I/O systém
Vnější paměti

Jaromír Plhák
xplhak@fi.muni.cz

Hardware (1)

- HW pro I/O je značně rozmanitý
- Existují však určité běžně používané prvky
  - Port
  - Sběrnice (bus)
  - Řadič (host adapter, controller)
- I/O zařízení jsou řízena I/O instrukcemi
  - IN, OUT

Hardware (2)

- Adresy I/O zařízení
  - Uváděné přímo v I/O instrukcích (např. IN AL, DX : DX port, AL získaný bajt)
- I/O se mapuje na přístup k paměti (např. grafická karta, videopaměť)
- Základní způsoby ovládání I/O
  - Polling, programované I/O operace
    - Aktivní čekání na konec operace
  - Přerušení
  - DMA

Rozmístění I/O portů v PC

I/O address range (hexadecimal)	device
000–00F	DMA controller
020–021	interrupt controller
040–043	timer
200–20F	game controller
2F8–2FF	serial port (secondary)
320–32F	hard-disk controller
378–37F	parallel port
3D0–3DF	graphics controller
3F0–3F7	diskette-drive controller
3F8–3FF	serial port (primary)

Techniky provádění I/O

- Programovaný I/O (busy-waiting)
  - Opakovaně se ptám na stav zařízení
    - Připraven / Pracuje / Chyba
- I/O řízený přerušením
  - Zahájení I/O pomocí I/O příkazu
  - Paralelní běh I/O s během procesoru
  - I/O modul oznamuje přerušením konec přenosu
- Direct Memory Access (DMA)
  - Kopírování bloků mezi pamětí a I/O zařízením na principu kradení cyklů paměti
  - Přerušení po přenosu bloku (indikace konce)

Přerušení

- Přerušení obsluhuje ovladač přerušení (kód OS)
- Maskováním lze některá přerušení ignorovat nebo oddálit jejich obsluhu
- Patřičný ovladač přerušení se vybírá přerušovacím vektorem
  - Některá přerušení nelze maskovat
  - Přerušení mohou být uspořádána podle priorit
- Přerušení se používá i pro řešení výjimek (nejsou asynchronní)

DMA

- Přímý přístup do paměti (**D**irect **M**emory **A**ccess)
  - Nahrazuje programovaný I/O při velkých přesunech dat
  - Vyžaduje speciální DMA řadič
  - Při přenosu dat se obchází procesor, přístup do paměti zajišťuje přímo DMA řadič
  - Procesor a DMA soutěží o přístup k paměti

Aplikační rozhraní I/O

- Jádro OS se snaží skrýt rozdíly mezi I/O zařízeními a programátorům poskytuje jednotné rozhraní
- Dále vrstva ovladačů ukrývá rozdílnost chování I/O řadičů i před některými částmi jádra
- Některé vlastnosti I/O zařízení
  - Mód přenosu dat – znakové (terminál) / blokové (disk)
  - Způsob přístupu – sekvenční (modem) / přímý (disk)
  - Sdílené/dedikované – klávesnice / páska
  - Rychlost přenosu – vystavení, přenos, ...
  - Read-write, read only, write only

Bloková a znaková zařízení

- Bloková zařízení – typicky disk
  - Příkazy – read, write, seek
  - Logický způsob přístupu – obecný I/O nebo souborový systém
  - Možný přístup formou souboru mapovaného do paměti
- Znaková – klávesnice, myš, sériový port
  - Příkazy – get, put
  - Nad nimi knihovní podprogramy pro další možnosti (např. řádková editace)

Síťová zařízení

- Přístup k nim se značně liší jak od znakových, tak od blokových zařízení
  - Proto mívají samostatné rozhraní OS
- Unix i Windows obsahující rozhraní nazývané „sockets“
  - Separují síťové protokoly od síťových operací
  - Přístup jako k souborům (včetně funkce select)
- Existuje celá řada přístupů k síťovým službám
  - Pipes (roury), FIFOs, streams, queues, mailboxes

Blokující a neblokující I/O (1)

- Blokující
  - Z hlediska procesu synchronní
  - Proces čeká na ukončení I/O
  - Snadné použití (programovaní), snadné porozumění (po provedení operace je hotovo to co jsem požadoval)
  - Někdy však není dostačující (z důvodu efektivity)
- Neblokující
  - Řízení se procesu vrací co nejdříve po zadání požadavku
  - Vhodné pro uživatelské rozhraní, bufferovaný I/O
  - Bývá implementováno pomocí vláken
  - Okamžitě vrací počet načtených či zapsaných znaků

Blokující a neblokující I/O (2)

- Asynchronní
  - Proces běží souběžně s I/O
  - Konec I/O je procesu hlášen signály
  - Obtížné na programovaní, složité používání, ale v případě vhodně promyšleného programu velice efektivní

I/O subsystém v jádru (1)

- Plánování
  - Některé I/O operace požadují řazení do front na zařízení
  - Některé OS se snaží o „spravedlnost“
- Vyrovnání (vyrovnávací paměti), buffering
  - Ukládání dat v paměti v době přenosu k/ze zařízení
  - Řeší rozdílnost rychlosti
  - Řeší rozdílnost velikosti datových jednotek

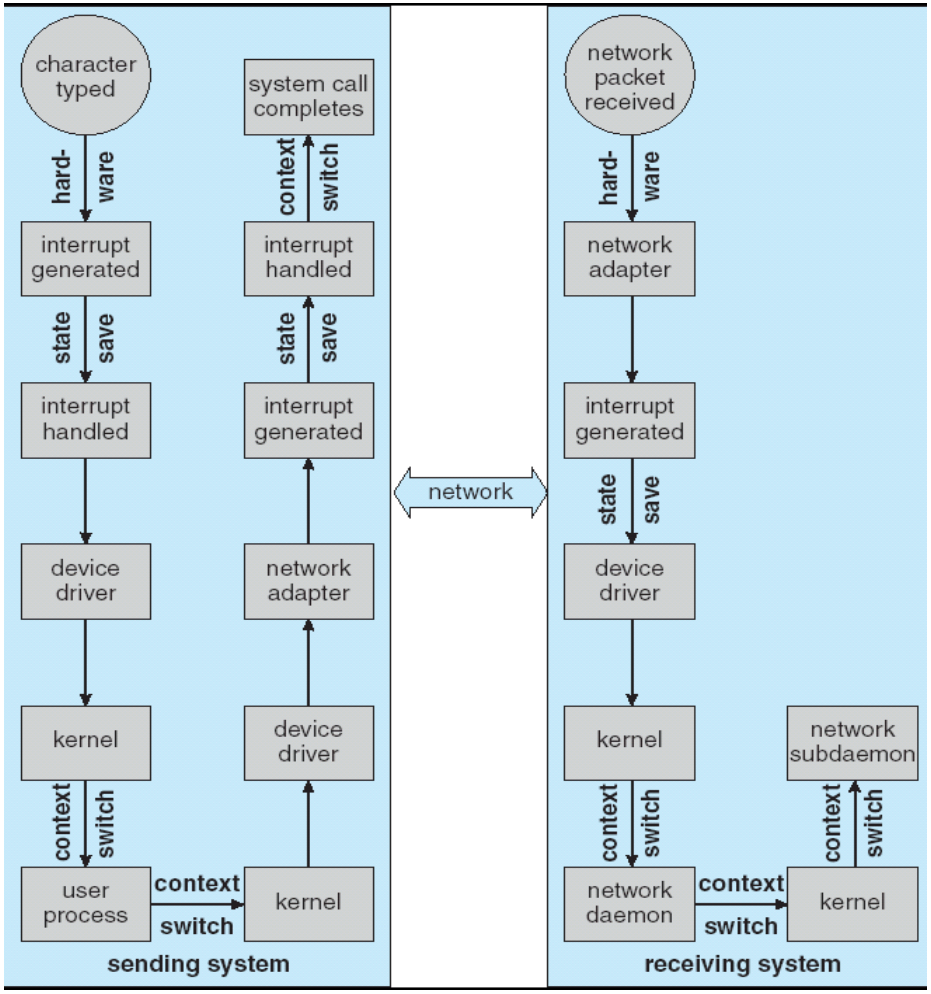
I/O subsystém v jádru (2)

- Caching
  - Rychlá paměť udržuje kopii dat
  - Vždy pouze kopii
  - Caching je klíčem k dosažení vysokého výkonu
- Spooling
  - Udržování fronty dat určených k výpis na zařízení
  - Pokud zařízení může vyřizovat požadavky pouze sekvenčně
  - Typicky tiskárna
- Rezervace zařízení
  - Exkluzivita přístupu k zařízení pro proces
  - Rezervace / uvolnění – volání systému
  - Pozor na uváznutí (deadlock)

Výkon

- I/O je nejvýznamnějším faktorem výkonu celého systému
  - CPU musí provádět ovladače a programy I/O části jádra
  - Při přerušení se přepíná kontext
  - Provádí se kopírování dat
  - Zvláště významný je síťový provoz

Příklad – Síťová aplikace

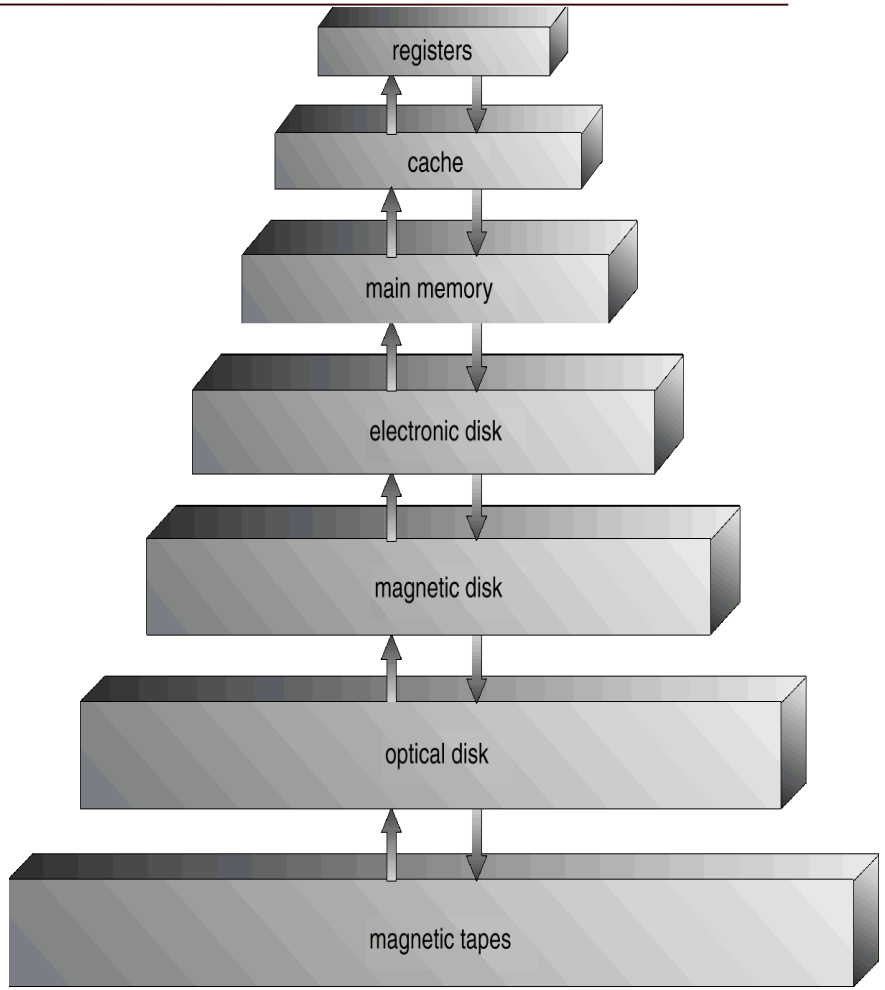


Zvyšování výkonu

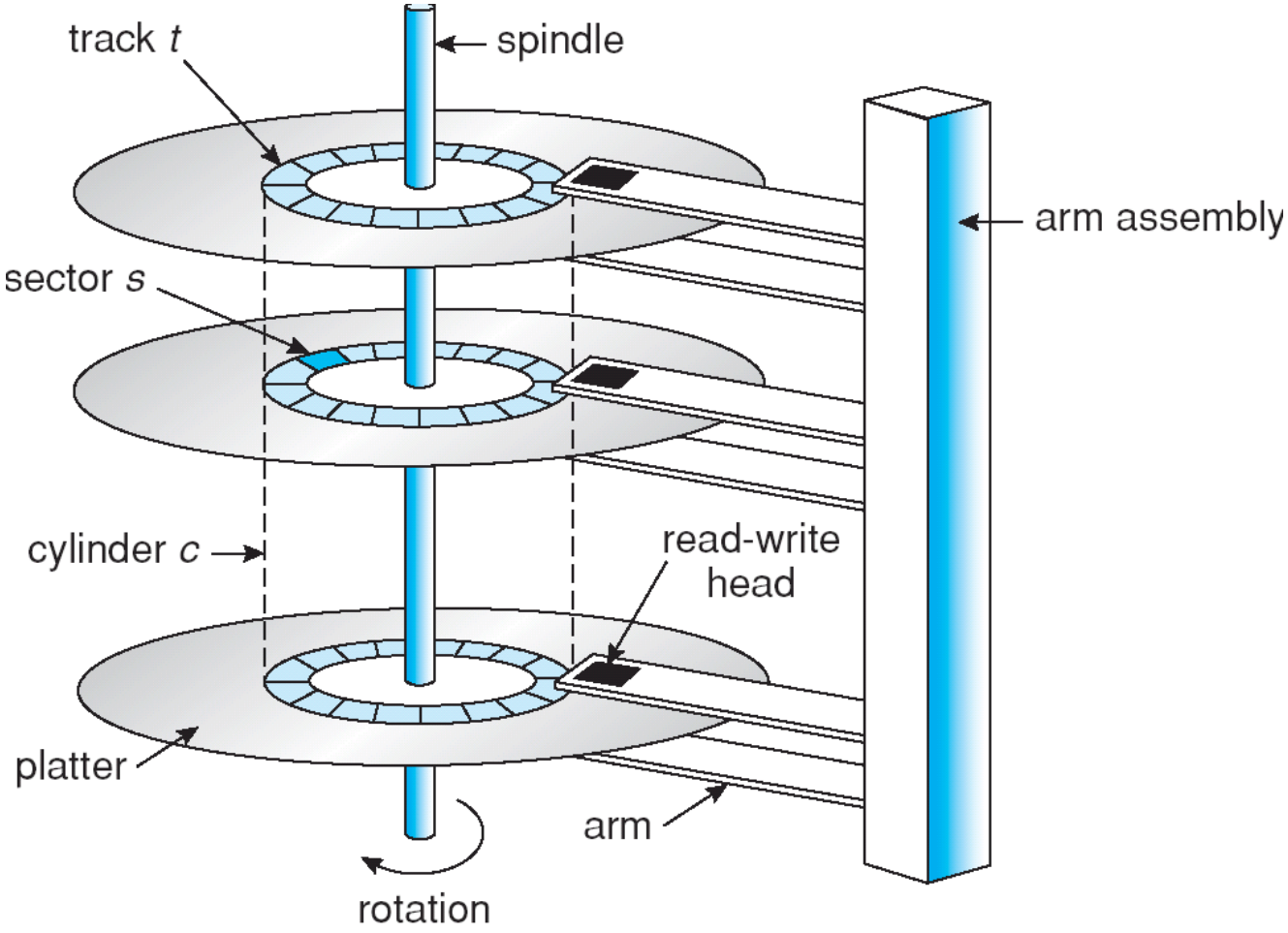
- Omezujeme počet přepnutí kontextu
- Omezujeme zbytečné kopírování dat
- Omezujeme počet přerušení tím, že přenášíme delší bloky
- Využíváme všech výhod (funkcí) moderních řadičů
- Používáme co nejvíce DMA
- Všechny komponenty kombinujeme s cílem dosažení co nejvyšší propustnosti
  - CPU, paměť, sběrnice, I/O zařízení

Paměťová hierarchie

- Primární paměti
  - Nejrychlejší
  - Energeticky závislé
  - Cache, hlavní (operační) paměť
- Sekundární paměti
  - Středně rychlé
  - Energeticky nezávislé
  - Také nazývané „on-line storage“
  - Flash disky, magnetické disky
- Terciální paměti
  - Levná typicky vyměnitelná média
  - Pomalé
  - Energeticky nezávislé
  - Také nazývané „off-line storage“
  - Floppy disky, magnetické pásky, optické disky



Magnetické disky



Struktura disku

- Diskové mechanismy se adresují jako velká 1-dimenzionální pole logických bloků
  - Logické bloky jsou nejmenší jednotkou přenosu dat
- 1-dimensionální pole logických bloků je zobrazováno do sektorů disku sekvenčně
  - Sektor 0
    - První sektor na první stopě vnějšího válce
  - Zobrazování pokračuje po této stopě, potom po ostatních stopách tohoto válce, a potom po válcích směrem ke středu

Plánování disku (1)

- OS je odpovědný za efektivní používání hardware
  - Pro disky – co nejrychlejší přístup a co největší šířka pásma
- Doba přístupu (access time) je dána
  - Dobou vystavení (seek time) – na válec se stopou s adresovaným sektorem
  - Dobou rotačního zpoždění – dodatečná doba do průchodu adresovaného sektoru pod čtecí/zápisovou hlavou
- Minimalizace doby vystavení
  - Doba vystavení ≈ vystavovací vzdálenosti
  - Řeší plánování činnosti disku

Plánování disku (2)

- Rotační zpoždění
  - Shora omezeno konstantou
- Šířka pásma
  - Počet přenesených bytů / doba od zadání skupiny požadavků do jejich ukončení
  - Převzatý pojem z telekomunikací

Plánování disku (3)

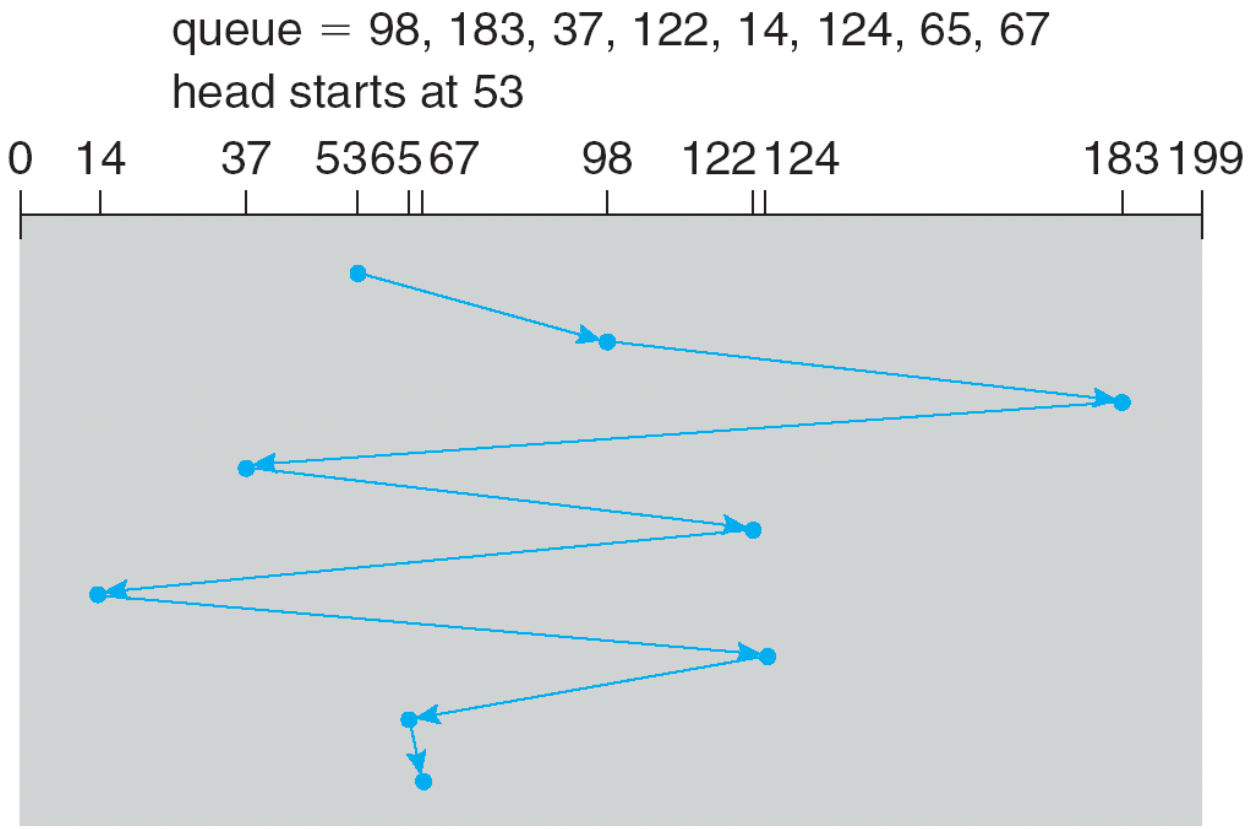
- Existuje celá řada algoritmů pro plánování přístupu na disk
- Příklad – vzorová fronta požadavků na přístup k disku (máme válce 0-199)

  98, 183, 37, 122, 14, 124, 65, 67

- Hlavička disku vystavena na pozici 53

FCFS

- Celkem přesun o 640 válců



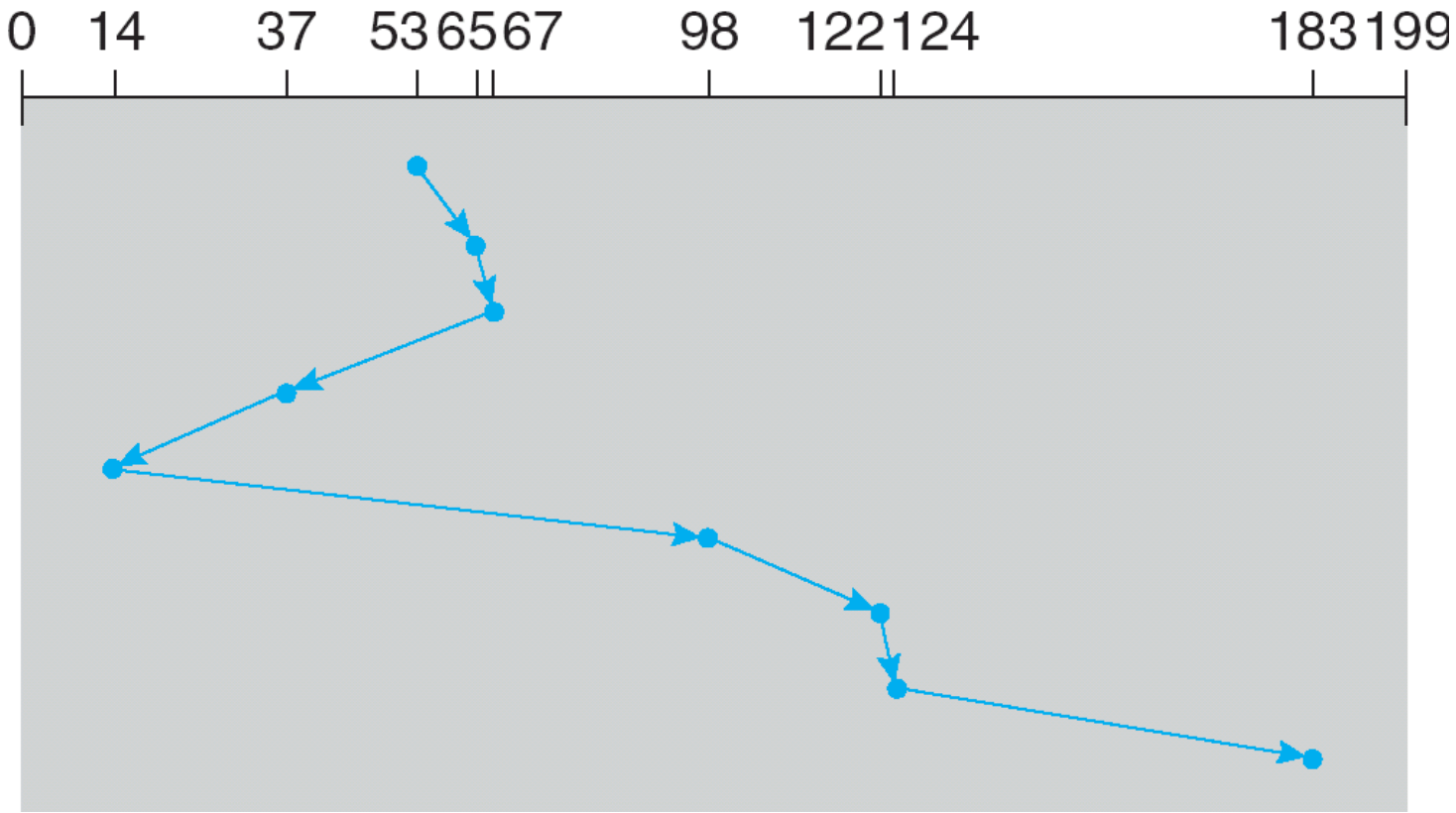
SSTF (1)

- Z fronty požadavků vybírá ten požadavek, který vyžaduje minimální dobu vystavení od současné pozice hlavičky
- **S**hortest **S**eek **T**ime **F**irst algoritmus je variantou algoritmu SJF (shortest job first)
  - Může způsobit stárnutí požadavků.
- Náš příklad vyžaduje přesun o 236 válců

SSTF (2)

queue = 98, 183, 37, 122, 14, 124, 65, 67

head starts at 53



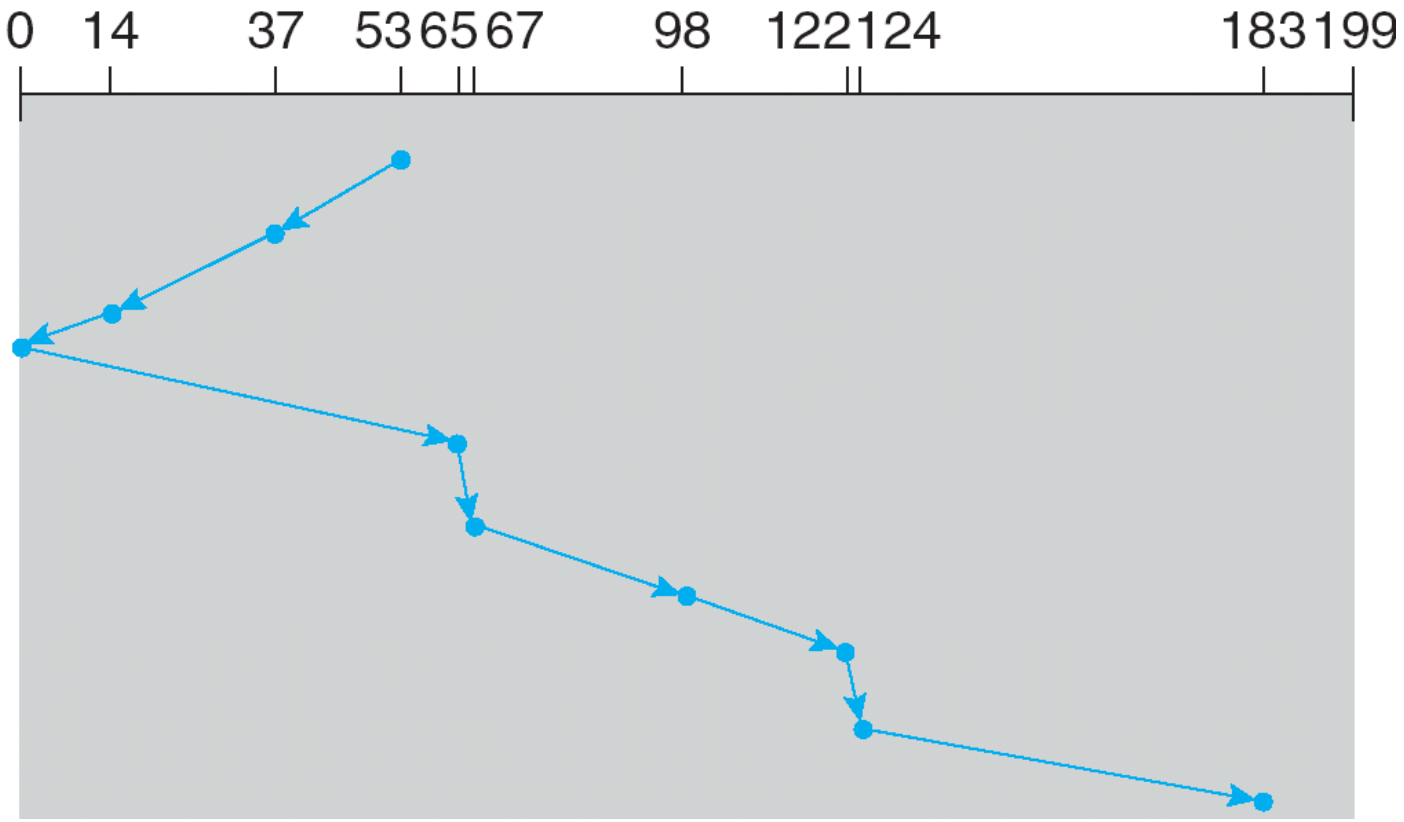
SCAN (1)

- Hlavička disku začíná na jedné straně disku a přesunuje se při splňování požadavků ke druhé straně disku. Pak se vrací zpět a opět plní požadavky
- Někdy nazývané algoritmus typu výtah
- Náš příklad vyžaduje přesun o 208 válců

SCAN (2)

queue = 98, 183, 37, 122, 14, 124, 65, 67

head starts at 53



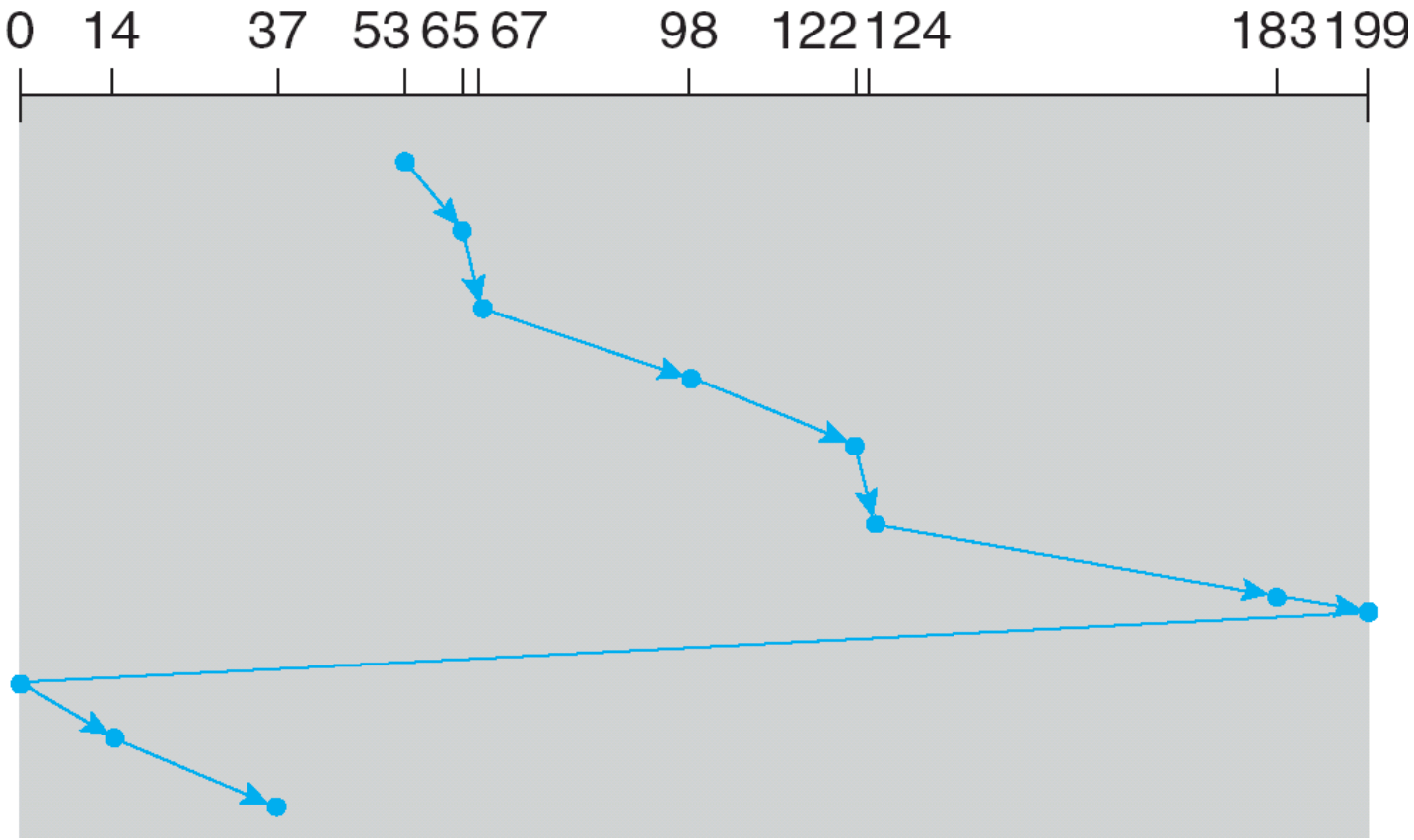
C-SCAN (1)

- Poskytuje jednotnější čekací dobu než SCAN
- Hlavička se posouvá z jednoho konce disku na druhý a zpracovává požadavky. Potom se vrací zpět bez vyřizování požadavků a opět začíná vyřizovat požadavky z prvního konce
- Válce považuje za kruhový seznam, který za posledním válcem pokračuje opět prvním válcem

C-SCAN (2)

queue = 98, 183, 37, 122, 14, 124, 65, 67

head starts at 53



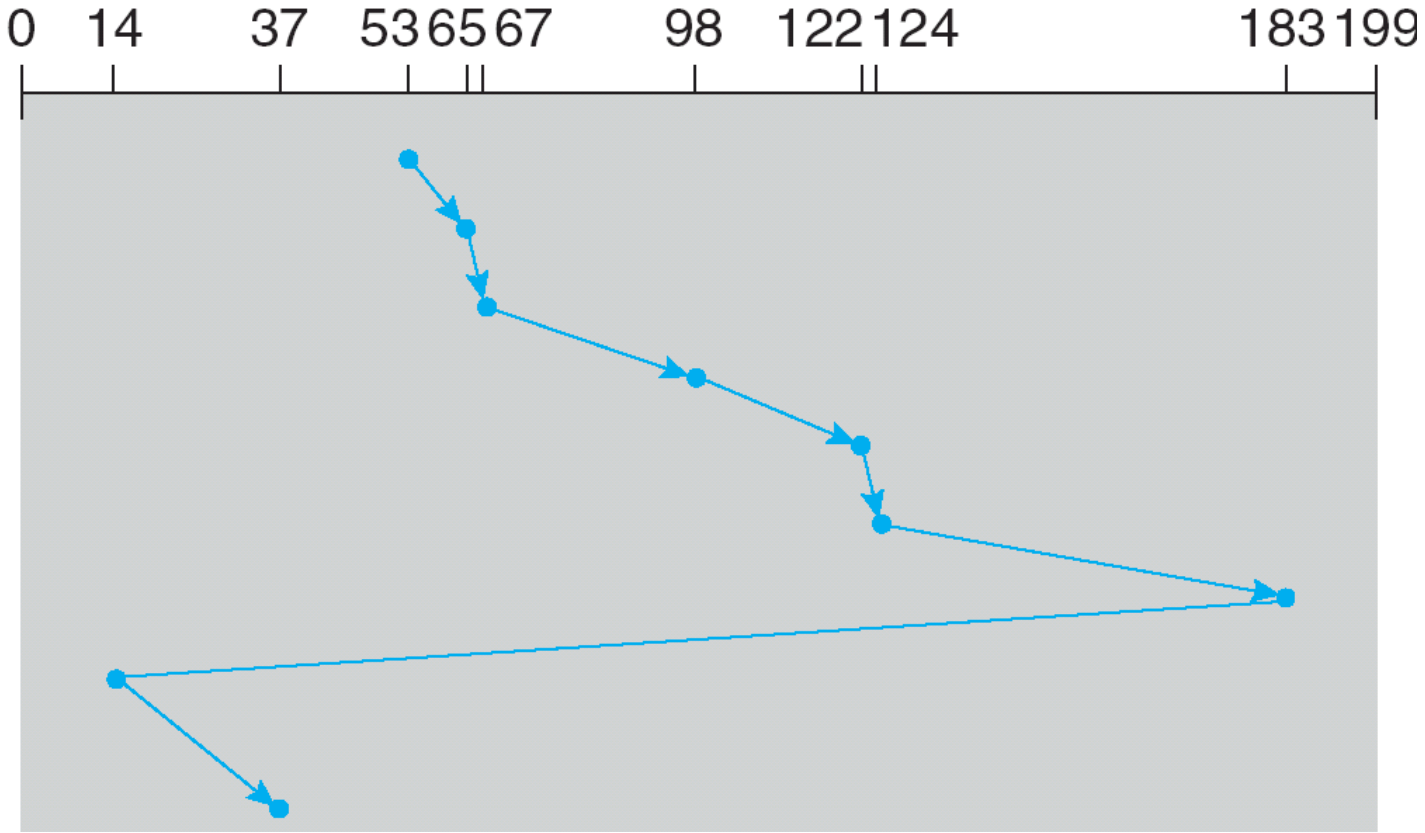
C-LOOK (1)

- Obdoba C-SCAN, ale hlavička jen potud do kraje, pokud existují požadavky.
- Pak se vrací zpět

C-LOOK (2)

queue 98, 183, 37, 122, 14, 124, 65, 67

head starts at 53



Výběr algoritmu

- SSTF je přirozený, má přirozené chápání
- SCAN a C-SCAN jsou vhodnější pro velkou zátěž disku
- Výkon závisí na počtu a typech požadavků
- Požadavky na disk mohou být ovlivněny metodami organizace souborů v souborovém systému
- Plánovací algoritmus by měl být napsán jako samostatný modul
  - Možnost záměny plánovacího algoritmu
- Častá implicitní volba bývá SSTF nebo LOOK

Moderní HW

- U moderních disků nemusí být známé mapování logických bloků na fyzické adresy
- Disku předáme skupinu požadavků a disk si pořadí optimalizuje sám
- OS přesto může mít zájem na vlastním řazení požadavků
  - Priorita I/O operací z důvodu výpadků stránek
  - Pořadí operací zápisu dat a metadat souborového systému

Technologie RAID (1)

- RAID (**R**edundant **A**rrays of **I**ndependent (**I**nexpensive) **D**isks)
  - Organizace disků řízená tak, že poskytuje dojem jednoho (logického) disku
  - S velkou kapacitou a rychlostí díky tomu, že mnoho disků pracuje paralelně
  - S velkou spolehlivostí, data se uchovávají redundantně, lze je obnovit i po poruše některého z disků

Technologie RAID (2)

- Pravděpodobnost, že některý disk z množiny N disků selže je mnohem vyšší, než pravděpodobnost, že selže jediný disk
  - N = 100 disků, každý má MTTF = 100 000 hodin (cca 11 let), celý systém bude mít MTTF = 1000 hodin (cca 41 dní)
  - Techniky na bázi redundance chránící před ztrátou dat jsou pro systémy s velkým počtem komponent (disků) kritické
- Původní záměr
  - Levná alternativa nahrazující velké drahé disky
  - „I“ je interpretováno jako „independent“

RAID – zvýšení spolehlivosti (1)

- Redundance
  - Nadbytečnost, doplňková informace použitelná pro obnovu informace po poruše (disku)
- Zrcadlení (stínování), Mirroring (shadowing)
  - Každý disk je duplikován, 1 logický disk je tvořen 2 fyzickými disky
  - Každý zápis se provede na obou discích, čte se z jednoho disku (s kratší dobou vystavení)
  - Jestliže se jeden disk porouchá, data jsou k dispozici na druhém disku

RAID – zvýšení spolehlivosti (2)

- Zrcadlení (pokr.)
  - Ke ztrátě dat dojde při výpadku obou disků, když zrcadlový disk selže dříve, než se systém opraví
  - Průměrná doba do ztráty dat závisí na průměrné době do poruchy a průměrné doby opravy
  - Např. MTTF = 100 000 hodin, průměrná doba opravy 10 hodin, dává u zrcadlené dvojice disků průměrnou dobu ztráty dat $100\,000^2 / (2 * 10) = 500*10^6$ hodin (čili 57 000 let), když budeme ignorovat požáry apod.

RAID – zvýšení výkonu

- Dva hlavní cíle paralelismu v diskových systémech
  - Zvýšení propustnosti vyvážením zátěže malými přístupy
  - Paralelizace velkých přístupů s cílem zkrácení doby odpovědi
- Zvýšení přenosové rychlosti paralelním zápisem do více disků (dělení, striping)
  - Bit-level striping
  - Blok-level striping

RAID – Bit-level striping

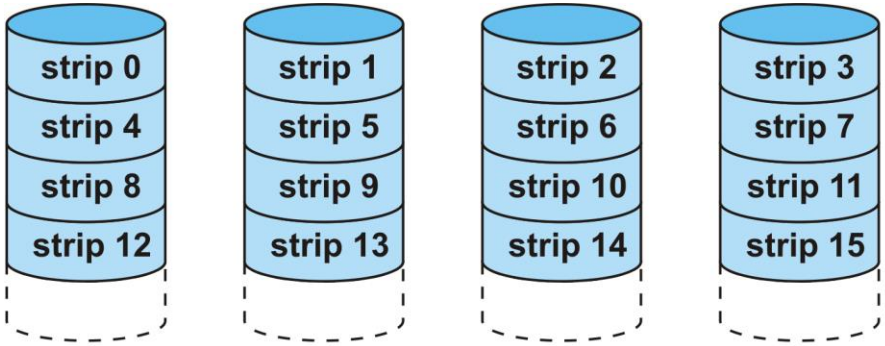
- Dělení bitů každého bytu mezi samostatné disky
- V poli 8 disků se zapisuje bit *i* každého bytu na disk *i*
- Čtení dat probíhá 8krát rychleji než z jednoho disku
- Vystavení je delší než v případě jednoho disku
- Dnes se bit-level striping de facto už nepoužívá

Block level striping

- Systém s *n* disky, blok souboru *i* se zapisuje na disk (*i* mod *n*) + 1
- Požadavky na různé bloky se mohou realizovat paralelně, jestliže bloky leží na různých discích
- Požadavek na dlouhou posloupnost bloků může použít všechny disky paralelně

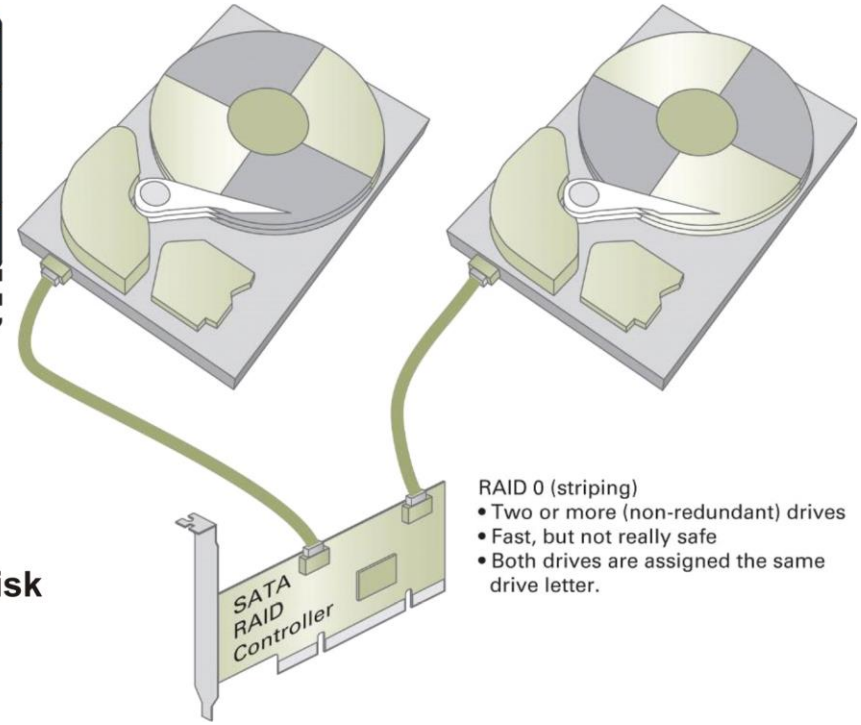
RAID 0

- Žádná redundance, jen souběžnost
- Porucha jedno disku znamená ztrátu všech dat

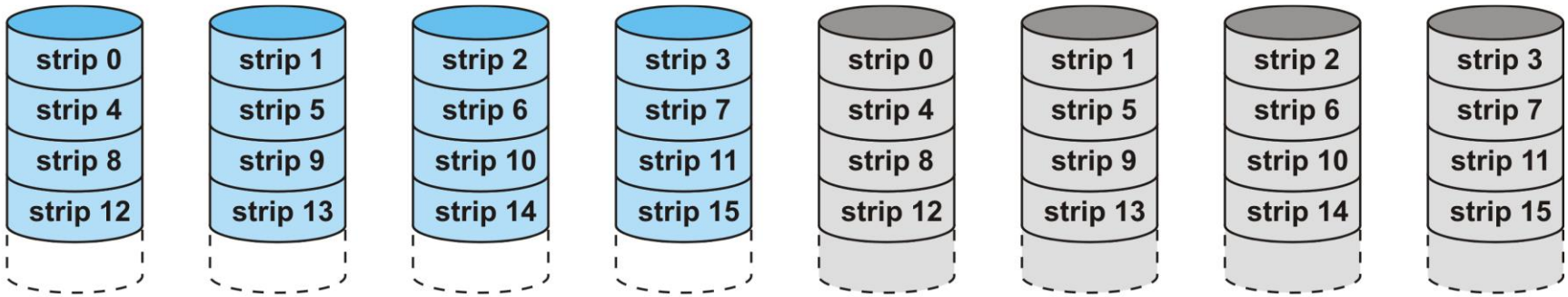


Diskové pole s rozkládáním bloků, každý blok (strip) na jednom disku

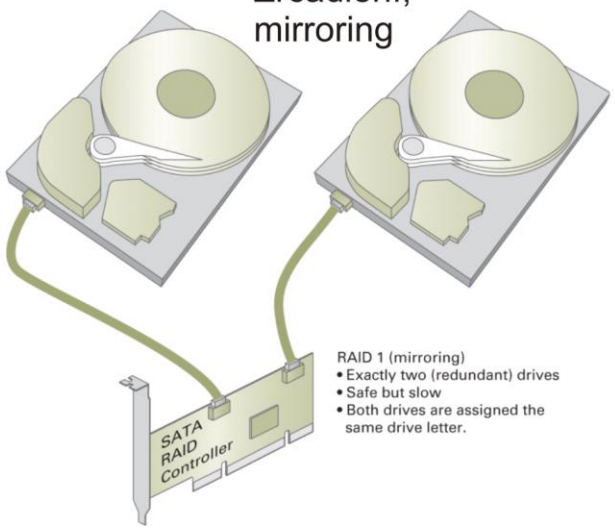
Pro souborový systém se pole chová jako jediný disk



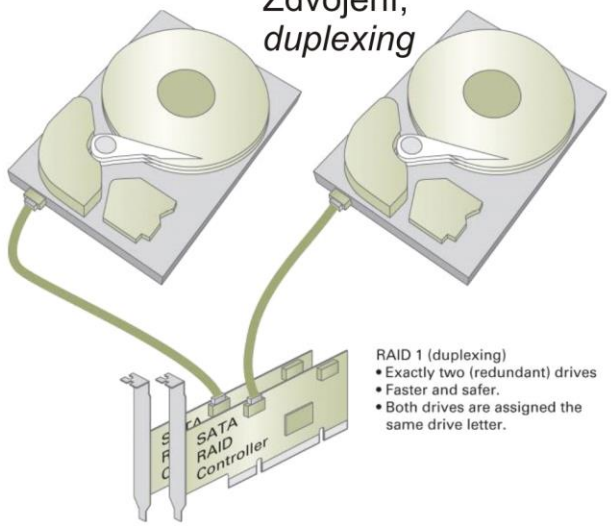
RAID 1



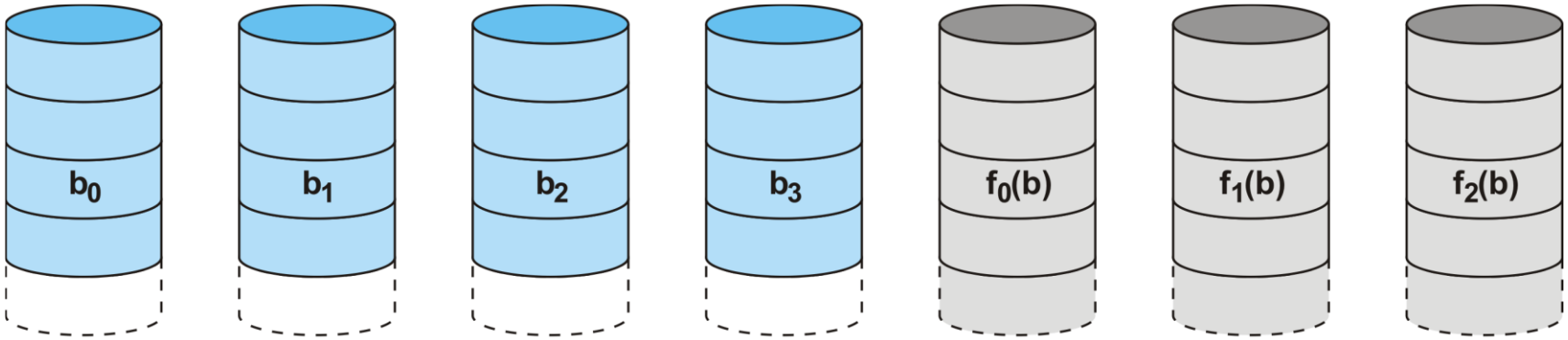
Zrcadlení,
mirroring



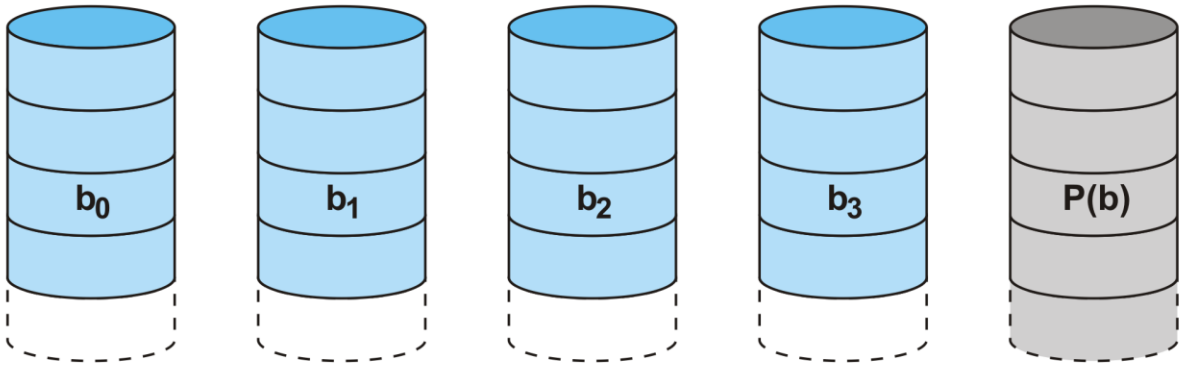
Zdvojení,
duplexing



RAID 2 a 3



(c) RAID 2 (redundancy through Hamming code)

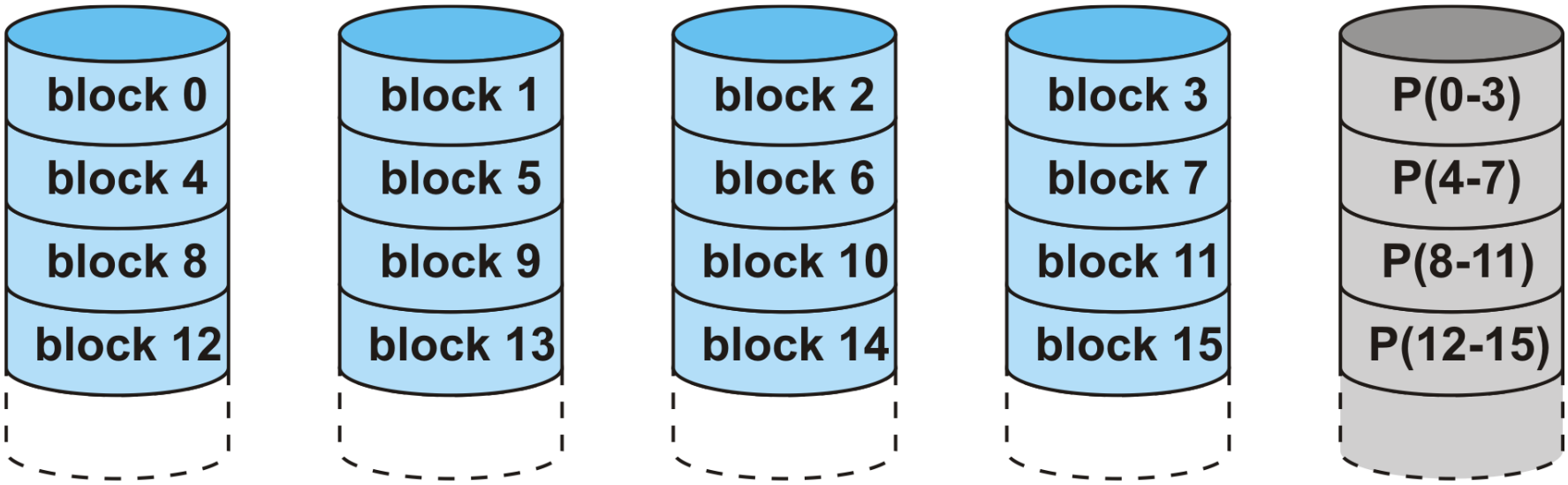


(d) RAID 3 (bit-interleaved parity)

P(b) = b0 XOR b1 XOR b2 XOR b3
při výpadku disku 2 platí:
b2 = b0 XOR b1 XOR P(b) XOR b3

RAID 4

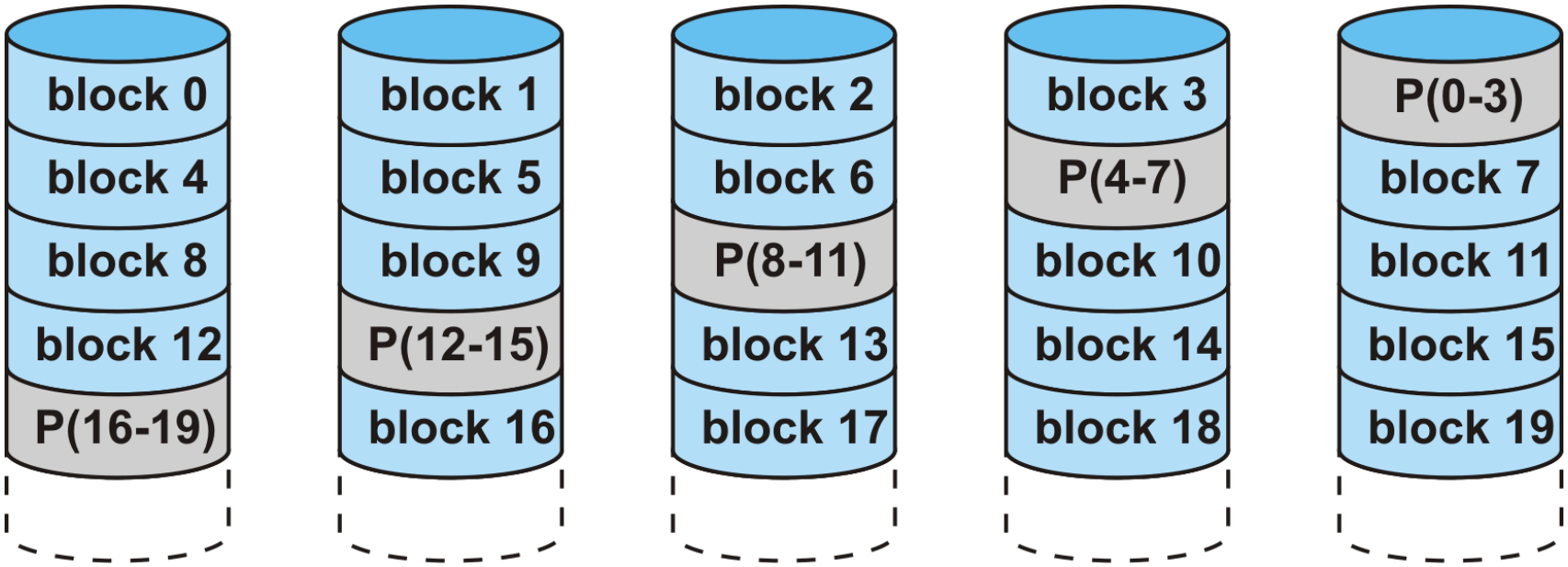
- Občas používaná implementace na bázi proužkování bloku
  - Analogie RAID 0 s paritním diskem
  - Parita pomocí XOR



(e) RAID 4 (block-level parity)

RAID 5 (1)

- Velmi populární implementace RAID na bázi proužkování bloku



(f) RAID 5 (block-level distributed parity)

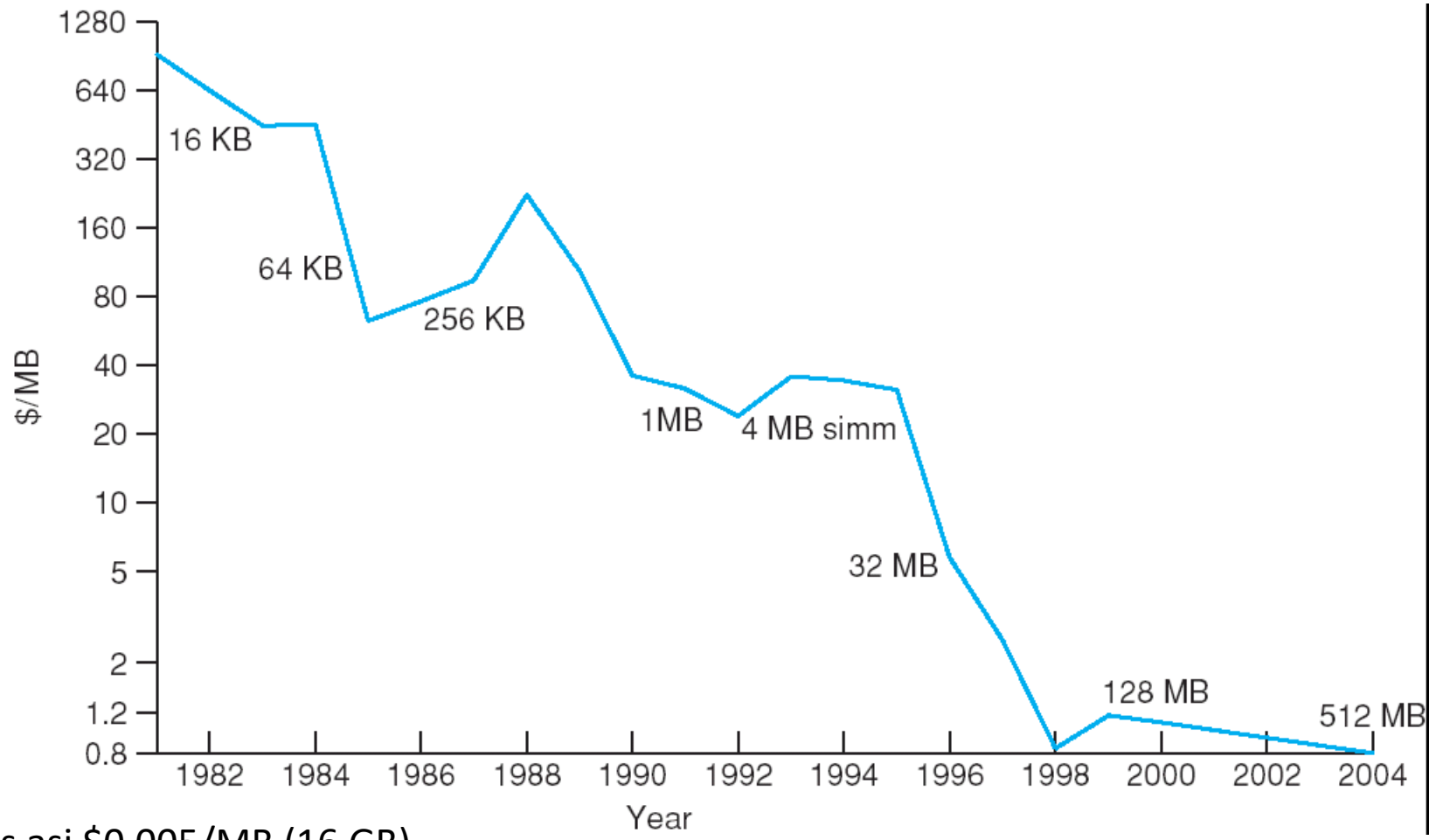
RAID 5 (2)

- Minimum jsou 3 disky (prokládaná data + parita), z které je možno obnovit poškozená data
- Proužkovaná je i opravná redundantní informace
- Na rozdíl od RAID 4 jsou paritní data rozložena po všech discích
- Dosahuje se vyrovnané propustnosti
  - Doba odezvy je velmi dobrá
- Čtení ze všech disku najednou mimo parity, tzn. zrychlení (n – 1) krát
- Při zápisu je třeba počítat paritu – hardware na řadiči
- Využitá kapacita je (n – 1) krát velikost disku
- Zvládne výpadek 1 disku

RAID 6

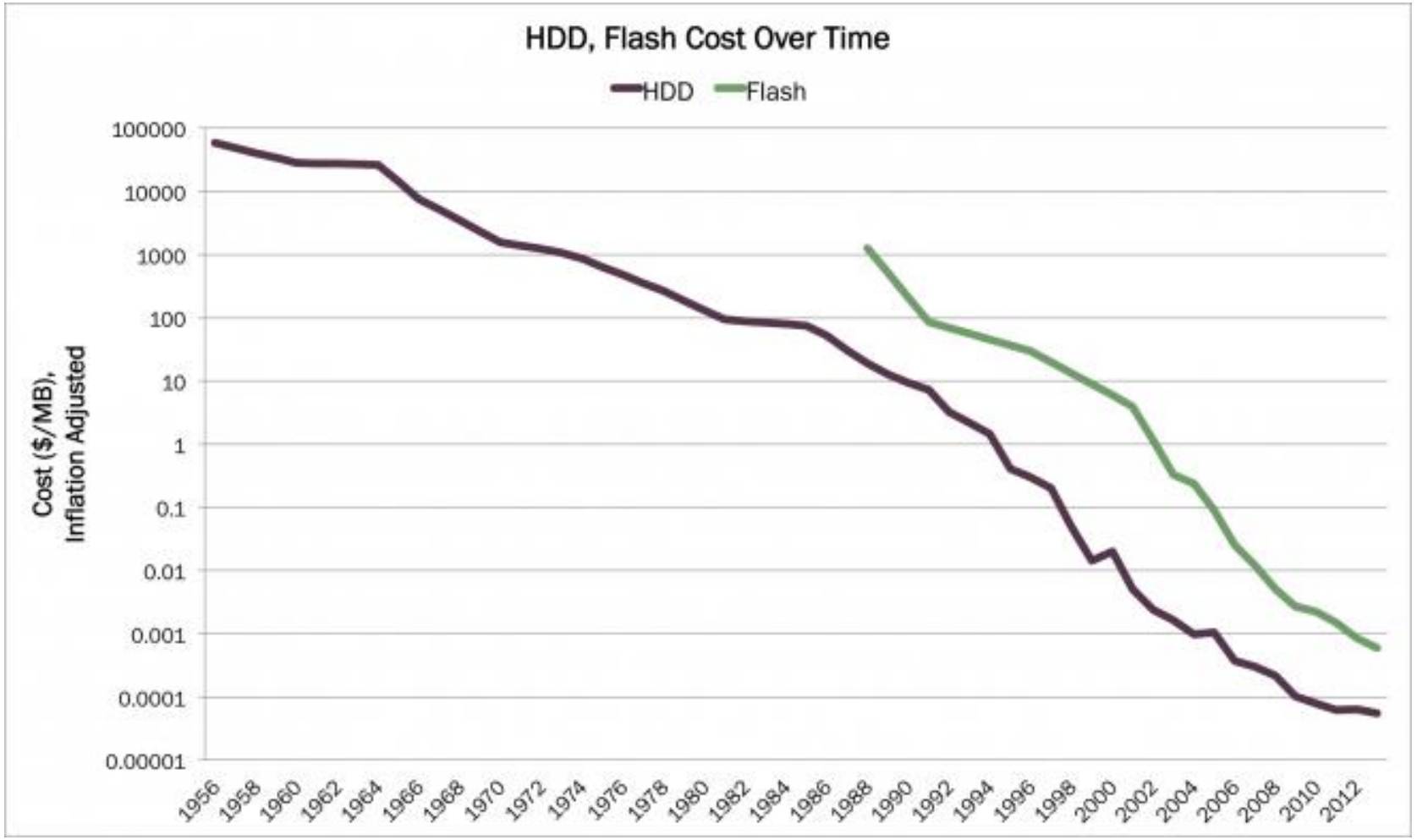
- Proužkování na úrovni bloků
- Zabezpečovací informace (opravné kódy) je dělena mezi všechny disky
- Obdoba RAID 5
  - Ale udrzuje 2krát paritní informaci
  - Zvládne výpadek dvou disků najednou
- Minimum 4 disky
- Využitelná kapacita (n – 2) krát kapacita 1 disku

Cena MB RAM (1981 – 2004)



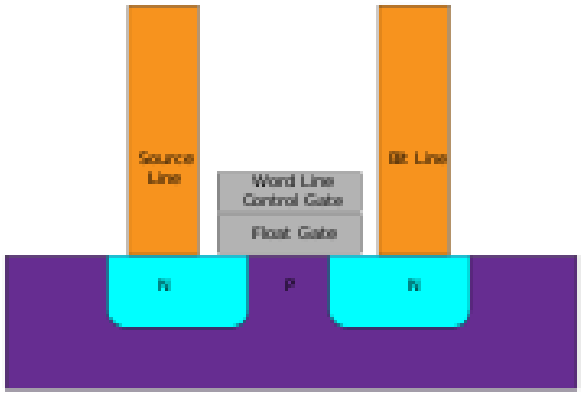
Dnes asi $0.005/MB (16 GB)

Cena MB pevných disků (1956 – 2012)



SSD disky (1)

- Solid-state drive
- Neobsahuje pohyblivé mechanické části
  - Nižší spotřeba elektrické energie
- Pro uložení použita flash paměť

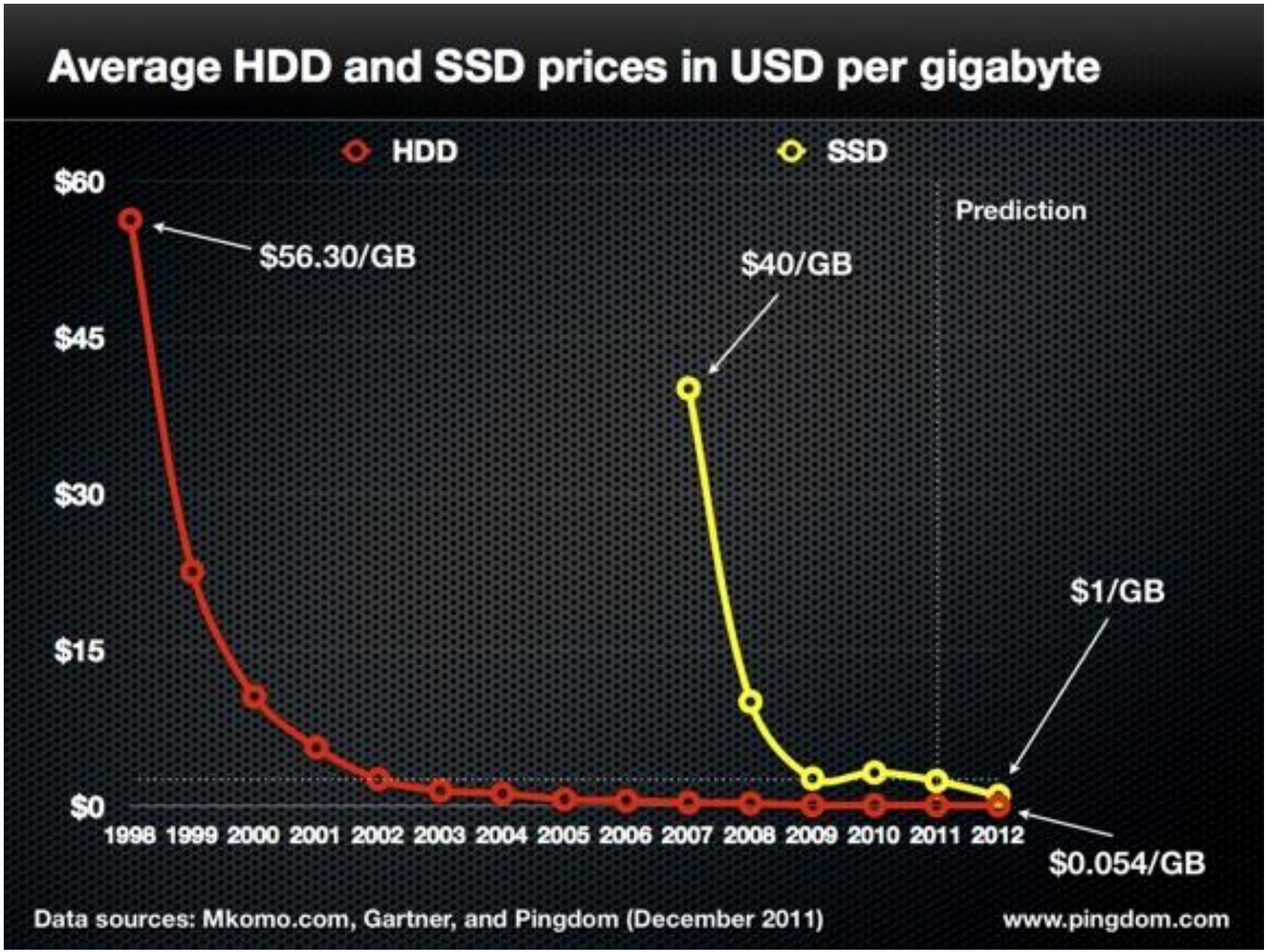


SSD disky (2)

- Čip na rozhraní emuluje rozhraní používaná pro pevné disky (typicky SATA)
- Nižší čas pro získání dat
  - Mikrosekundy místo milisekund
- Vyšší rychlosti čtení
- Nehlučné
- Méně náchylné na otřesy
  - Výhoda zejména v přenosných počítačích

SSD disky (3)

- Omezená životnost maximálním počtem zápisů do stejného místa
  - Přibližně 100 000 zápisů
  - Ale rovnoměrně se rozkládá
- Vyšší cena
- Některé OS (Windows) k nim obvykle přistupují díky kompatibilitě jako k normálním pevným diskům a tak dochází k degradaci jejich výkonu


Average HDD and SSD prices in USD per gigabyte
HDD
SSD
$60
$45
$30
$15
$0
Prediction
$56.30/GB
$40/GB
$1/GB
$0.054/GB
1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012
Data sources: Mkomo.com, Gartner, and Pingdom (December 2011)
www.pingdom.com