

Organizácia počítačových systémov

- Procesory
- Vnútoraná pamäť
- Vonkajšie pamäte
- Vstupné a výstupné zariadenia

Autor: Peter Tomcsányi

Niektoré práva vyhradené v zmysle licencie Creative Commons

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Použité obrázky z učebnice:

Andrew. S. Tanenbaum, Structured Computer Organization

<http://www.cs.vu.nl/~ast/books/>

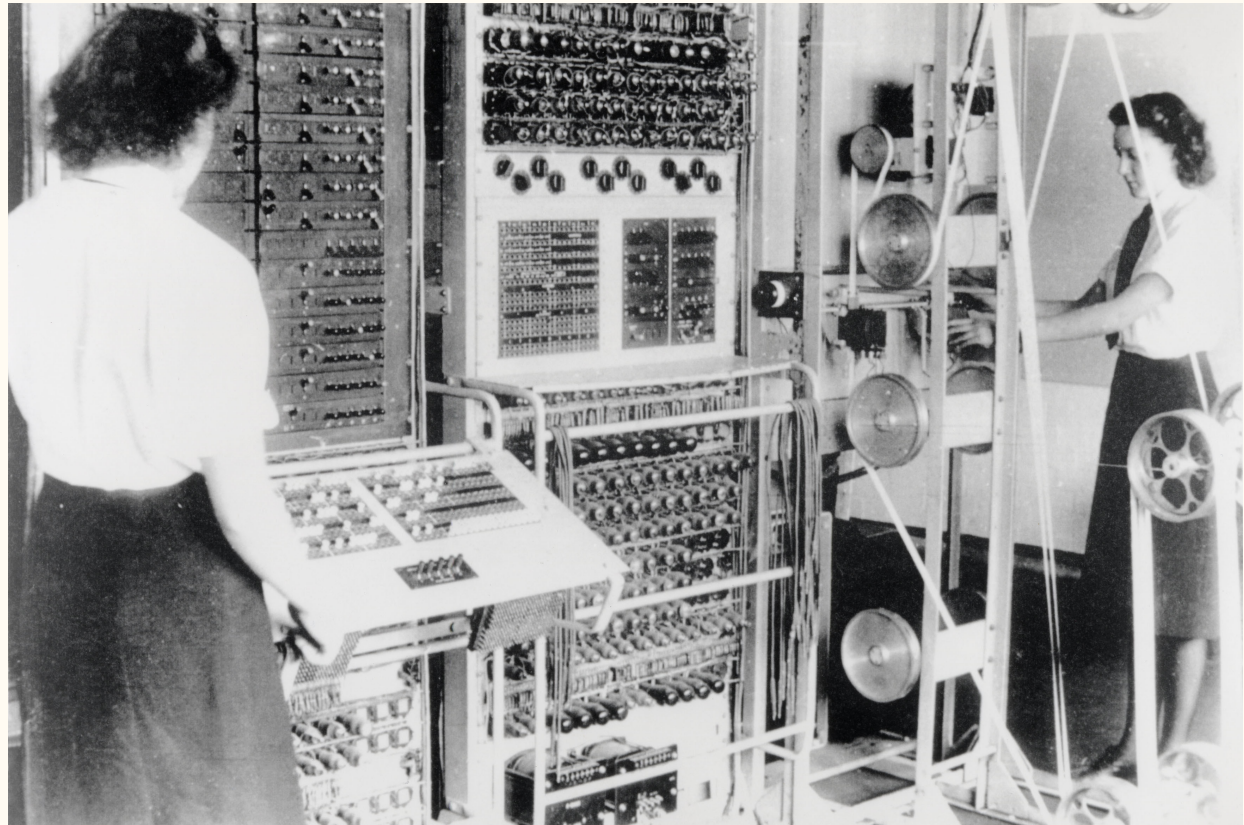
Počítač Von Neumannovského typu

(počítač s uloženým programom)

- **Počítač** má procesor (CPU), pamäť, vstupné a výstupné zariadenia
- **Pamäť** (adresovateľná pamäť) pozostáva z veľkého počtu (kedysi tisíce, dnes miliardy) malých jednotiek informácie. Malé jednotky sú binárne, majú niekoľko bitov (jedno „slovo“) sú očíslované číslami od 0 – **adresami**. Teda na jednej adrese je uložené jedno niekoľkobitové číslo.
- **Program je** reprezentovaný ako čísla (postupnosti bitov) a je uložený **v rovnakej pamäti ako dáta**.
- Teda niektoré čísla v pamäti sú dáta, iné čísla sú inštrukcie. Tie isté jednotky informácie môžu byť niekedy dátami a inokedy inštrukciami.
- Za prvý takýto počítač sa považuje EDVAC (navrhnutý v roku 1945, dokončený v 1949, pracoval do 1962), mal pamäť 1024 slov po 44 bitoch (5,5 kilobajtu).

Aký iný (by) mohol byť počítač?

- Dnes si to vieme ťažko predstaviť, ale prvé elektronické počítače neboli Von Neumannovského typu
- Napríklad Colossus a ENIAC programovali pomocou prepínačov (trochu ako práčka) a spojovacích káblov.
- Iné počítače mali oddelené pamäte pre program a inštrukcie - Harwardská architektúra.

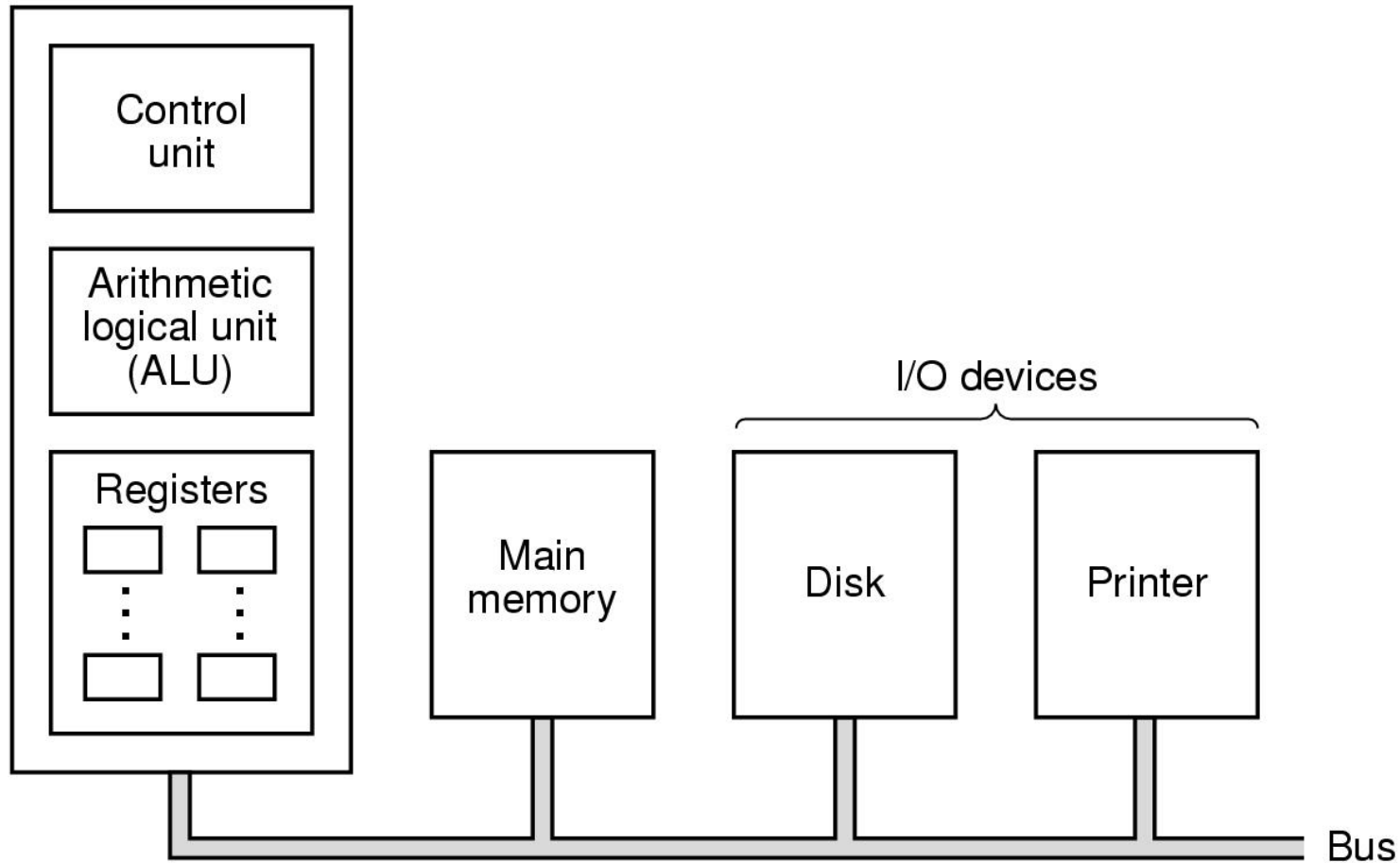


Počítač Colossus

zdroj: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colossus.jpg>
Pomáhal Britom počas Druhej svetovej vojny dešifrovať správy kódované nemeckými šifrovacími strojmi Enigma. Bol zrejme prvým elektronickým počítačom, bol však až do polovice 70. rokov utajený, preto sa dlho za prvý elektronický počítač považoval americký **ENIAC**.

Schéma počítača s jednou zbernicou

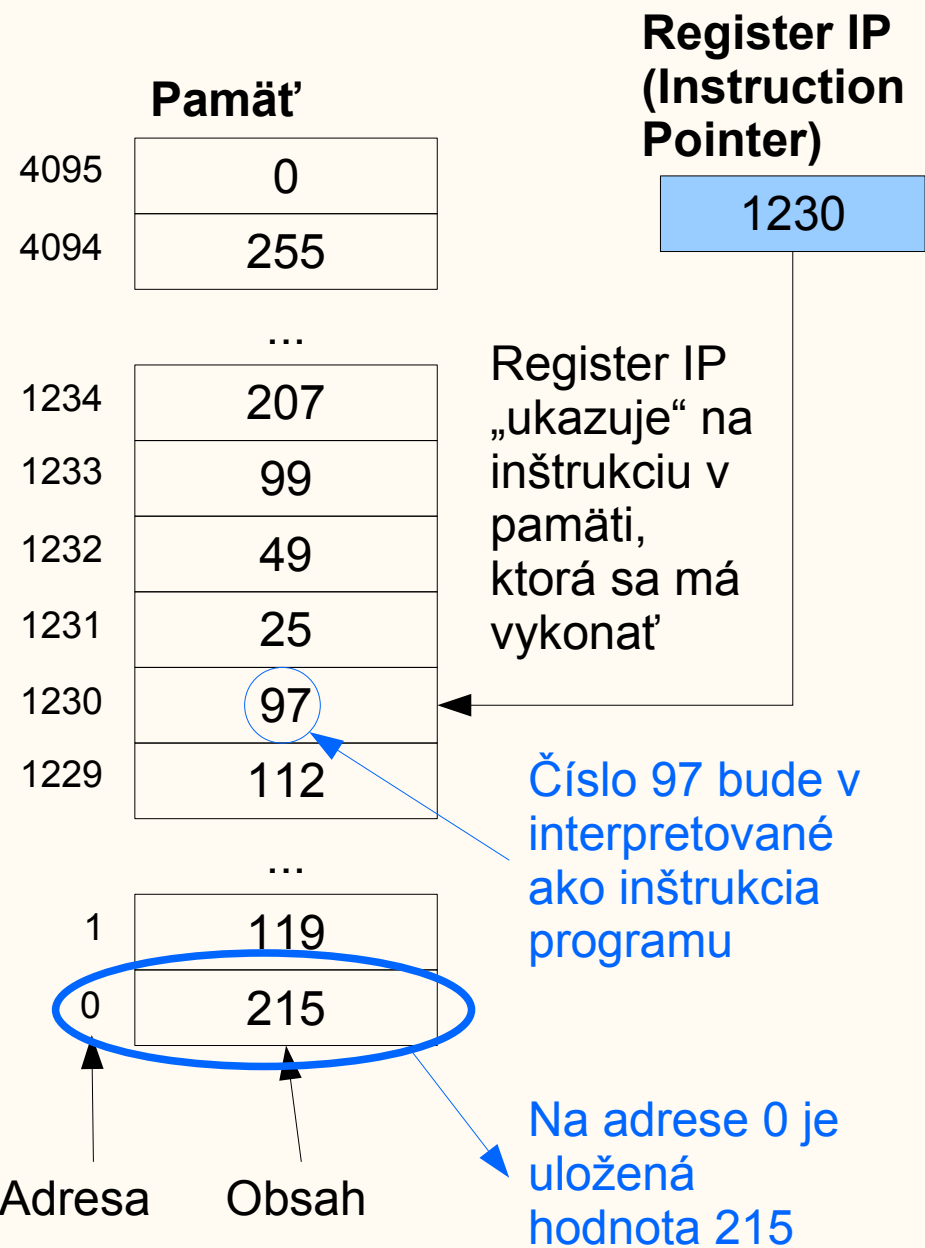
Central processing unit (CPU)



Počítač s jednou zbernicou (ISA, EISA, PCI, PCI-Express, ...)

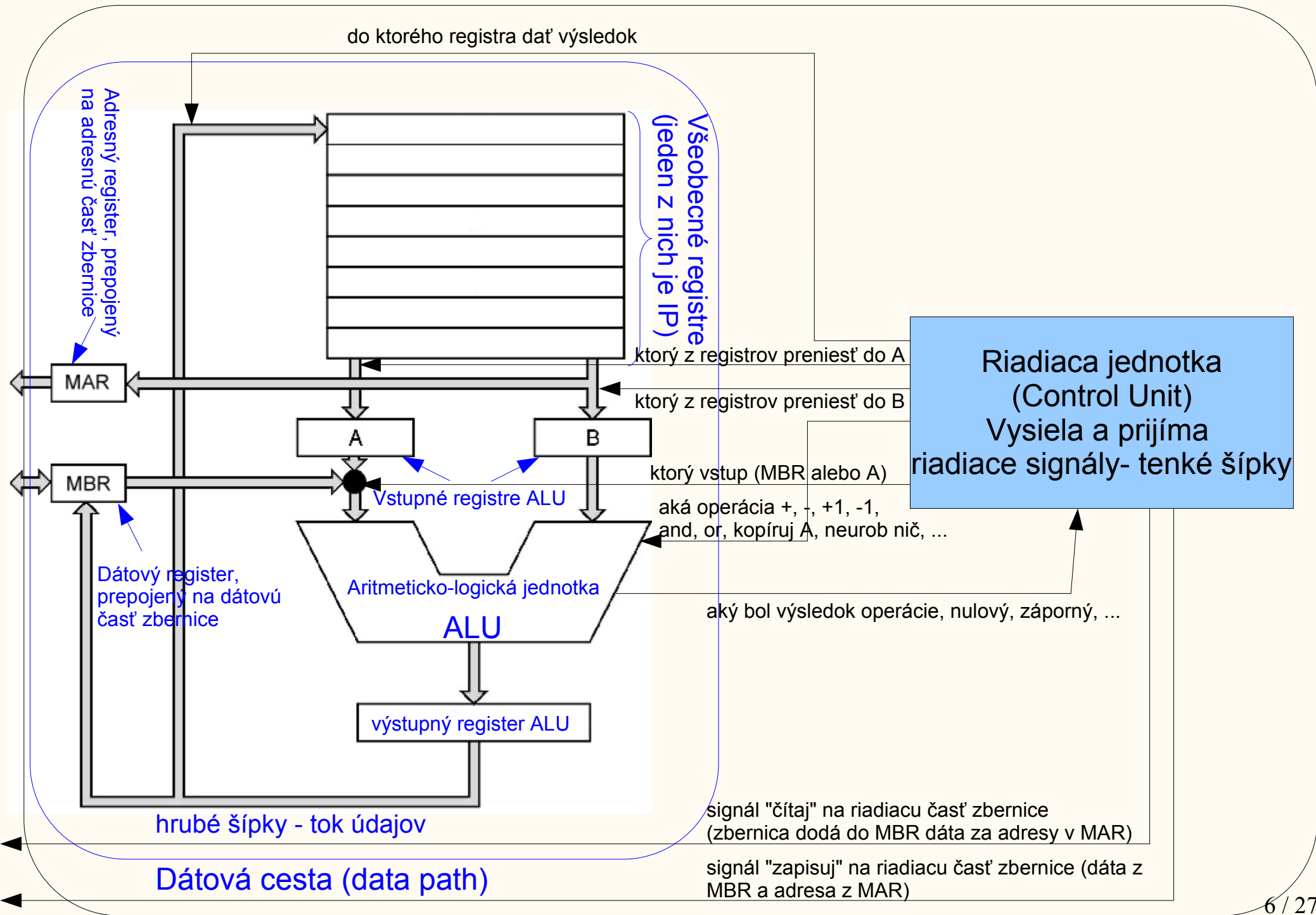
- Procesor
- Pamäť
- Niekoľko vstupných a výstupných zariadení (I/O devices)

Vykonávanie inštrukcií riadiacou jednotkou

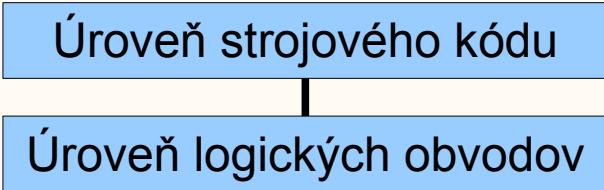
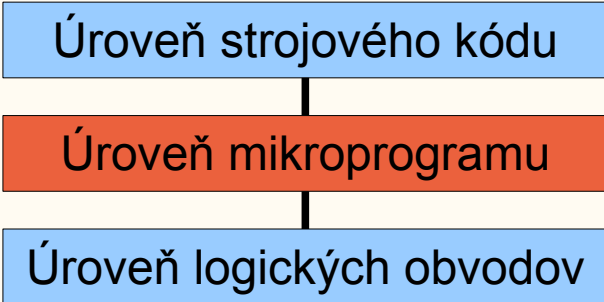


1. Vyber inštrukciu z pamäti z miesta kam ukazuje register IP
2. Zmeň register IP tak aby ukazoval na ďalšiu inštrukciu
3. Zisti druh inštrukcie
4. Ak inštrukcia potrebuje operand z pamäti, tak zisti jeho adresu
5. Vyber operand z pamäti
6. Vykonaj inštrukciu
7. Ak inštrukcia ukladá výsledok do pamäti, tak ho ulož do pamäti
8. Pokračuj znova krokom 1.

Processor



Mikroprogramovanie, CISC versus RISC

- Prvé počítače mali strojový kód implementovaný pomocou logických obvodov (hardvéru)
- V 60. rokoch 20. storočia sa ujal spôsob implementácie, kde je hardware jednoduchší a strojový kód je implementovaný softwarovo pomocou mikroprogramu. Hardware vykonáva mikroinštrukcie a v jazyku mikroinštrukcií je naprogramovaný interpretér strojového kódu.
- V 70. rokoch sa tento prístup rozšíril a umožnil vyvinúť procesory s rozsiahlym súborom inštrukcií (stovky druhov inštrukcií). Takéto procesory (a na nich založené počítače) označujeme skratkou **CISC** (**C**omplex **I**nstruction **S**et **C**omputer).
- V 80. rokoch 20. storočia sa objavila myšlienka, že návrat k menšiemu počtu inštrukcií priamo vykonávaných hardwarom umožní urýchliť procesory. Nazývame ich RISC (**R**educed **I**nstruction **S**et **C**omputer).
- Súčasné procesory často kombinujú prístupy CISC a RISC - menší počet rýchlych jednoduchých hardwarovo vykonávaných inštrukcií a ďalšie zložitejšie inštrukcie vykonávané mikroprogramom.

Urýchľovanie počítačov

A. Zrýchlime hodiny

Zvyšovať rýchlosť procesorov zvýšením frekvencie hodín je už nemožné

Limit je rýchlosť šírenia elektrického signálu, teda rýchlosť svetla.

Pri frekvencii 1GHz je čas jedného taktu 1ns.

Elektrický signál prejde vo vákuu za 1ns dráhu 30cm, v kremíku asi 20cm. Pri 10GHz je to len 2cm. To už môže byť menej, než je dĺžka spoja medzi časťami procesora.

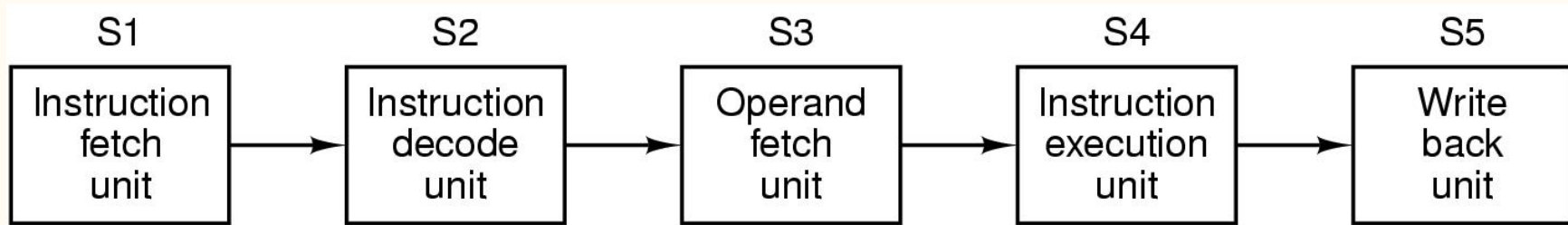
B. Paralelizmus vo vnútri procesora

- Pipelining
- Dvojité pipelining
- Superskalárna architektúra

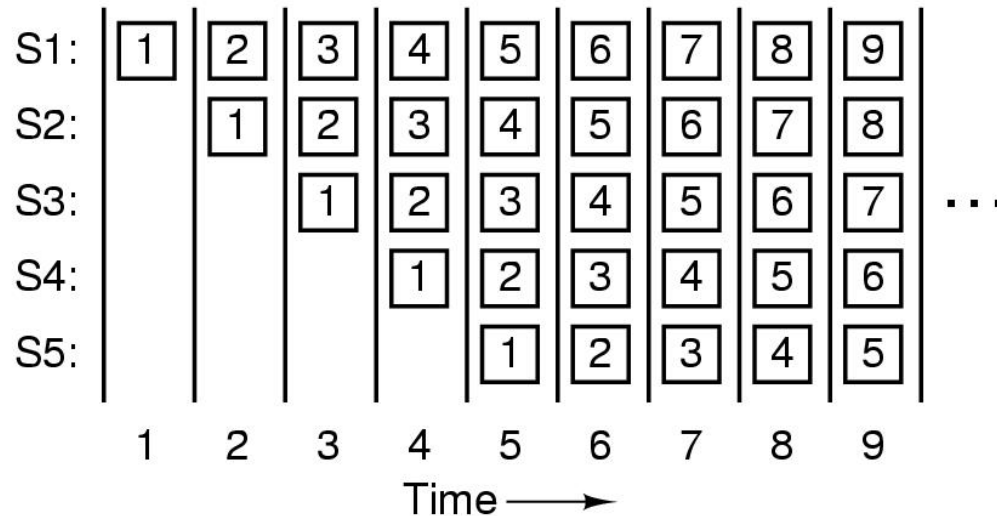
C. Paralelizmus mimo procesora

- SIMD, polia procesorov
- Multiprocessorové systémy
- Multipočítačové systémy, clustre počítačov

Pipelining (prúdové spracovanie)



(a)

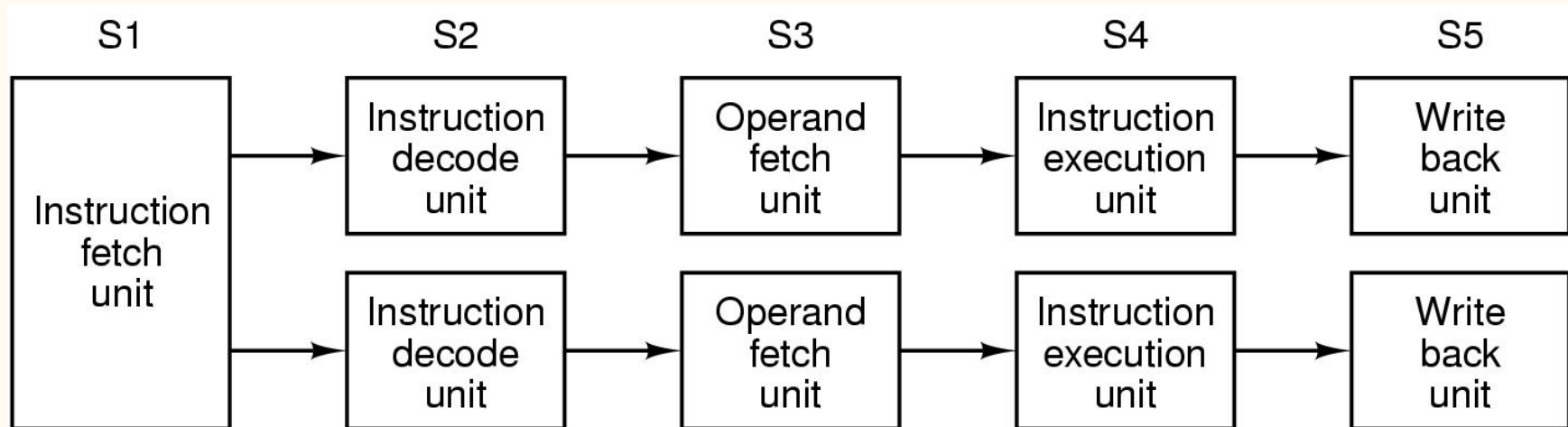


(b)

Problémom pipeliningu sú *podmienené skoky* v programe. **Skok** je strojová inštrukcia, ktorá zmení register IP, teda spôsobí, že ako ďalšia sa nevykoná inštrukcia na nasledujúcej adrese, ale nejaká iná. **Podmienený skok** je skok, ktorý zmení IP len keď je splnená nejaká podmienka.

Preto procesory implementujú **algoritmy predpovedania (predvídania) skokov** (branch prediction).

Dvojitý Pipelining



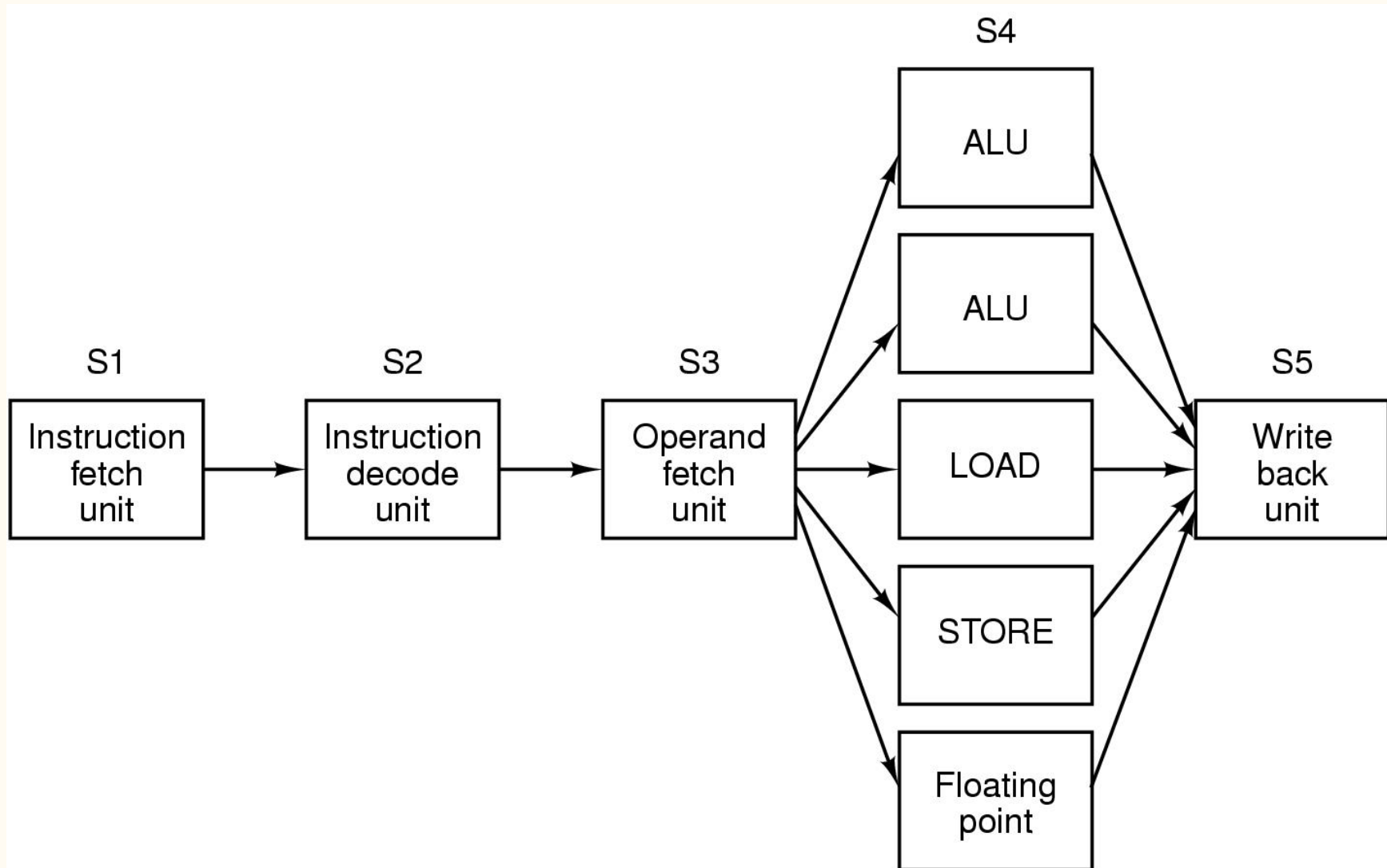
Základná myšlienka je jednu inštrukciu "poslať" do jedného pipeline a nasledujúcu paralelne do druhého.

Zásadným problémom je **dátová závislosť**, keď inštrukcia na svoje vykonanie potrebuje dáta vypočítané bezprostredne predošlou inštrukciou. Také dve inštrukcie nemožno vykonať paralelne.

Problém možno čiastočne riešiť v procesore vykonávaním inštrukcií mimo poradia (v inom poradí než nasledujú v programe) alebo môže programátor (resp. prekladač vyššieho jazyka) napísať program tak, aby minimalizoval dátovú závislosť medzi dvomi po sebe idúcimi inštrukciami.

"Rozpojením" dvojitého pipeline (a zdvojnásobením počtu registrov) vznikne procesor, ktorý vie vykonávať naraz dva spracovať naraz dva nezávislé programy (Intel to nazýva **hyperthreading**).

Superskalárna architektúra

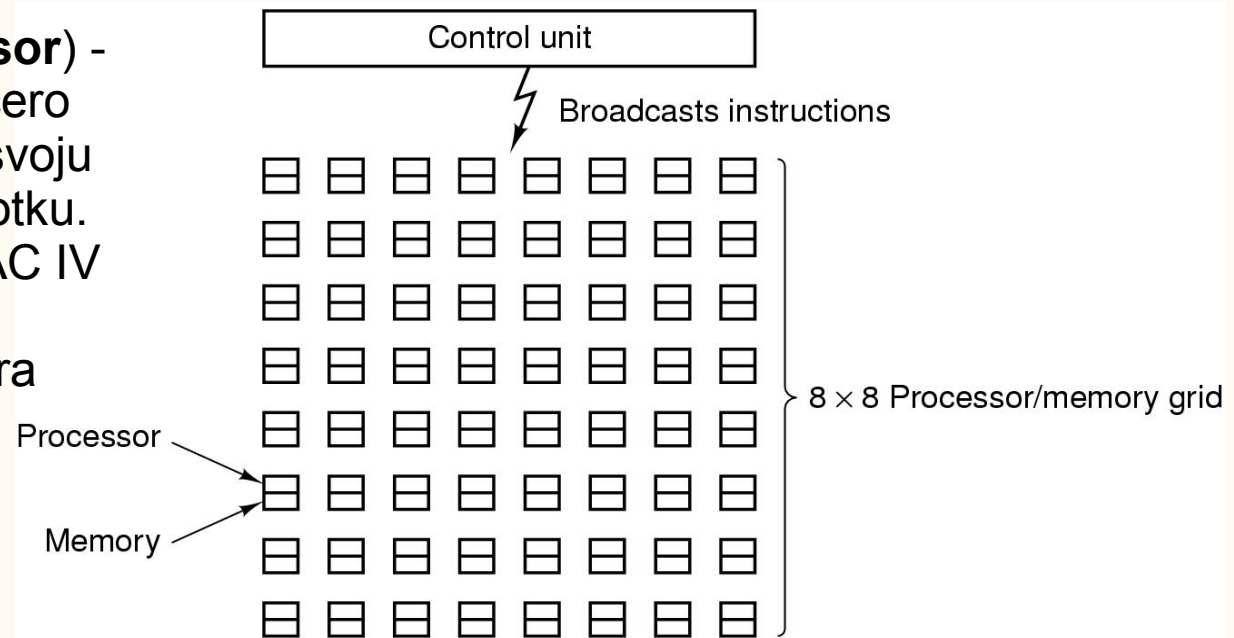


SIMD - Single Instruction, Multiple Data

- **Pole procesorov (array processor)** -

Jedna riadiaca jednotka riadi viacero procesorov, z ktorých každý má svoju pamäť a aritmeticko-logickú jednotku. Prvýkrát použité na počítači ILLIAC IV (1972).

V súčasnosti sa takáto architektúra nepoužíva v mainstreamových procesoroch.



- **Vektorový procesor (vector processor)** - procesor má len jednu aritmeticko-logickú jednotku, ktorá dokáže naraz spracovať (napríklad sčítať) dve k-tice čísiel z **vektorových registrov**. Prvýkrát použité na počítači Cray-1 (1974), stále sa produkujú ich nasledovníci.

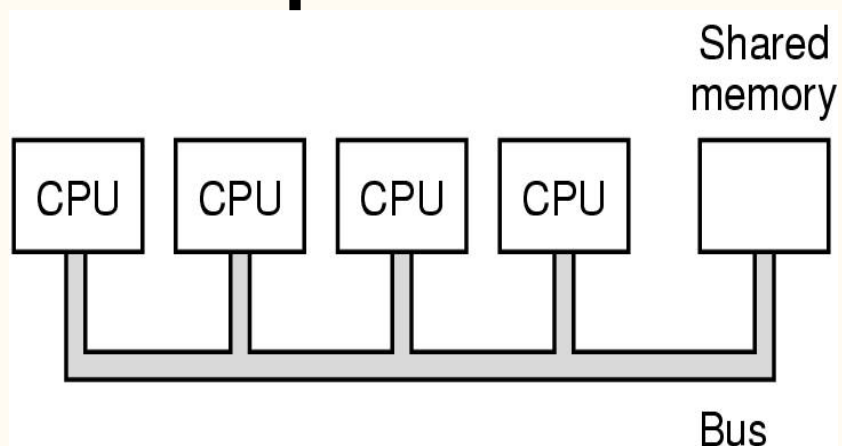
- Myšlienka SIMD sa uplatňuje aj v procesoroch **Intel Pentium - Streaming SIMD Extensions (SSE, SSE2, SSE3, SSSE3 a SSE4)**. FPU (aritmeticko-logická jednotka pôvodne určená na operácie s reálnymi číslami môže interpretovať svoj M-bitový vstup buď ako jedno číslo, alebo ako niekoľko N-bitových ($M=k*N$) čísiel a dokáže naraz urobiť operáciu medzi dvomi takými operandmi.

ARM NEON je implementácia rovnakej základnej myšlienky v procesoroch ARM.

Multiprocessorové počítače

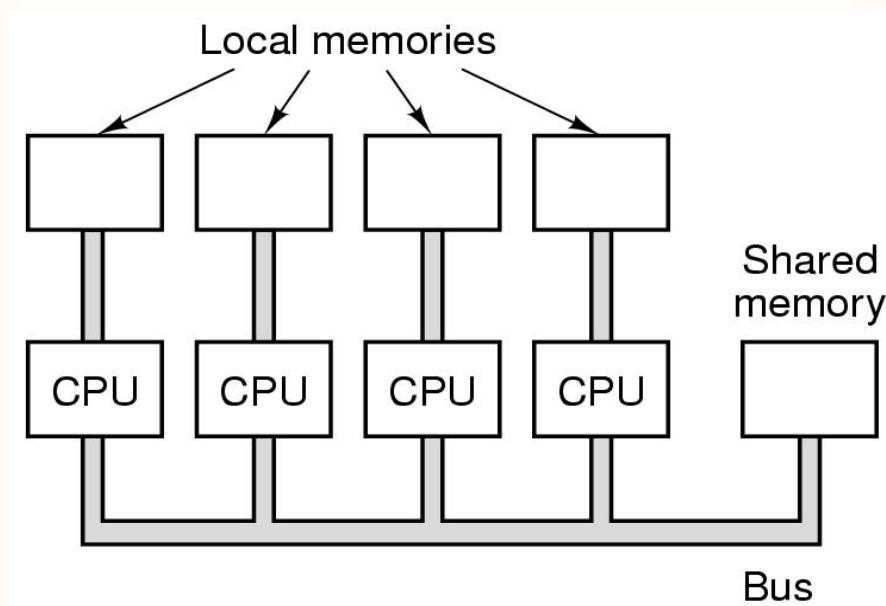
Viacprocesorový počítač s jednou spoločnou pamäťou

Prístupy k zdieľanej pamäti môžu spomaľovať prácu celého počítača



Viacprocesorový počítač s lokálnou pamäťou pre každý procesor.

Môže byť rýchlejší. Má aj spoločnú zdieľanú pamäť.



Viacjadrový procesor môžeme z pohľadu programátora považovať za viacprocesorový počítač, ktorý má všetky procesory integrované v jednom čipe.

Hlavná (vnútorná) pamäť (RAM)

Je to vlastne pole dĺžky 2^M pozostávajúce z S-bitových hodnôt - „slov“.

V súčasnosti je väčšinou $S=8$, teda pamäť sa adresuje po bajtoch bez ohľadu na to, koľkubitový je procesor. Ale v minulosti to boli aj iné čísla, napr 24, 32 alebo 48.

N-bitový procesor, **dve možné definície:**

- Má N-bitovú dátovú zbernicu (vie preniesť N-bitov z/do pamäti v jednom cykle)
- Má N-bitové všeobecné registre a aritmeticko-logickú jednotku (vie vo svojom vnútri pracovať s N-bitovými hodnotami)

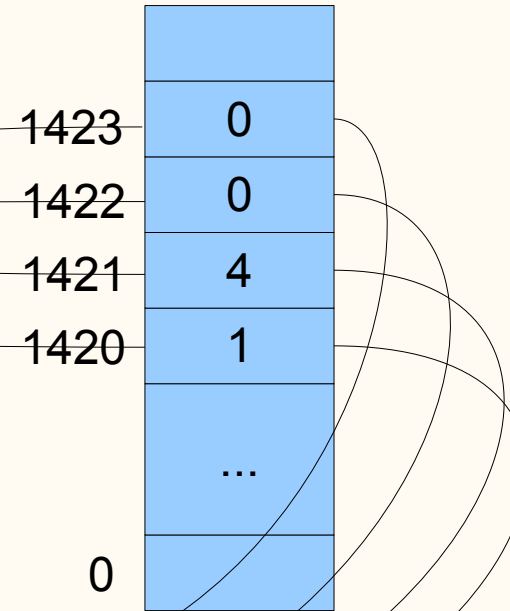
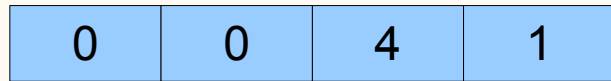
Často je to to bolo isté, ale nemusí to tak byť vždy.

Poradie bajtov v pamäti

32-bitový register

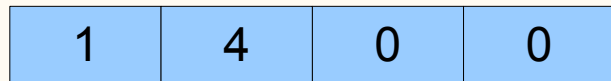
Pamäť adresovaná po bajtoch

Little endian



Prenes 4 bajty z adresy 1420 do registra

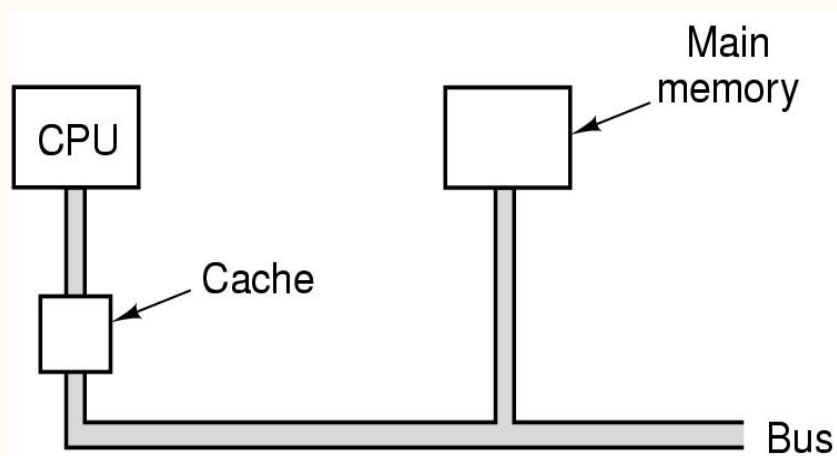
Big endian



Názvy Little endian a Big endian boli použité prvýkrát v diele Johnatana Swifta Guliverove cesty (1726), pre počítače sa tieto názvy ujali vďaka článku Dannyho Cohena [On Holy Wars and a Plea for Peace](#) (1980)

Cache pamäť

- Je rýchlejšia ale menšia než vnútorná pamäť, ale drahšia a menšia
- Uchováva najčastejšie používané časti vnútornej pamäte
- Využíva sa **princíp lokality** - v istom časovom intervale program používa len obmedzenú časť svojej pamäte.
- Cache býva rozdelená na bloky (**cache lines**). Bloky sa vždy čítajú celé. Napr. ak je blok 64 bajtov a program číta z adresy 260, tak sa prečíta časť pamäti od adresy 256 po adresu 319.
- Viac cache pamätí, napr. L1 na čipe procesora, L2 mimo čipu, ale zapuzdrená s procesorom, L3 na doske.
- Oddelená L1 cache pre inštrukcie a dáta podporuje pipelining - možno zároveň pristupovať k inštrukcii aj k dátam.



priemerný čas prístupu = $c + (1-h) \cdot m$

c - čas prístupu do cache

m - čas prístupu do pamäte

h - hit ratio - číslo medzi 0 a 1

Hierarchia druhov pamätí

RAM,
funguje len
kým je
napájaná

Menšia kapacita,
vyššia rýchlosť,
vyššia cena

Registre

Cache

Vnútoraná pamäť

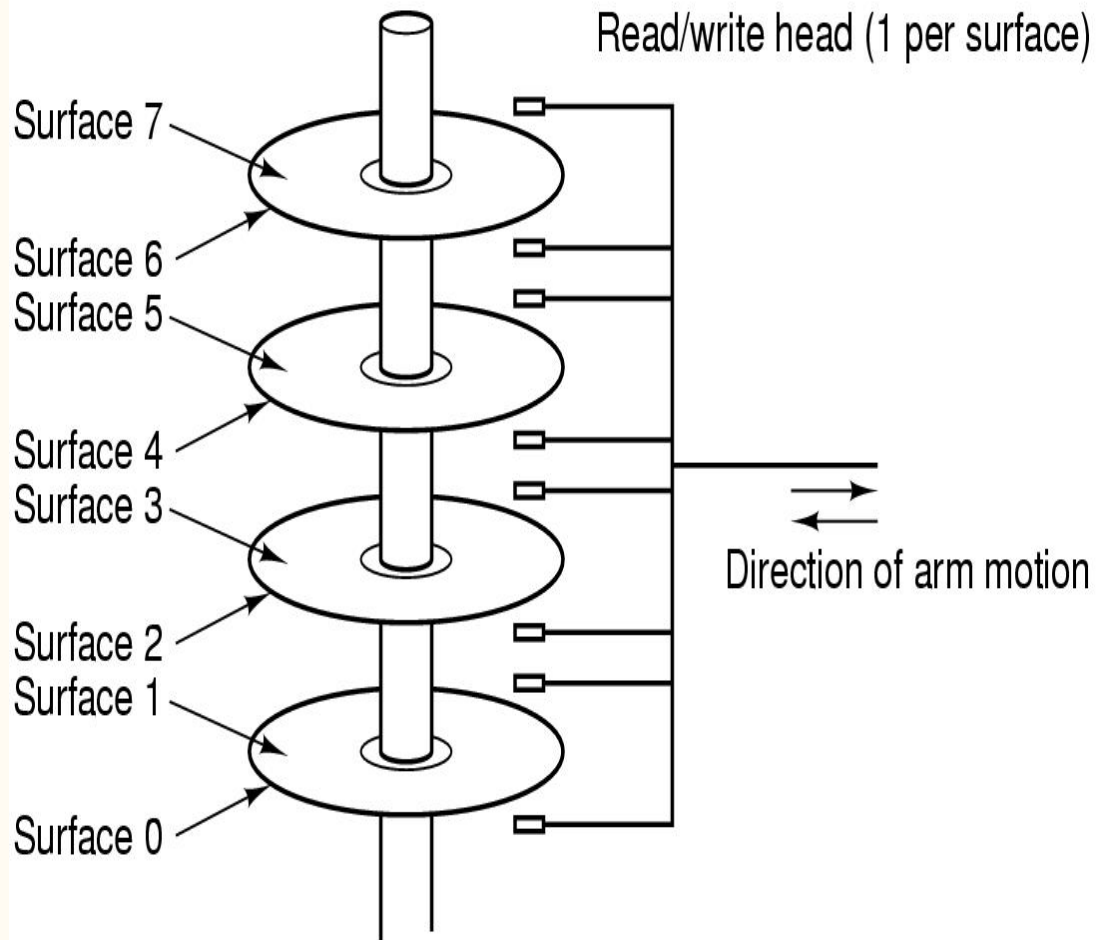
Vonkajšia pamäť - disk(SSD,
magnetický)

Veľkokapacitné archivačné médiá
(optické, páskové)

Väčšia kapacita,
nižšia rýchlosť,
nižšia cena

Trvalé
uloženie
(súbory)

Vonkajšia pamäť - magnetický disk



Je vstupno výstupné zariadenie určené na zápis väčšieho množstva údajov.

Skladá sa z rotujúcich platní na ktoré sa zapisuje informácia zmagnetizovaním malej plôšky v jednom alebo druhom smere pomocou pohyblivej hlavy.

Zmagnetizované miesta sú usporiadané do povrchov, kruhových stôp a sektorov (typicky 256 bajtov).

SSD - polovodičový disk

- Je to polovodičová pamäť, ktorá svojou funkciou nahrádza magnetický disk. Je oveľa rýchlejšia a energeticky úspornejšia, ale aj drahšia.
- Z hľadiska umiestnenia na zbernici je to rovnako, ako magnetický disk, vstupno výstupné zariadenie
- Ale v mobilných zariadeniach sa nazýva vnútorná pamäť a vonkajšou sa nazýva polovodičová pamäť v tvare kartičky (micro-sd).

RAID

Redundant Array of Inexpensive Disks

- Využiť paralelizmus v práci viacerých diskov na urýchlenie práce (podobne ako u procesorov)
- Využiť rozdelenie údajov na viac diskov na zvýšenie spoľahlivosti
- V niektorých prípadoch sa dajú dosiahnuť oba ciele naraz
- Článok Patterson et al., 1988
- O opakom je SLED - Single Large Expensive Disk
- V súčasnosti sa namiesto Inexpensive číta Independent

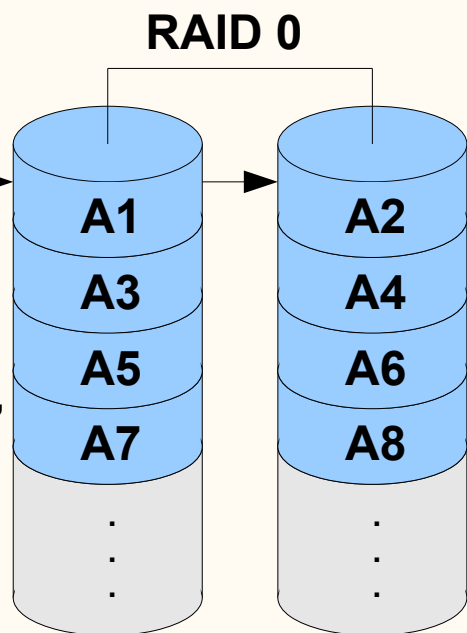
RAID

Redundant Array of Inexpensive Disks

- Využiť paralelizmus v práci viacerých diskov na urýchlenie práce (podobne ako u procesorov)
- Využiť rozdelenie údajov na viac diskov na zvýšenie spoľahlivosti
- V niektorých prípadoch sa dajú dosiahnuť oba ciele naraz
- Článok Patterson et al., 1988
- Opakom je SLED - Single Large Expensive Disk
- V súčasnosti sa namiesto Inexpensive číta Independent

Stripe = jedno "poschodie"

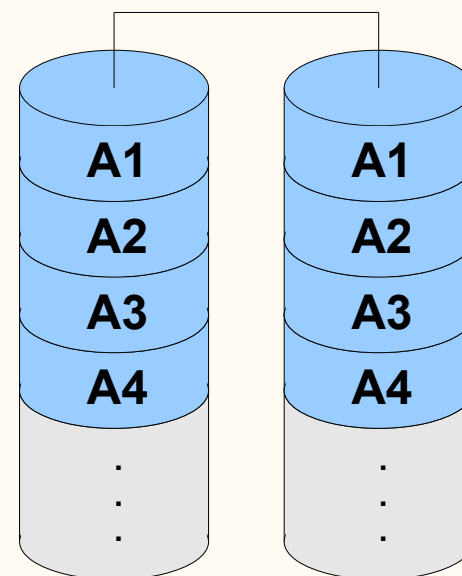
A1 a A2
tvoria jeden
stripe,
A3 a A4 druhý,
...



n = počet diskov v poli

dáta sú rozdelené na **bloky** (stripe units) jednotnej veľkosti (desiatky až stovky KB)

RAID 1

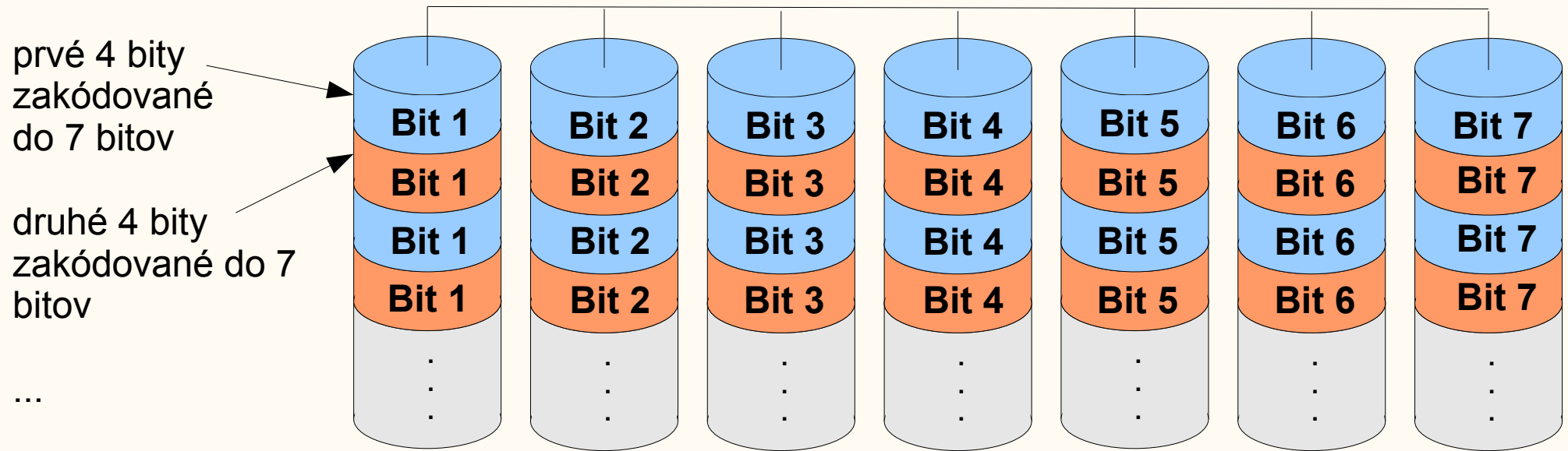


RAID 0 a RAID 1 potrebuje aspoň 2 disky (teda $n \geq 2$)

- **Striping** - bloky dát sa rozložia postupne na niekoľko (2 alebo viac) diskov.
- Kapacita poľa je n -násobok kapacity najmenšieho disku
- Zrýchli sa rýchlosť čítania aj zápisu veľkých súborov (až n -násobne).
- Spôľahlivosť sa ale zníži lebo porucha jedného disku znamená poruchu celého poľa.

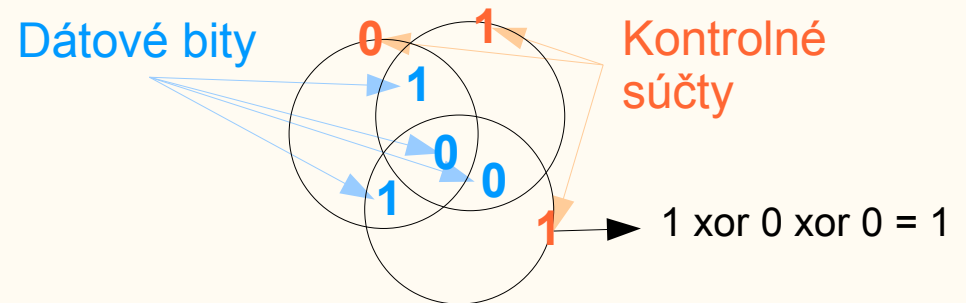
- **Mirroring** - každý blok dát sa zapíše na každý disk (teda každý blok má n kópií).
- Kapacita poľa sa rovná kapacite najmenšieho použitého disku.
- Zvýši sa spoľahlivosť - môže vypadnúť až $n-1$ diskov a pole zostáva funkčné.
- Rýchlosť čítania sa môže pri dobrej implementácii zvýšiť až n -násobne.
- Rýchlosť zápisu je mierne nižšia než rýchlosť zápisu jedného disku

RAID 2

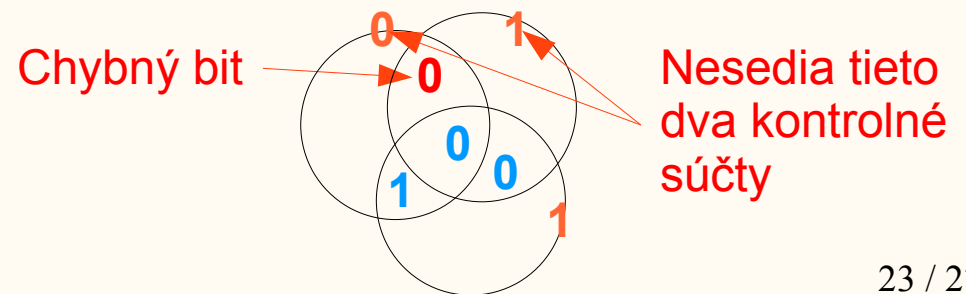


- Dáta sa ukladajú po skupinách bitov (napr. po 4 bitoch).
- Používa sa Hammingov kód, ktorý dokáže opraviť chyby, napríklad ak 4 bity zakódujeme do 7 bitov s pridaním troch **paritných bitov (kontrolných súčtov modulo 2 resp. xor)**, tak dokážeme opraviť jednu chybu.
- V praxi sa nepoužíva lebo pre efektívny zápis musia byť otáčky diskov synchronizované

Príklad Hammingovho kódu



Príklad opravy jednej chyby

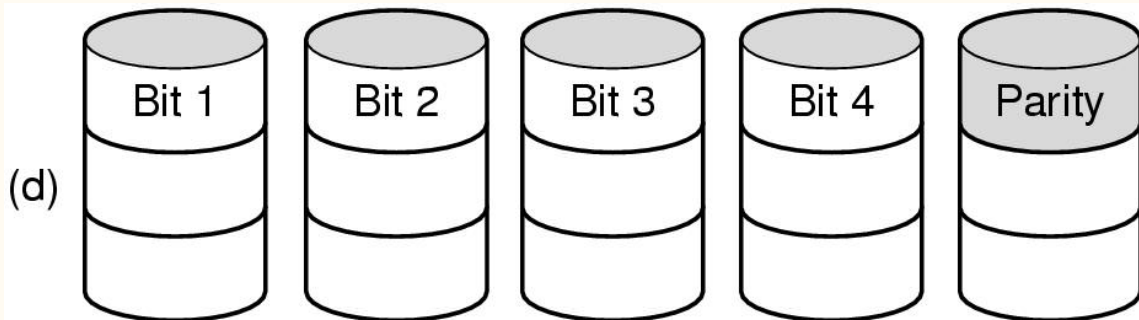


RAID 3, 4, 5 a 6

Dokážu nahradiť jeden chybný disk ak vieme, ktorý to je.

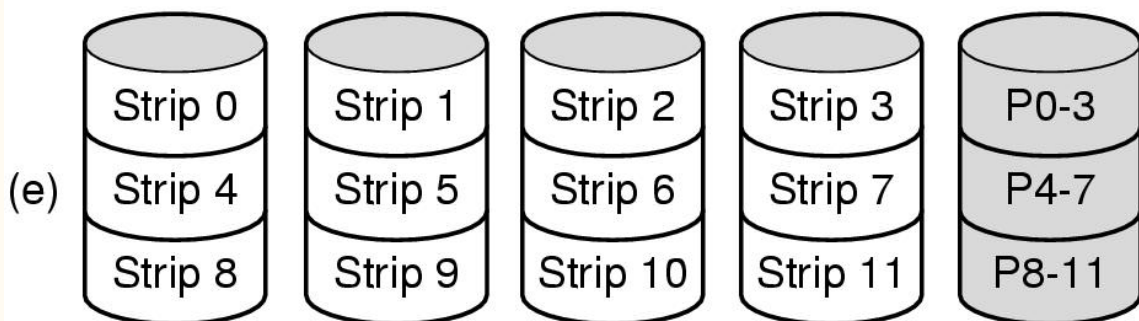
Parity počítajú operácie **XOR**.

RAID 4 a 5 potrebujú aspoň 3 apacita je (n-1)-násobok najmenšieho disku.



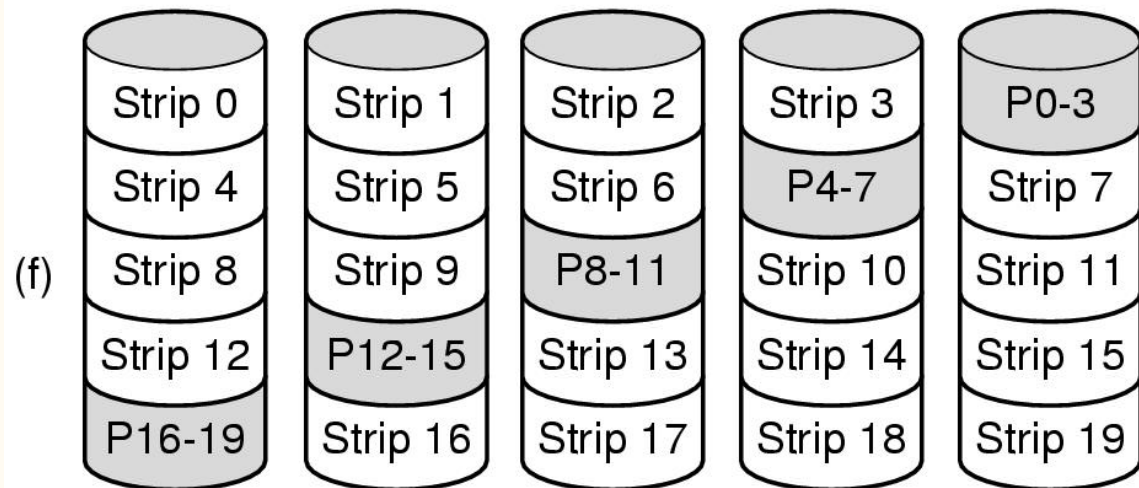
RAID level 3

XOR je sama sebe inverzná, preto sa pri výpadku hociktorého disku dá jeho obsah dopočítať ako XOR ostatných diskov.



RAID level 4

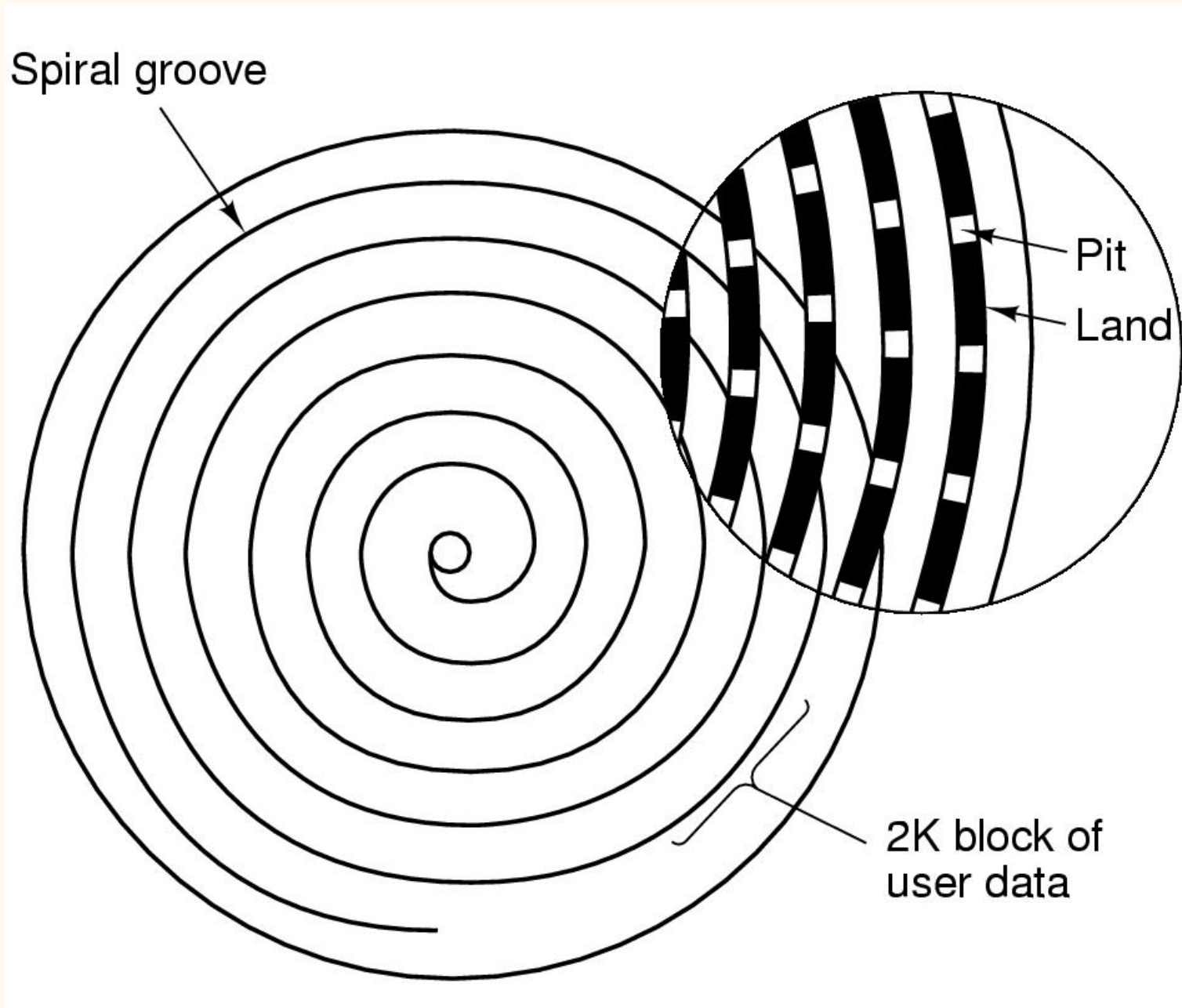
Niekedy sa kombinujú aj dve alebo tri úrovne RAID



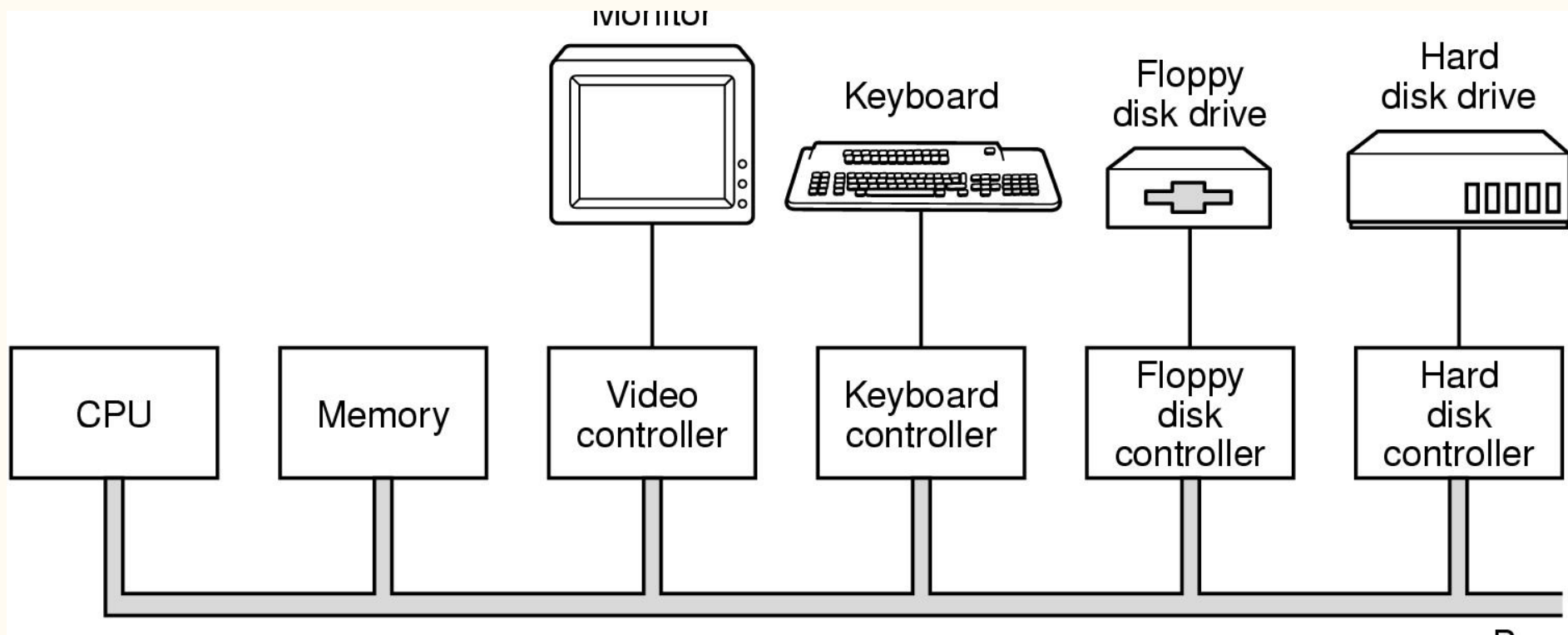
RAID level 5

RAID 6 je ako RAID 5 ale má 2 kópie parity, potrebuje aspoň 4 disky, ma kapacitu (n-2)-krát kapacita najmenšieho disku.

Optické diský



Vstupné a výstupné zariadenia



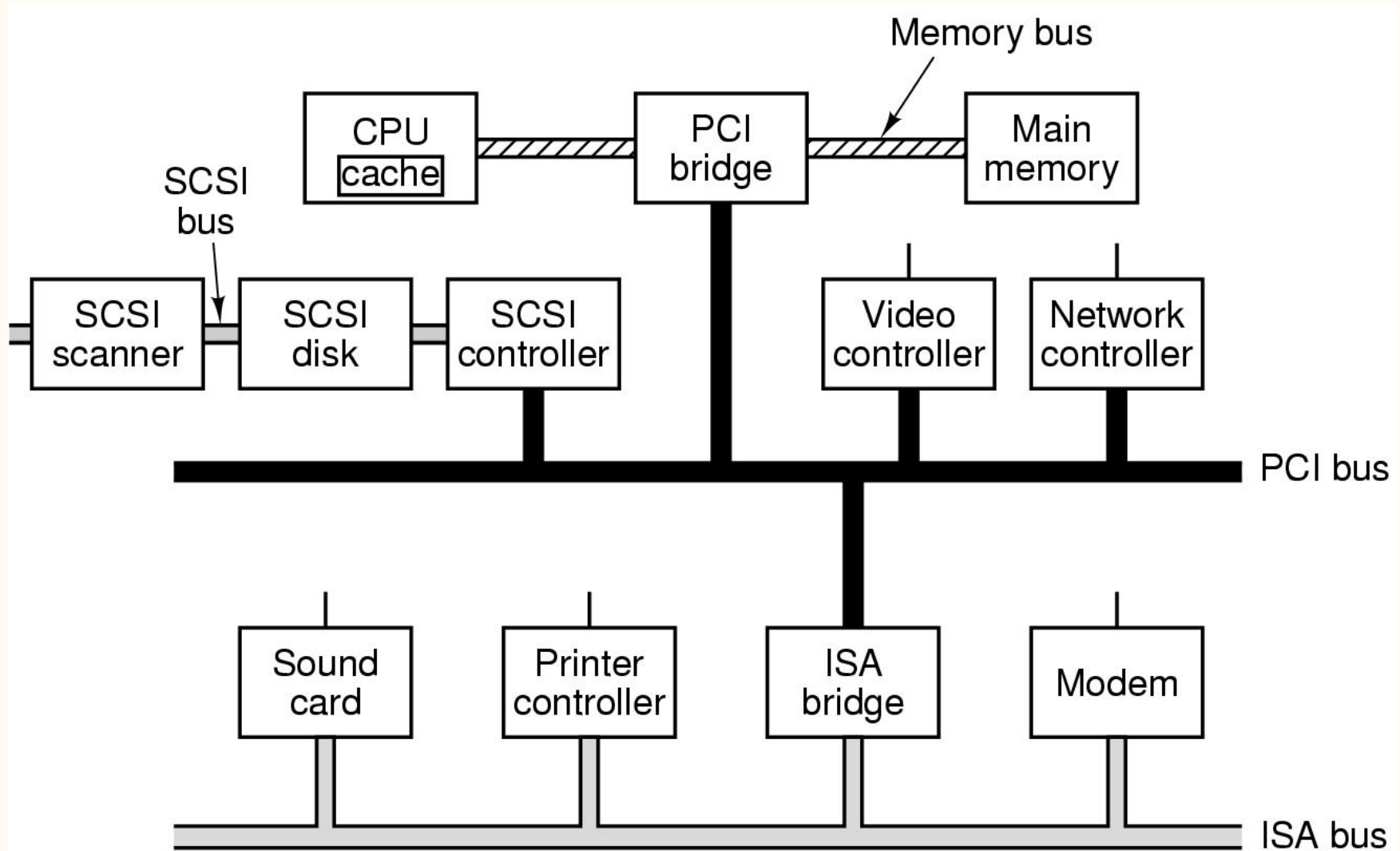
Radič zariadenia (controller) je elektronika, ktorá slúži na pripojenie zariadenia ku zbernici.

Radič môže byť veľmi jednoduchý (napr. klávesnica) alebo to môže byť celý samostatný počítač s vysokým výkonom (grafická karta).

Programátor programuje povely pre radič a až ten riadi samotné zariadenie.

Radiče obsahujú svoje registre a niekedy aj väčšie úseky pamäte.

Vstupné a výstupné zariadenia (2)



Obrázok ukazuje štruktúru počítača PC s viacerými zbernicami