą nóżek. Jego budowa nie różni się zasadniczo od budowy dowolnego procesora. Mikroprocesor to procesor wykonany w technologii VLSI, obwodów scalonych o bardzo wielkiej skali integracji.

Zegar o częstościach 1-200 MHz wytwarza prostokątne impulsy taktujące działanie komputera. Szybkość pracy zegara decyduje w znacznej mierze o szybkości pracy całego komputera jeśli mamy do czynienia z tym samym procesorem. Ogólnie zegar jest układem sterującym i synchronizującym procesy wewnętrzne.

Do wykonywania operacji logicznych i arytmetycznych służy arytmometr. Komórki pamięci procesora nazywają się rejestrami. Licznik rozkazów zawiera adres następnego rozkazu do wykonania, rejestr rozkazów zawiera kod wykonywanego aktualnie rozkazu, akumulator przechowuje dane, potrzebnych jest również kilka rejestrów pomocniczych. Mikroprocesor może interpretować zwykle od 20 do 200 instrukcji. Po rozbudowywaniu liczby instrukcji by ułatwić życie programistom pracującym nad kompilatorami, czyli programami tłumaczącymi polecenia jakiegoś języka programowania na zrozumiałe dla mikroprocesora rozkazy stwierdzono, że większość tych rozkazów jest bardzo rzadko stosowana. Pojawiła się wówczas idea **RISC** (Reduced Instruction Set Computer) - mikroprocesor powinien mieć mało prostych ale bardzo szybko wykonywanych instrukcji.

Ile rozkazów wykonać można na sekundę? W typowym procesorze **CISC** (Complex Instruction Set Computer, czyli komputer ze zbiorem złożonych instrukcji) około 1/10 częstości zegara. Nowoczesne procesory typu RISC w czasie jednego taktu zegara potrafią wykonać nawet kilka instrukcji. Najważniejszą poza częstością zegara i liczbą wykonywanych instrukcji cechą mikroprocesora jest określenie na ilu bitach jednocześnie wykonywane są operacje: najstarsze mikroprocesory działały na 4 bitach, później na 8, 16, 32 i 64 bitach. Mikroprocesory wykonujące operacje na 32 bitach jednocześnie nazywają się 32-bitowymi itp. Oprócz ogólnego podziału na mikroprocesory typu RISC i CISC wyróżnić można wiele architektur samych mikroprocesorów. Wśród nich największego znaczenia nabrała w ostatnich latach architektura określana jako „superskalarna”, pozwalająca na wykonanie w czasie jednego cyklu zegara kilku operacji jednocześnie. Procesory o architekturze wektorowej lub macierzowej, stosowane głównie w superkomputerach, mogą wykonać jednocześnie wiele działań na elementach wektora lub macierzy ale zwalniają gdy w programie mamy instrukcje dotyczące pojedynczych elementów. Procesory superskalarne nie działają tak szybko na wektorach, są za to bardziej uniwersalne gdyż zwiększają szybkość wykonania dowolnego programu.

Działanie mikroprocesora:

Licznik rozkazów wskazuje kod ładowany do rejestru rozkazów i dekodowany przez układ sterujący: z pamięci lub rejestrów pobierane są argumenty i wykonywana jest na nich operacja a wynik przesyłany jest z powrotem do pamięci lub rejestrów. Przerwanie wykonywania rozkazu umożliwia komunikację z światem zewnętrznym, program obsługi przerwań zapamiętuje zawartość rejestrów. Przerwania są wielopoziomowe, od najmniej do najbardziej ważnych, aż do „zimnego startu” w niektórych typach komputerów.

Rozkazy dla mikroprocesora są w większości bardzo prymitywne: przesłanie kilku bajtów z pamięci lub z rejestru do innego rejestru, przepisywanie lub porównywanie ciągów bajtów, sterowanie kolejnością wykonywania instrukcji przez zmianę zawartości licznika rozkazów itp.

Początkowo mikroprocesory wymagały wiele układów wspomagających. Nowsze płyty główne mają takich układów coraz mniej. Możliwa jest już budowa całej płyty głównej na jednym obwodzie scalonym. Komputer składa się wówczas z jednego obwodu scalonego realizującego wszystkie funkcje i kilku „kości” pamięci. Nie jest to jednak rozwiązanie najlepsze gdyż ogranicza możliwości budowy różnych konfiguracji systemu dostosowanego do potrzeb użytkownika.

1.3.1 Przykłady popularnych mikroprocesorów

Przedstawiłem tu krótki przegląd najbardziej popularnych mikroprocesorów, począwszy od najprostszych do najbardziej obecnie zaawansowanych.

6502 MOS Tech, to prosty mikroprocesor 8-bitowy, adresujący 64 KB pamięci, przyjmujący 56 rozkazów i pracujący z częstotnością 1 MHz. Ulepszoną wersją tego procesora jest **65C02**.

Z80 Zilog to bardzo popularny układ 8-bitowy stosowany w wielu komputerach domowych. Adresuje 64 KB oferując aż 258 instrukcji i pozwalając na sterowanie zegarem o częstotności 2.5 MHz. Jego ulepszoną wersją jest **Z80A** pozwalający na zwiększenie częstotności do 4 MHz. Jeszcze w 1992 roku procesor ten stosowano w nowych konstrukcjach podręcznych komputerów.

Intel i klony procesorów Intela

8086 to słynny procesor Intela na którym oparta została generacja IBM-PC i PC XT. Adresuje 1MB (dzięki 20 bitowej szynie adresów), ma 16 bitową architekturę, przyjmuje 70 dość złożonych rozkazów, działa z częstotnością od 4.77-10 MHz. Układ ten równoważny jest około 30 tysiącom tranzystorów.

8088 to uproszczona wersja mikroprocesora Intel 8086; zastosowano w nim 8-bitową szynę danych, jednak dzięki ulepszonej kolejce instrukcji jest tylko nieznacznie wolniejszy od swojego pierwowzoru.

8087 to koprocesor arytmetyczny firmy Intel, służący do przyspieszenia operacji arytmetycznych. Zastosowane w nim 80 bitowe rejestry - pozwala to na dokładność 18 cyfr dziesiętnych, ale wynik zaokrąglany jest do 64 bitów (odpowiada to dokładności nieco większej niż 15 cyfr dziesiętnych). Układ równoważny jest 90 tysiącom tranzystorów.

NEC V20, V30 to mikroprocesory firmy NEC, zgodne z 8080 i 8086 ale od nich szybsze.

80286 to kolejny wielki sukces Intela. Pracuje z częstotnością 6-25 MHz, a tryb jego działania zgodny jest z układem 8086 (oznacza to, że wszystkie programy działające na starszym układzie można bez zmian uruchomić na nowym; oznacza to zgodność na poziomie binarnym) ale jest 3-10 razy szybszy. Dzięki 24 bitowej szynie adresowej może adresować bezpośrednio 16 MB pamięci a w trybie niezgodnym z 8086 adresuje nawet 1GB.

80287 jest koprocesorem arytmetycznym współpracującym z 80286.

80386 nazywany obecnie 80386 DX, to pierwszy w pełni 32-bitowy procesor Intela. Może on bezpośrednio adresować 4 GB pamięci (wirtualnie, czyli pośrednio, adresuje on aż 64 TB), zachowano przy tym zgodność z 8086. Dopuszczalne częstotści zegara to 16-40 MHz. Układ ten doczekał się wielu wersji. W szczególności popularna stała się uproszczona wersja o nazwie

80386 SX - jest to układ mający wewnętrzną architekturę 32-bitową współpracujący z zewnętrznymi układami przeznaczonymi dla procesora 80286. Dzięki temu obniżono cenę przy pewnej stracie szybkości, zachowując możliwość pracy z programami przeznaczonymi dla 32-bitowych procesorów. Obydwa układy 386 Intela są układami dynamicznymi (a więc wymagają odświeżania, podobnie jak pamięć DRAM, co kilka cykli zegara), wykonanymi w technologii tworzącej struktury o szerokości 1-1.5 μm . Układy te nie mogą pracować z częstotnością niższą od 8 MHz co warunkuje ich minimalny pobór mocy.



Układy 386 zostały ulepszone przez firmy konkurujące z Intelem, w szczególności zastosowano technologię CMOS do budowy

Processor	Liczba tranzyst.	Zegar MHz	MIPS	Cache kB	Koprocesor	Adresy (bitów)	Dane (bitów)	Data wprowad.
80286	130 000	8-12	1.2-2.7	-	80287	16	16	2/82
80386 SX	275 000	16-25	3-5	-	80387SX	24	16	6/88-1/92
80386 SL	275 000	16-25	5-8	-	-	32	32	6/91
80386DX	275 000	16-33	4-11	-	80387SX	32	32	10/85-4/89
80486SX	1.2 mln	16-33	13-28	8	80487SX	32	32	9/91-10/91
80486SL	1.2 mln	25-33	20-28	8	-	32	32	
80486DX	1.2 mln	25-50	20-41	8	wewnętrzny	32	32	4/89-6/91
80486DX2	1.2 mln	50-66	40-54	8	wewnętrzny	32	32	3/92-8/92
Pentium	3.1 mln	66	110	8+8	wewnętrzny	32	64	11/92
Pentium	3.3 mln	133	203	8+8	wewnętrzny	32	64	5/95
Pentium Pro	5.5 mln	133	280	8+8	wewnętrzny	32	64	10/95

układów statycznych, nie wymagających energii elektrycznej dla podtrzymywania aktualnego stanu układu.

Am386 jest wersją opracowaną przez firmę AMD. Dzięki zastosowaniu lepszych technologii (CMOS, szerokość ścieżek 0.8 μm) uzyskano obniżenie zużycia energii do 1/3 tej, której wymaga Intel 80386. Zużycie energii obniżono jeszcze bardziej wprowadzając tryb pracy „wyczekujący”, w którym częstość zegara obniża się z 20 MHz do 4 KHz a w trybie „uśpienia” jeszcze bardziej. Najnowsze wersje procesorów tej firmy noszą oznaczenia **Am386DXLV** i **Am386SXLV** i są jeszcze bardziej energooszczędne, używając niższego napięcia (stań LV, od Low Voltage, czyli niskonapięciowe - 3 Volty).

38600 DX i **SX** to odpowiedniki układów Intela opracowane przez firmę Chips & Technology. Firma ta jest pierwszą, która zaprojektowała swoje procesory od podstaw i oferuje też układy o większej mocy obliczeniowej oznaczone **38605 DX** i **SX**. Procesory wykonano w technologii CMOS i pracują z częstością 16-25 MHz dla procesorów SX i 25-40 MHz dla procesorów DX. Ulepszona architektura tych procesorów pozwala na wykonanie niektórych operacji dwukrotnie szybciej (w czasie jednego cyklu zegara) niż robią to oryginalne procesory Intela, dodano przy tym dodatkowe instrukcje a w wersji 38605 dodatkowe 512 bajtów pamięci dla rozkazów, usprawniając w ten sposób przetwarzanie potokowe.

386 SL to ulepszona wersja **386 SX** produkowana przez Intela w energooszczędnej technologii CMOS, przeznaczona do komputerów przenośnych. Ulepszenia obejmują również szybszy dostęp do danych z pamięci dyskowych na obwodach scalonych (np.

Flash Memory) i szybką komunikację z kartami graficznymi, kontroler pamięci notatnikowej oraz usprawniony układ wejścia/wyjścia. Całkowicie nowy system zarządzania przerwami umożliwia efektywne zarządzanie zużyciem energii elektrycznej, np. przechodzenie w stan oczekiwania. Wydłuża to znacznie czas komputerów zasilanych bateryjnie. Dostępny jest również koprocesor 387SL Intela.

386 SLC jest usprawnioną wersją **386 SX** produkowaną przez firmę IBM. Dodano między innymi 8 KB pamięci notatnikowej (cache memory), bufor danych, usprawniono wykonywanie większości instrukcji. Procesor ten, zbudowany w technologii CMOS, przy tej samej częstotliwości zegara dorównuje szybkością nowszym procesorom Intela **486 SX**.

W celu odróżnienia oryginalnych procesorów Intela od ich konkurentów używa się często określeń **i386 DX** lub **i386 SX**. Firma Intel opracowała również procesor 386 zawierający koprocesor numeryczny w jednym układzie. Nazywa się on **RapidCAD** i reklamowany jako procesor do CAD i innych numerycznie intensywnych zastosowań.

80486 Intel, w wersji DX układ ten ma zintegrowany koprocesor arytmetyczny, w wersji SX jest bez koprocatora (do mikroprocesora SX dostępny jest koprocesor zewnętrzny oznaczony symbolem **80487 SX**). Procesory te pracują z częstotliwościami zegarów 25-100 MHz (do roku 1995). Wprowadzenie zintegrowanych koprocetorów w układach 486 znacznie zmniejszyło zapotrzebowanie na koprocetory arytmetyczne, chociaż w niektórych zastosowaniach koprocesor Weitek 4167 firmy Weitek pozwala na znaczne przyspieszenie obliczeń numerycznych. W tych liczących milion elementów, wykonanych w technologii 0.8-1 μm układach zastosowano po raz pierwszy niewielką (8 KB) pamięć podręczną w jednej obudowie z samym mikroprocesorem.

80486 DX2 (DX4) to procesor Intela zwiększający dwukrotnie (czterokrotnie) wewnętrzną częstotliwość zegara. Procesor ten nazywany jest „**overdrive**” (można to przetłumaczyć jako „dopalacz” chociaż nazwa pochodzi z techniki samochodowej). Dostępne są układy na 25 i 33 MHz, które współpracując z płytami głównymi przy tej częstotliwości wykonują operacje arytmetyczne i operują na danych z pamięci notatnikowej tak, jakby pracowały przy częstotliwości 50 i 66 MHz lub 100 MHz dla częstotliwości pozwoźnej. Konstrukcja komputerów w oparciu o te procesory jest tańsza niż komputerów w pełni dostosowanych do tych wyższych częstotliwości.

Układy 486 doczekały się również konkurentów: są nimi procesory **Am486 DX/SX** firmy AMD i **Cx486 SLC/DLC** firmy Cyrix. Ten ostatni procesor można, dzięki specjalnej podstawie, wmontować w starszy komputer zamiast procesora i386. Ponieważ zbudowany jest on wykorzystując technikę wewnętrznego podwojenia częstotliwości i ma wbudowaną pamięć cache taka zamiana wyraźnie przyspiesza działanie komputera.

Pentium wprowadzono przy końcu 1992 roku. Jest to układ, który powinien nosić kolejny numer serii 80586 i tak nazywa go konkurencja robiąca równoważne układy.

Początkowo nazywano go P5, ale ostatecznie nazywa się Pentium, gdyż nie tylko jest on odmienny od wcześniejszych mikroprocesorów 80x86 ze względu na nowatorskie rozwiązania architektoniczne, ale trudno jest zastrzec nazwę handlową, będącą tylko liczbą. Sprzedawany jest w wersji 60, 66, 90, 100 i 133 MHz (do końca 1995 roku) a wykonany jest w ulepszonej technologii CMOS (BiCMOS). Jest to bardzo dobry procesor z wbudowaną 16 KB pamięcią podręczną (8 KB dla danych i 8 KB dla programów) oraz wbudowanym koprocesorem arytmetycznym. Procesor w swojej najszybszej wersji zawiera około 3.3 miliona tranzystorów i jest bardzo wydajny zarówno w przetwarzaniu danych numerycznych (grafika, obliczenia) jak i ogólnych instrukcji programów sterujących. Błędy w dzieleniu wykazywane przez wczesną wersję tego procesora szybko usunięto a firma Intel zobowiązała się do wymiany wszystkich wadliwych układów. Jest zgodny z serią mikroprocesorów 80x86 co oznacza, że potrafi wykonywać kody programów napisanych na te procesory. Używa 32-bitowych instrukcji i 64-bitowej szyny danych. Wykonany jest w technologii 0.8 μm chociaż nowsze wersje tego procesora mają ścieżki o szerokości zaledwie 0.35 μm . Ponieważ w czasie jednego cyklu zegara procesor ten wykonuje dwie instrukcje nawet przy 66 MHz umożliwia to wykonanie ponad stu milionów instrukcji w ciągu sekundy (110 MIPS). Dla porównania procesor 80286 przy 12 MHz pracuje z szybkością 3 MIPS.

Konkurencją dla oryginalnych układów Intela są procesory K5 firmy AMD , mikroprocesory Next-Gen 586-P-100 (oznaczane również jako Nx586) i M1 firmy Cyrix. W przypadku Pentium wyprodukowanie procesorów równoważnych Intelowskim zajęło tym firmom znacznie dłużej niż w przypadku procesorów 486 gdyż są to własne projekty a nie proste kopie. Chociaż z ich zgodnością nie powinno zwykle być kłopotu współpraca z pewnymi układami graficznymi (układami Triton Intela) w przypadku procesorów M1 może nie być całkowicie poprawna. Cyrix twierdzi, że jego procesory szybciej wykonują 16-bitowe oprogramowanie napisane dla DOSu lub Windows 3.1 i starszych wersji. 100 MHz procesor M1 uzyskał w testach dla takiego oprogramowania lepsze wyniki niż Pentium 133 MHz.

Pentium OverDrive to procesory przeznaczone do wmontowania w komputery korzystające z wolniejszych układów i486. Technologicznie nie są to procesory w pełni zgodne z Pentium, gdyż takich nie można zamontować do podstawek procesorów i486 choćby ze względu na inną liczbę nóżek. Zwiększają one moc obliczeniową około 2.5 razy. Procesor Pentium Overdrive ma zamontowany mikrowentylator i układ regulacji temperatury zwalniający częstość jego pracy w przypadku przegrzania.

Procesory Overdrive cieszą się dużą popularnością, trzeba sobie jednak zdawać sprawę z tego, że zamontowanie takiego procesora to nie to samo co zakup nowego komputera. Wydajność systemu komputerowego zależy od wielu czynników i jeśli naprawdę potrzebujemy większej mocy obliczeniowej to Overdrive nie jest w pełni satysfakcjonującym rozwiązaniem.

Pentium Pro, znane pod nazwą roboczą P6, to następca Pentium Intela, zademonstrowany jesienią 1995 roku. Układ zawierający 5.5 mln tranzystorów ma o połowę większą wydajność od Pentium przy częstościach zegara zaczynających się od 133 MHz. Osiągnięto to dzięki nowej architekturze procesora, analizującej przepływ danych i przygotowującej zoptymalizowaną listę kolejności wykonywania instrukcji. Wstępne testy nie potwierdziły jednak dużej wydajności tego procesora w odniesieniu do programów działających w oparciu o 16-bitowy kod używany przez MS-Windows i Windows 95, ale dla oprogramowania 32-bitowego wydajność tych procesorów jest bardzo dobra. Intel przewiduje, że procesory PentiumPro wejdą do powszechnego użytku dopiero w 1997 roku (ich udział powinien wówczas stanowić około 25%, przy 70% udziale Pentium), kiedy większość programów na rynku będzie działać w trybie 32-bitowym. Ulepszona wersja powinna pojawić się w drugiej połowie 1996 roku i będzie oparta o technologię wytwarzania struktur 0.35 mikrometra. Będzie ona wyposażona w rozszerzenia multimedialne MMX (zostaną one również dodane do procesorów Pentium), pozwalające na obsługę dźwięku i wideo bez dodatkowych elementów scalonych. Przed końcem 1996 roku mogą się pojawić procesory Pentium Pro taktowane zegarem do 300 MHz!

P7 to robocza nazwa układów projektowanych przez Intel i firmę Hewlett-Packard. Architektura tych 64-bitowych mikroprocesorów ma być oparta na bardzo długich słowach instrukcji (VLIW, **V**ery **L**ong **I**nstruction **W**ord), wykorzystywanej przez HP w ich bardzo szybkich procesorach PA-RISC. Szczególny nacisk położono na dużą wydajność jednostki zmiennoprzecinkowej, decydującej o szybkości przetwarzania grafiki, animacji i dekompresji obrazów wideo oraz przetwarzania sygnałów cyfrowych. Zwiększono stopień równoległości operacji wykonywanych wewnątrz procesora. W latach 1997-98 procesory serii P7 stanowią podstawę na komputerów osobistych i serwerów działających w oparciu o obiektowo zorientowane systemy operacyjne.

Procesory Pentium budowane są również w wersjach niskonapięciowych (3.3V i 2.9 V zamiast 5.5 V), z wbudowanym zaawansowanym zarządzaniem poborem energii. Dzięki temu zamiast kilkunastu watów procesory te potrzebują 3-4 watów w czasie pracy i poniżej jednego wata w chwilach bezczynności. Potrafią również odciąć dopływ energii do pamięci podręcznej i urządzeń peryferyjnych. W odróżnieniu od typowych mikroprocesorów umieszczanych w plastikowej obudowie wersje przeznaczone dla komputerów przenośnych mają zaledwie jeden milimetr grubości i przykleja się je do płyty głównej oraz radiatora odprowadzającego ciepło. Takie opakowanie w cienki plastik określa się jako TCP (Tape Carrier Packaging).

80860 Intel jest bardzo szybkim mikroprocesorem do zastosowań numerycznych typu RISC, jednym z pierwszych opartych na 64-bitowej architekturze. Jego nowsze wersje, Intel **i860 XP**, pracują z częstościami 40-60 MHz i odpowiadają układowi z 2.55 mln tranzystorów.

80960 to popularny koprocesor wejścia/wyjścia zbudowany również w architekturze RISC firmy Intel. Używany jest między innymi w drukarkach laserowych. Intel jest największym producentem mikroprocesorów RISC na świecie.

Plany rozwoju mikroprocesorów Intela do 2000 roku przewidują 100-krotny wzrost szybkości w porównaniu z 1990 rokiem, tylko w oparciu sprawdzone technologie.

Motorola

Rodzina bardzo udanych mikroprocesorów Motoroli pod względem technicznym przez wiele lat wyprzedzała mikroprocesory firmy Intel, które musiały zachować zgodność z przestarzałymi rozwiązaniami przyjętymi w epoce 8 i 16 bitowych układów. Dominacja opartych na procesorach Intela komputerów IBM-PC na największym rynku komputerowym spowodowała jednak, że Intel jest firmą znacznie bogatszą niż konkurenci, a więc może sobie pozwolić na wydawanie miliardów dolarów na prace badawcze. Dzięki temu jego procesory w latach 90-tych należą już do najlepszych. Procesory Motoroli mają nadal silne poparcie wielu producentów komputerów.

68000 Motorola to jeden z pierwszych procesorów o częściowo 32-bitowej architekturze (rejstry) i 16-bitowej szynie danych. Może adresować bezpośrednio 16 MB pamięci, pracuje przy częstościach 8-25MHz, ma 61 instrukcji. Jeden z bardziej popularnych mikroprocesorów, stosowany w MacIntoshach, Amigach i Atari ST.

68008 to uproszczony układ Motoroli, o wewnętrznej architekturze 32-bitowej ale z 8-bitową szyną danych, tańszy ale wolniejszy od 68000.

68020 Motorola, to mikroprocesor zgodny z 68000, o 32-bitowej architekturze, jeden z pierwszych wyposażonych w pamięć notatnikową (cache) 256 bajtów. Jeden z popularniejszych mikroprocesorów, stosowany w MacIntoshach, Amigach i Atari ST.

68881 i **68882** to koprocesory arytmetyczne Motoroli do układu 68020.

68030, **68040** Motorola to ulepszone wersje 68020, pracujące z częstością do 40 MHz, nie ustępujące mocami obliczeniowymi układom Intela 386 i 486. Stosowane są w MacIntoshach, Amigach i serii komputerów Atari ST.

Firma IMS zamierza wypuścić w połowie 1993 roku mikroprocesor IMS 3250, który będzie emulował zarówno mikroprocesory Intel 486 jak i Motorola 68040 z ich naturalną szybkością. Dzięki temu można będzie na jednym systemie używać oprogramowania dla Macintoshy jak i IBM-PC. Być może wprowadzenie takiego mikroprocesora stanie się początkiem końca kłopotów z brakiem zgodności różnych systemów operacyjnych.

W odpowiedzi na plany Intelu Motorola zapowiedziała produkcję procesora 68060 (przeskakując jedną generację - nie będzie procesora oznaczonego 68050). Będzie to urządzenie równoważne układowi około 2 milionów tranzystorów, działające przy częstotliwości zegara 50 - 66 MHz i osiągające podobną wydajność obliczeniową jak Pentium. Również idee, na których oparto projekty tych konkurencyjnych mikroprocesorów są podobne - będą to procesory superskalarne, wykonujące równolegle kilka instrukcji w tym samym czasie. Motorola przewiduje jednak pozostawienie 32-bitowej szyny danych podczas gdy Intel przechodzi na 64-bitową szynę. Przyszłość rodziny mikroprocesorów 68000 nie rysuje się różowo, gdyż firmy takie jak Apple zamierzają przejść całkowicie na mikroprocesory rodziny PowerPC.

◆ Inne mikroprocesory

Wiele rodzin mikroprocesorów próbuje konkurować z rodziną Intelu na rynku procesorów do ogólnego zastosowania. Wymieniłem je tu w kolejności zależnej od ich popularności. Są to prawie wyłącznie procesory typu **RISC** (posługujące się niewielką liczbą bardzo szybko wykonywanych instrukcji).

Precision Architecture RISC, czyli PA-RISC firmy Hewlett-Packard to najbardziej popularny mikroprocesor RISC (w 1992 roku aż 31% rynku), stosowany między innymi w popularnych stacjach roboczych HP. Firmie HP nie udało się szybko opracować taniej i uproszczonej wersji swojego mikroprocesora, a więc by sprostać konkurencji umieściła w swoich tanich stacjach roboczych procesor PA-RISC 7100, przeznaczony dla droższych i bardziej wydajnych modeli stacji roboczych. Wersja 7100LC tego procesora ma wbudowaną możliwość kompresji i dekompresji obrazów telewizyjnych z szybkością do 30 klatek na sekundę, a więc w czasie rzeczywistym. Pozwala również wykonywać pewne transformacje obrazu bez specjalnych procesorów graficznych. Układ PA7300 LC równoważny jest ponad 9 milionom tranzystorów oferując funkcje multimedialne i pamięci cache o pojemności do 0.5-8 MB integralnie połączone z procesorem. Mikroprocesor PA8000, wprowadzony pod koniec 1995 roku, był pierwszym układem wykonującym instrukcje w niesekwencyjny sposób - procesor ten analizuje 56 nadchodzących instrukcji i wybiera z nich 4 dające się wykonać, dzięki czemu uzyskuje znaczny stopień współbieżności.

SPARC (Scalable Processor Architecture) i nowsze jego wersje takie jak SuperSPARC, SuperSPARC+, HyperSPARC, UltraSPARC i mikroSPARC (przeznaczony do komputerów przenośnych), to bardzo dobre mikroprocesory na których buduje się stacje robocze, w szczególności stacje firmy Sun i ich klony. Produkowane są przez wiele firm i działają z częstotliwościami do 50 MHz. Architektura mikroprocesorów SPARC zaprojektowana została z myślą o optymalizacji programów napisanych w językach wyższego rzędu (zwłaszcza w C), aby osiągnąć maksymalną sprawność równoległego wykonywania rozkazów. W 1992 roku procesory SPARC zajmowały 25% rynku mikroprocesorów RISC na świecie.

UltraSPARC to wprowadzona w listopadzie 1995 roku nowa generacja procesorów SPARC. Wyniki testów pokazały ich bardzo wysoką wydajność (w wersji 200 MHz sięgającą 505 punktów w teście SPECfp92 i 332 punkty SPECint92). Dodatkowo zadbano o bardzo szybkie operacje wejścia/wyjścia oraz dodano zestaw instrukcji wspomagający przetwarzanie obrazów (visual instruction set, VIS), trójwymiarową grafikę i dekompresję pełnoekranowych sekwencji wideo w standardzie MPEG-2 o telewizyjnej jakości. Procesory UltraSPARC mogą współpracować ze sobą w komputerach o architekturze SMP.

MikroSPARC, znany również jako **Tsunami**, wytwarzany jest przez Texas Instruments. Jego złożoność odpowiada około 850 tysięcy tranzystorów. Procesor ten znajduje szerokie zastosowanie w przenośnych komputerach pracujących pod kontrolą systemu operacyjnego Unix.

MIPS R4000 firmy MIPS Computer Systems jest pierwszym w pełni 64-bitowym procesorem, który miał stanowić podstawę inicjatywy stworzenia pewnego standardu uznanego przez wiele firm komputerowych. Projekt stworzenia takiego standardu niestety upadł, gdyż konkurencja na rynku mikroprocesorów jest zbyt silna. Ulepszona wersja tego procesora oznaczona jest symbolem **R4400** i może pracować z częstotliwościami rzędu 150 MHz. Firma MIPS dostarcza swoich mikroprocesorów przede wszystkim Silicon Graphics, producentowi stacji roboczych do zastosowań graficznych i serwerów sieci komputerowych, ale można oczekiwać pojawienia się ich w komputerach osobistych. W 1992 roku 20% mikroprocesorów RISC pochodziło firmy MIPS.

POWER Architecture (Performance Optimization With Enhanced RISC, czyli optymalizacja działania przy pomocy rozszerzonej architektury RISC), rodzina mikroprocesorów RISC firmy IBM, to bardzo udane układy stosowane w stacjach roboczych serii R6000. Procesory te zajmują obecnie około 12.5% całego rynku mikroprocesorów RISC a zgodnie z przewidywaniami ekspertów komputerowego rynku procent ten powinien znacznie wzrosnąć. Szczególnie wielkie nadzieje wiąże firma IBM z rodziną procesorów **PowerPC** (jest to wspólny projekt firm IBM, Apple Computers i Motorola) przeznaczonych do komputerów osobistych i systemów wieloprocesorowych. Reklamowane jako tanie i bardzo wydajne procesory, z których korzystać będą zarówno komputery Macintosh (System 7) jak i komputery osobiste działające pod kontrolą systemów operacyjnych Windows NT i innych systemów Microsofta, różnych wersji Unixa (AIX, Solaris), OS/2 i kilku innych systemów operacyjnych, procesory PowerPC wzbudziły ogromne zainteresowanie w 1993/94 roku. Pierwsze komputery firmy IBM (PowerStation) oraz Apple (PowerMac) zbudowane wokół procesora 601 pojawiły się na rynku wkrótce potem. Apple zamierza wyposażać wszystkie swoje komputery w mikroprocesory PowerPC rezygnując z przestarzałej już linii Motoroli 68000.

Większość oprogramowania napisanego dla innych procesorów (Intel, Motorola) i systemów operacyjnych (DOS, MS-Windows, System 7) działa na PowerPC dzięki

emulatorom programowym, np. SoftWindows emulującym środowisko MS-Windows. Do rodziny PowerPC należą zarówno procesory nadające się do małych urządzeń przenośnych (np. palmtopów) jak i superprocesory dla wydajnych stacji roboczych i komputerów wieloprocessorowych osiągających moce superkomputerów. IBM skracając nazwę tych procesorów do PPC a Motorola do MPC. Pod pewnymi względami architektura tych procesorów nie jest typowa dla techniki RISC, np. liczba rozkazów wewnętrznych wynosi ponad 200 i są wśród nich rozkazy dość złożone. Zastosowano typowe dla procesorów RISC przetwarzanie potokowe (pipelining), w którym po wykonaniu części rozkazu przemieszcza się on wraz z danymi w dół potoku (do innych części procesora) a na jego miejsce ładowany jest nowy rozkaz. Procesory PowerPC stosują wiele potoków, dlatego nazywa się je superskalarne. Można np. wysłać trzy niezależne rozkazy do jednostki stałopozycyjnej - działanie arytmetyczne na liczbach całkowitych, wykonywane przez IU (Integer Unit), zmiennopozycyjnej - działanie na liczbach zmiennopozycyjnych, wykonywane przez FPU (Floating Point Unit) i jednostki kontroli rozgałęzień programu (branching unit). Zwykle dodatkowe potoki przyspieszają wykonywanie instrukcji ale czasami na skutek konfliktów w dostępie do wspólnych zasobów konieczne jest zamrożenie działania lub cofnięcie potoku o kilka cykli zegara. Podobne rozwiązania superskalarne stosują również inne procesory, np. Pentium.

PowerPC 601, procesor 32-bitowy z 64-bitową szyną danych, zawierający 32 KB pamięci podręcznej, taktowany zegarem 50-100 MHz, wykonuje do 3 rozkazów w jednym cyklu. Zbudowany jest w wielowarstwowej technologii CMOS 0.6 mikrona i ma około 2.8 miliona tranzystorów na płycie 1.2 cm². Pojawił się we wrześniu 1993 roku.

PowerPC 603 pobiera przy 80 MHz zaledwie 3 waty, ma wbudowane funkcje minimalizacji pobierania energii i dlatego nadaje się do komputerów zasilanych bateryjnie. Jego wydajność i możliwości nie różnią się od wersji 601. Zbudowany w technologii 0.5 mikrona. Ulepszona wersja 603e (maj 1995) oferuje znacznie wyższe częstotliwości zegara (do 166 MHz) przy niezmiennym poborze energii.

PowerPC 604 z kwietnia 1995 roku jest bardziej złożonym mikroprocesorem, różniącym się architekturą i wydajnością obliczeń od swoich poprzedników. Działa z częstotliwościami zegara powyżej 100 MHz i pobiera 18 Watów.

PowerPC 620 to mikroprocesory 64-bitowe z szyną danych o szerokości 128 bitów i szyną adresową 40 bitów (bezpośrednie adresowania 1 TB pamięci RAM), przeznaczone szczególnie do systemów wieloprocessorowych, wykonujące do 6 instrukcji w jednym cyklu zegara. Nadają się doskonale do systemów wieloprocessorowych i do intensywnych obliczeń numerycznych.

Rodzina Power PC powinna się powiększyć w 1997 roku o model PC 630. Ceny tych procesorów, a co za tym idzie ceny opartych na nich komputerów, są wyraźnie wyższe od porównywalnych systemów komputerowych opartych na procesorach Intel'a (wynika to ze stosunkowo niewielkiej sprzedaży). Zainteresowanie komputerami osobistymi

działającymi w systemie Windows NT z tymi procesorami jest niewielkie, programy ze środowiska Windows działają na nich powoli w oparciu o emulatory. Jedynie w nielicznych zastosowaniach, w szczególności przy pracach graficznych, procesory Power PC wykazują istotnie większą wydajność niż Pentium Intela, w wielu innych zastosowaniach brakuje programów wykorzystujących w optymalny sposób ich możliwości.

MIPS R10000 został nazwany przez firmę MIPS „powtórnie wynalezionym mikroprocesorem”. Jest to 64-bitowy procesor o architekturze superskalarnej określanej jako ANDES (architektura z niesekwencyjnym, dynamicznym planowaniem wykonania instrukcji). Jest to istotnie duży postęp w dążeniu do wykonywania kilku instrukcji jednocześnie: procesor dopasowuje czekające w kolejce instrukcje do swoich pięciu jednostek CPU. Instrukcje po wykonaniu ustawiane są w pierwotnej kolejności. Zadbano również o komunikację między procesorami pracującymi równolegle nad tym samym zadaniem. Procesor R10000 sprawuje się doskonale nie tylko przy obliczeniach numerycznych ale i przetwarzaniu informacji z baz danych.

Alpha AXP 21064, to nowa rodzina mikroprocesorów firmy DEC. Pierwsze z nich pojawiły się w masowej sprzedaży na początku 1993 roku. Są to w pełni 64-bitowe mikroprocesory typu RISC pracujące przy bardzo wysokich częstościach zegara (początkowo 130-150 MHz, później nawet 250-300 MHz). DEC oferował stacje robocze oparte na mikroprocesorze Alpha 21064-AA (około 1.7 mln tranzystorów, niskie napięcie zasilania 3.3 V) już przy końcu 1992 roku twierdząc przy tym, że szybkość pracy Alphy przewyższa szybkość nowego procesora Pentium Intela ponad pięciokrotnie. Pojawienie się szybkich procesorów Pentium (133 i 150 MHz) znacznie zmniejszyło różnicę wydajności pomiędzy tymi procesorami. DEC twierdzi, że procesor ten będzie podstawą rozwoju na dalsze 25 lat zwiększając częstość do gigaherców i zwiększając liczbę wykonywanych w jednym cyklu zegara instrukcji. Procesory Alpha z końca 1995 roku zawierały już ponad 9 milionów tranzystorów. Alpha znajdzie zastosowanie w komputerach przenośnych jak też i w superkomputerach opartych na tysiącach tych mikroprocesorów.

AM29000 firmy Advanced Micro jest mikroprocesorem RISC stosowanym często w drukarkach laserowych (interpretery postscriptu).

Clipper, DSP 32, FRISC - to przykłady procesorów typu RISC, przeznaczonych głównie do zadań wymagających intensywnych obliczeń numerycznych.

T414, T800, T9000 Inmos - to słynne transputery (nazwa pochodzi od tranzystor+komputer, a więc komputer w jednym układzie, którym posłużyć się można tak, jak tranzystorem). T414 i T800 były nie tylko jednymi z pierwszych udanych 32-bitowych układów typu RISC, pozwalały też na bardzo szybką komunikację (20Mb/s przez 4 kanały równocześnie) dzięki czemu układy te stosuje się w komputerach wieloprocessorowych. T9000 jest wprowadzoną w 1991 roku nową wersją transputerów.

Jak widać z tego krótkiego przeglądu w ostatnich latach tempo rozwoju nowych mikroprocesorów znacznie wzrosło i nic nie zapowiada zmiany tej tendencji. Nowe, 64-bitowe mikroprocesory oferowane będą wkrótce w komputerach osobistych zwiększając wielokrotnie ich możliwości obliczeniowe.

W 1965 roku jeden z założycieli firmy Intel, Gordon Moore, wysunął hipotezę iż liczba tranzystorów w tej samej objętości obwodu scalonego będzie się podwajać co dwa lata. Hipoteza ta sprawdzała się doskonale w latach 1965-95. Jeśli będzie się sprawdzać nadal pod koniec wieku mikroprocesory zawierać będą równoważnik około 50-100 milionów tranzystorów i wykonywać 2 miliardy instrukcji w ciągu sekundy.

1.4 Krótką historia mikroprocesorów

Historia mikroprocesorów jest krótka, liczy sobie zaledwie 25 lat. Podamy tu tylko najważniejsze daty.

- 1971** wynalazek mikroprocesora: był nim Intel 4004, 4-bitowy układ skonstruowany przez Teda Hoffa. Szefem Intela był wówczas Robert Noyce (jeden z wynalazców obwodu scalonego). Mikroprocesor ten zawierał około 2000 tranzystorów i wykonywał 60000 operacji/sek.

- 1972** pojawił się mikroprocesor 8-bitowy, Intel 8008, wymagał do współpracy 20 dodatkowych układów, adresował 16 KB pamięci.

- 1973** zbudowano pierwszy komputer na mikroprocesorze 8008

- 1974** Intel 8080, mikroprocesor wymagający tylko 6 układów dodatkowych, adresujący 64 KB pamięci, i wykonujący 75 rozkazów. Zbudowano na nim pierwszy mikrokomputer, Mark 8.

- 1975** Altair 8800 był komputerem opartym o Intel 8080 przeznaczonym do składania dla hobbystów. Posiadał 256 bajtów pamięci i kosztował około 400\$. Pojawia się mikroprocesor Motorola 6800 (kosztujący około 180\$), i tani (25\$) mikroprocesor 6501 firmy MOS Technology, stosowany w pierwszym komputerze Apple i w mikrokomputerach Atari, Commodore VIC-20 i PET. Motorola oskarżyła MOS Tech o kradzież technologii i wstrzymano produkcję tego mikroprocesora. Powstają pierwsze 16-bitowe mikroprocesory Texas Instruments TMS 9900 (splajtowały bo nie było na nie oprogramowania).

Powstaje Microsoft.

- 1976** Firma Zilog sprzedaje mikroprocesor Z80, będący rozbudowaną (176 rozkazów) wersją Intela 8080, pracujący z częstotnością 4 MHz, bez układów wspomagających, i posługujący się dynamiczną pamięcią RAM.
Powstaje Apple Computers - komputery dla każdego.
- 1977** Udana komputery 8-bitowe: Apple II, Radio Shack TRS80, Commodore PET 2001, zbudowane na mikroprocesorze MOSTech 6502.
- 1978** Udany 16-bitowy procesor Intel 8086 (około 30000 tranzystorów), stanowiące proste rozwinięcie układu 8080. Pojawia się też bardzo złożony układ do obliczeń numerycznych, koprocesor Intel 8087.
- 1979** Powstaje Motorola 68000, bardzo dobry mikroprogramowany układ 16 bitowy, oraz Intel 8088, tania, uproszczona wersja mikroprocesora 8086. Sinclair ZX 80 jest pierwszym komputerem o cenie poniżej 200 \$, ma 1 KB pamięci (pisano na tym sprzęcie pierwsze gry komputerowe)!
- 1980** powstaje nazwa RISC; Intel ogłasza plany budowy 32-bitowego mikroprocesora; powstaje pierwszy komputer przenośny firmy Panasonic na procesorze 6502.
- 1981** pierwszy IBM PC, wyposażony w 64 KB pamięci. Dużą popularność zdobywa najtańszy komputer dla hobbystów, Sinclair ZX 81 na mikroprocesorze Z80A. Pierwszy krok w stronę 32 bitów: mikroprocesor National Semiconductor 16032, układ o mieszanej 16 i 32-bitowej architekturze.
- 1982** Bardzo udany 16-bitowy mikroprocesor Intel 80286, zawierający około 130 tysięcy tranzystorów. Popularność zdobywa Sinclair ZX Spectrum, zbudowany w oparciu o udoskonaloną wersję mikroprocesora Z80.
- 1983** IBM PC XT, Apple IIe, 84 Apple IIc, jest już 20000 programów na komputery firmy Apple, Macintosh z dobrym oprogramowaniem, PC Jr - pierwsza porażka IBM, pojawia się popularny Commodore 64.
- 1984** Pojawia się 32-bitowy procesor Motorola 68020; powstaje MIPS Computer System, jeden z najważniejszych obecnie producentów mikroprocesorów;

IBM PC AT, Amstrad CPC464 (ten i późniejsze modele zbudowane były w oparciu o mikroprocesor Z80A); Lisa 2 - nieudany komputer Apple na 68000, Sinclair QL - tani komputer na MC68000; Apple IIc

- 1985** Intel zapowiada 32-bitowy, 16 MHz mikroprocesor Intel 80386; Motorola pokazuje M68008;
pojawiają się komputery z rodziny Atari ST na mikroprocesorze MC68000 oraz komputery Commodore Amiga i Amstrad CPC6128
- 1986** Transputery T414 i T800 firmy Inmos (Anglia) - początek popularności RISC; pierwszy komputer 32-bitowy IBM PC RT na procesorze RISC IBM 801; MIPS Technologies anonsuje 32-bitowy, 8 MHz procesor MIPS 2000.
Silicon Graphics przechodzi na procesory RISC firmy MIPS Technologies
- 1987** udany mikroprocesor Motorola 68030 i mniej udany Z-280, czyli 16-bitowa wersja Z80; mikroprocesory SPARC firmy Sun;
nowe serie komputerów IBM PS/2, M30, M50 i M60 na procesorach Intela 8086, 80286 i 80386; Macintosh SE i Macintosh II na MC68020,
- 1988** Komputery Macintosh IIx na procesorach Motorola 68030; mikroprocesor 80386SX, Acorn Archimedes, PS2 M80
- 1989** mikroprocesor Intel 80486 (ok. 1 mln. tranzystorów), Intel 80860 (koprocessor numeryczny); Macintosh fx i stacje Hewletta-Packarda na Motoroli 68030; Next Computers; pierwsze stacje DECstation 3100 na procesorach MIPS R2000;
- 1990** Stacje IBM R6000 RISC, Sun Sparc 1, komputery na 80486 i 80860, Motorola anonsuje 68040 (25 MHz, wbudowany koprocessor numeryczny, ok. 1,2 mln tranzystorów); Transputery T-9000 do przetwarzania równoległego
- 1991** Stacje HP R700 RISC, komputery na 486/50MHz; popularność zdobywają notebooki, palmtopy, pojawiają się penbooki; stacje SPARCstation ELC i IPX;
Intel i860 XP, 40-60 MHz, 2.55 mln. tranzystorów; Intel 486SX oraz Intel 486 z zegarem 50 MHz; 64-bitowe mikroprocesory R4000 firmy MIPS stanowią podstawę planów działania grupy ACE (Advanced Computing Environment) opracowującej wspólne środowisko systemowe; pierwsze klony procesorów 386; mikroprocesory graficzne firmy S3.

- 1992** Intel wprowadza technologię podwajania wewnętrznych częstotliwości procesorów; komputery na 486DX2/66MHz; pojawiają się notebooki oparte na 80486 z dyskami 200MB, procesory 80386SL stają się coraz bardziej popularne; Macintoshe Quadra używają procesorów Motorola 68040; 64-bitowe mikroprocesory Alpha 21064 firmy DEC i R4400 firmy MIPS pracują z częstotliwościami 150 MHz; Sun wprowadza udane stacje robocze Sun Sparc 10.
- 1993** W połowie roku pojawia się nowy superskalarny procesor Intel Pentium (ok. 3.2 mln. tranzystorów), taktowany zegarem 60 MHz, o szybkości numerycznych obliczeń 5-10 razy większej od i486/33MHz; pojawia się również tańsza wersja Pentium oznaczona symbolem P24T. Firmy komputerowe rozpoczęły konstrukcję płyt systemowych pół roku przed pojawieniem się tego mikroprocesora; MIPS R4400 to 64-bitowy procesor działający z częstotliwościami 150 MHz.
- IBM wprowadza pierwsze procesory rodziny PowerPC (modele 601 i 603) będące wynikiem współpracy IBM i Motoroli. Jest to mikroprocesor oparty na architekturze superskalarnej. Chociaż jest on uproszczeniem procesora zastosowanego w stacjach roboczych IBM R6000 modelu 220 jest od tego procesora dwukrotnie szybszy i znacznie tańszy.
- 1994** Intel wprowadza procesory 486DX4 25/75 MHz i 33/100 MHz, zwiększa częstotliwości zegarów procesorów Pentium do 100 MHz i sprzedaje procesor P24T Pentium Overdrive; po sprzedaniu około 2 milionów procesorów Pentium wykryto w nich błąd w operacjach arytmetycznych;
- IBM i Motorola ogłaszają mikroprocesory PowerPC 601 oraz 604 z częstotliwością 100 MHz, prototyp PowerPC 620 działa z częstotliwością 133 MHz; Motorola demonstrowa procesor 68060 działający z częstotliwością 66 MHz;
- DEC sprzedaje 64-bitowe procesory RISC Alpha AXP 21064A z zegarem 275 i 300 MHz; Sun anonsuje rodzinę procesorów UltraSPARC i sprzedaje SparcStation 20 z procesorami HyperSparc 100 MHz; MIPS zapowiada procesor RISC R10000;
- pierwsze akceleratory kart graficznych firmy Number Nine oparte na 128-bitowych mikroprocesorach
- 1995** Mikroprocesory Pentium działają z zegarami 120, 133 MHz; nowe procesory Intel Pentium Pro 133-167 MHz z wbudowaną pamięcią podręczną 256-512 KB;
- PowerPC, modele 601 i 604 o częstotliwościach do 167 MHz dla komputerów osobistych firmy Apple i IBM; nowe procesory PowerPC 603e i 602 z zegarem 66 MHz; nowe procesory do stacji roboczych Sun UltraSparc 143 i 200 MHz;

DEC Alpha z częstotliwościami do 333 MHz; HP PA-8000 to bardzo wydajny, w pełni 64-bitowy superskalarny mikroprocesor do stacji roboczych Hewletta-Packarda, zawierający prawie 10 milionów tranzystorów; Microsoft wprowadza (z wielkim hukiem) system operacyjny Windows 95

1996 Pojawiają się bardzo wydajne stacje robocze Sun Ultra 1 i Ultra 2; mikroprocesory Pentium P55C

1.5 Koprocesory

Koprocesory są układami współpracującymi z mikroprocesorem, wyspecjalizowanymi w bardzo szybkim wykonywaniu pewnych funkcji. Najczęściej spotyka się koprocesory arytmetyczne (zwane też numerycznymi), pozwalające na przyspieszenie operacji na liczbach zmiennoprzecinkowych, czyli wydzielone FPU. Często spotykane są również koprocesory graficzne, przyspieszające tworzenie i manipulację obrazów. Spotyka się również koprocesory wejścia/wyjścia, przyspieszające dostęp do danych z urządzeń zewnętrznych.

Koprocesory arytmetyczne komunikują się z CPU najczęściej przez oddzielną szynę adresów (16-bitową) i szynę danych (32-bitową) równocześnie - nazywa się to techniką EMC (Extended Math-Coprocessor, czyli rozszerzone jednoczesne przetwarzanie matematyczne).

Typowe układy koprocesorów firmy Intel współpracujące z mikroprocesorami serii 80x86 mają symbole 80x87. Mikroprocesor Intela i860 typu RISC przeznaczony do obliczeń numerycznych sprzedawany jest na specjalnych kartach do komputerów osobistych jako koprocesor. Motorola, Transputer i inne firmy sprzedawały swoje mikroprocesory do obliczeń numerycznych na kartach jako koprocesory. Wadą takiego przyspieszania numerycznych obliczeń jest trudność w zgraniu działania koprocesora na karcie z działaniem pamięci, dysków i całej płyty głównej. Często wyniki testów wyglądają wspaniale a karta włożona w nasz komputer pracując na realnym problemie działa znacznie wolniej, niż się spodziewamy. Pojawienie się bardzo szybkich mikroprocesorów z wbudowanymi układami arytmetycznymi spowodowało znaczny spadek zapotrzebowania na koprocesory arytmetyczne. Znajdują one jeszcze zastosowanie tylko w niektórych zastosowaniach specjalistycznych, gdy buduje się eksperymentalne układy wieloprocessorowe.

Koprocesory graficzne dla odmiany nabierają coraz większego znaczenia. Opracowanie 64-bitowych układów scalonych Cirrus Logic GD, S3 Vision, S3 Trio, MGA Atlas, MGA Athena, Weitek Power i innych oraz 128-bitowego układu Imagine128 spowodowało

pojawienie się wielu koprocesorów graficznych. Ich ceny z pewnością znacznie spadną w najbliższych latach przyczyniając się do przejścia komputerów osobistych na znacznie wyższe standardy graficzne. Jednocześnie pojawiła się specyfikacja **DCI** (Display Control Interfaces firm Microsoft i Intel do tworzenia sterowników graficznych umożliwiających szybką dekompresję filmów zapisanych z wysoką rozdzielczością w formacie AVI i odtwarzanych w tempie 30 klatek na sekundę. Zastępuje ona starszą specyfikację GDI (Graphics Device Interface).

Przy końcu 1995 roku jedynie firma Number Nine oferowała 128-bitową kartę graficzną na układzie scalonym Imagine128. Karta wyposażona w 4 MB pamięci VRAM, przeznaczona dla magistrali PCI, oferuje rozdzielczość 1280×1024 przy 65 tysiącach kolorów i maksymalnej częstotliwości obrazu 74 Hz. Podobne parametry oferuje wiele kart 64-bitowych, przeznaczonych prawie wyłącznie dla magistrali PCI lub VLB. Spotykane zdolności rozdzielcze w popularnych kartach koprocesorów graficznych to: 800×600, 1152×864 lub 1280×1024 przy 16.7M kolorów z częstotliwościami obrazu do 90 Hz, oraz 1600×1200 lub 1600×1280 punktów przy podobnych częstotliwościach. Niektóre z nich (np. karty firmy Matrox) pozwalają na przełączanie rozdzielczości i innych parametrów bez konieczności restartowania komputera. Koprocesory graficzne realizują wiele funkcji dodatkowych, odciążając główny procesor systemu: tworzą wirtualne pole robocze (panning), powiększają obraz (zooming), przewijają zawartość ekranu (scrolling), cieniują powierzchnie i wypełnienia (dithering) oraz tworzą obrazy trójwymiarowych brył (rendering). Technika QDCP (Quality Dithering Color Process) pozwala na szybką symulację pełnego koloru w trybie 256 kolorów (8-bitowym) w dowolnej rozdzielczości, co jest bardzo wygodne podczas prac graficznych.

Dodatkową funkcją spełnianą przez droższe karty jest automatyczne wyłączenie i włączanie monitora zgodnie ze specyfikacją DPMS (VESA Display Power Management Signaling), ale niektóre monitory cyfrowe wyłączają się już same po określonym czasie braku zmian obrazu.

1.6 Architektury współczesnych komputerów

RISC, czyli **Reduced Instruction Set Computer** (komputer o zredukowanym zbiorze instrukcji), to nazwa najbardziej obecnie modnej architektury mikroprocesorów. Polega ona na wyposażeniu mikroprocesora tylko w te instrukcje, które są często wykorzystywane. Zredukowana liczba stosunkowo prostych instrukcji pozwala na ich bardzo szybkie wykonywanie. Starsza architektura, określana jako **CISC**, czyli **Complex Instruction Set Computer**, prowadzi do bardziej złożonej budowy i wolniejszego działania mikroprocesora. Już w 1991 roku liczba stacji roboczych opartych na procesorach RISC przekroczyła liczbę stacji z procesorami CISC, a w 1995 roku przewiduje się, że będzie ich aż 20-krotnie więcej!

CRIPS (C Rational Instruction Set Processor) to zupełnie nowa architektura mikroprocesora wykonującego bezpośrednio instrukcje języka wysokiego rzędu jakiego jest C, konstrukcja pozbawiona rejestrów pamięci, przechowująca wszystkie dane na stosie. Jedynym przykładem takiej konstrukcji jest *Hobbit* AT&T.

Wśród innych architektur jednoprocessorowych najczęściej stosowana jest architektura **superskalarna**, pozwalająca na wykonywanie kilku instrukcji w jednym cyklu zegara. Wiele nowych projektów mikroprocesorów opiera się na idei **VLIW** (**V**ery **L**ong **I**nstruction **W**ord, czyli bardzo długie słowo instrukcji). Architektura **wektorowa** lub **macierzowa** procesora jest nadal stosowana w superkomputerach przeznaczonych do obliczeń naukowych, pozwalając im wykonywać operacje numeryczne na całych wektorach lub macierzach. Typowa długość wektora, na którym można wykonać jednocześnie operacje wynosi 64. Procesor wektorowy musi mieć wiele jednostek numerycznych i wiele rejestrów co bardzo komplikuje jego konstrukcję.

Chociaż komputery jednoprocessorowe mają jeszcze ogromne możliwości rozwoju od końca lat 80-tych obserwuje się ogromne zainteresowanie komputerami współbieżnymi, zwanymi również komputerami równoległymi (parallel), oraz obliczeniami rozproszonymi (distributed), dokonywanymi na wielu komputerach połączonych przez lokalną sieć. Pojawienie się układów I/O działających w sieciach lokalnych z szybkością wewnętrznej magistrali pozwala realnie wykorzystywać grupy stacji roboczych jako jeden wieloprocessorowy komputer. Takie szybkie układy I/O produkowane są np. dla komputerów firmy Sun. Rozwijają się również architektury eksperymentalne, np. architektury systoliczne, procesory macierzowe działające w oparciu o system liczenia o podstawie opartej na liczbach pierwszych.

Notka historyczna: na początku lat 80-tych profesor MIT, Gerald Sussman, zachęcił grupkę studentów zajmujących się zagadnieniami sztucznej inteligencji do myślenia nad maszyną, która ma wiele procesorów jednocześnie pracujących i komunikujących się ze sobą. W 1983 roku kilku studentów i młodszych pracowników MIT pod przewodnictwem Daniela Hillsa założyło firmę **Thinking Machines** i rozpoczęli prace nad konstrukcją komputera pracującego w sposób równoległy w oparciu o bardzo wiele procesorów. Do grupy tej dołączył Richard Feynman, laureat nagrody Nobla z fizyki, wskazując na potencjalne możliwości zastosowań tego typu maszyny w zagadnieniach naukowych. Pierwszy model komputera równoległego, oznaczony symbolami CM 1, zawierał 65.536 prostych procesorów. Chociaż początkowo myślano o milionie procesorów ich liczba raczej uległa zmniejszeniu, za to moc każdego procesora zwiększeniu. CM 5 zawiera tylko 1024 węzły, ale każdy ma procesor SPARC i po cztery procesory RISC i860 oraz do 60 MB pamięci. Koszty budowy takich maszyn są niestety bardzo wysokie. Firma Thinking Machines zbankrutowała w 1994 roku ale podobne maszyny produkowane są przez Intela (Intel iPSC Hypercube, Intel Delta i inne maszyny), NCUBE i inne firmy.

Dwa podstawowe typy tych komputerów to **SIMD** (Single Instruction Multiple Data, czyli jedna instrukcja wiele danych) lub **MIMD** (Multiple Instruction Multiple Data, czyli wiele instrukcji, wiele danych). Chodzi o sposób przetwarzania danych przez procesory. Przy architekturze SIMD każdy procesor wykonuje te same instrukcje na innych danych, w architekturze MIMD każdy procesor pracuje nad innym fragmentem programu wykonując odmienne instrukcje. Głównym problemem jest oczywiście sposób programowania takich maszyn i właściwa synchronizacja zachodzących w nich procesów obliczeniowych. Niełatwo jest osiągnąć liniową zależność szybkości działania komputera współbieżnego od liczby jego procesorów. Wymaga to najczęściej opracowania specjalnych algorytmów.

Inny często stosowany podział komputerów współbieżnych odnosi się do sposobu wykorzystania pamięci. Jeśli jest jeden wspólny bank pamięci, z którego korzystają wszystkie procesory mówimy o komputerach typu **SMP** (**S**ymmetric **M**ultit**P**rocessing), a jeśli każdy procesor ma swoją własną, niezależną pamięć mówimy o komputerach **MPP** (**M**assively **P**arallel **P**rocessors). Mają one zwykle znacznie więcej procesorów niż komputery klasy SMP, są łatwiej skalowalne ale trudniej jest je zaprogramować.

Literatura

R. Goczyński, M. Truszczyński, Mikroprocesory 80286, 80386 i 80486 (Komputerowa Oficyna Wydawnicza Help, Warszawa 1991)

Bardzo fachowo napisana książka o mikroprocesorach firmy Intel

S. Kozielski, Z. Szczerbiński, Komputery równoległe. Architektura, elementy programowania. (Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993)

Książka omawia wiele architektur superkomputerów wektorowych, macierzowych, wieloprocessorowych i niekonwencjonalnych.