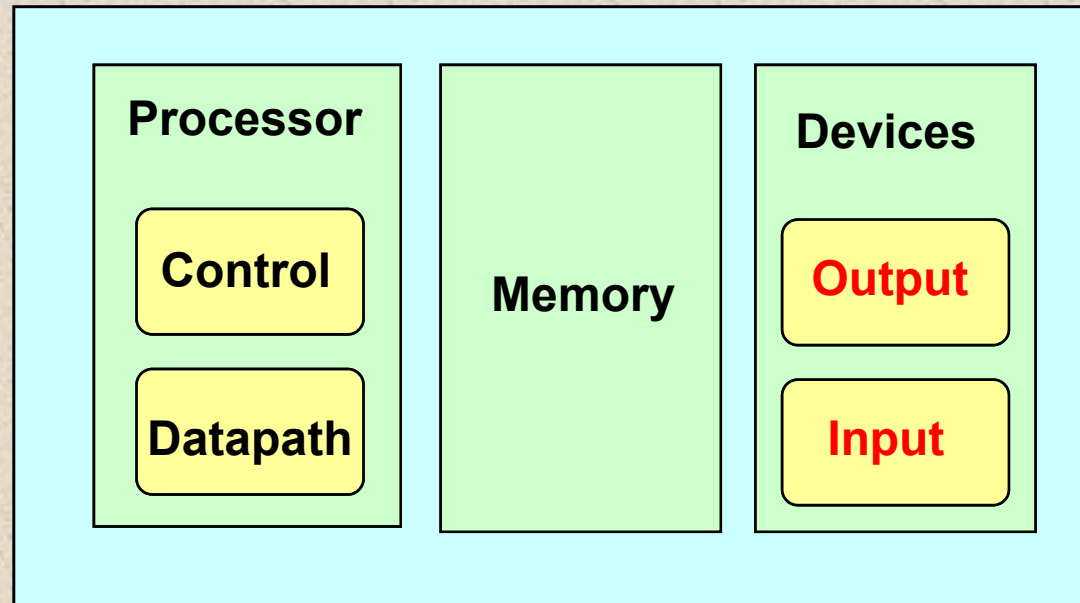


Úvod do organizace počítače

I/O zařízení a sběrnice

[K přípravě využita kniha: *Computer Organization and Design*, Patterson & Hennessy, © 2010]

Opakování: Základní části počítače



- Důležité metriky I/O systému
 - Výkon
 - Rozšiřitelnost
 - Spolehlivost
 - Cena, velikost, váha

Vstupní a výstupní zařízení

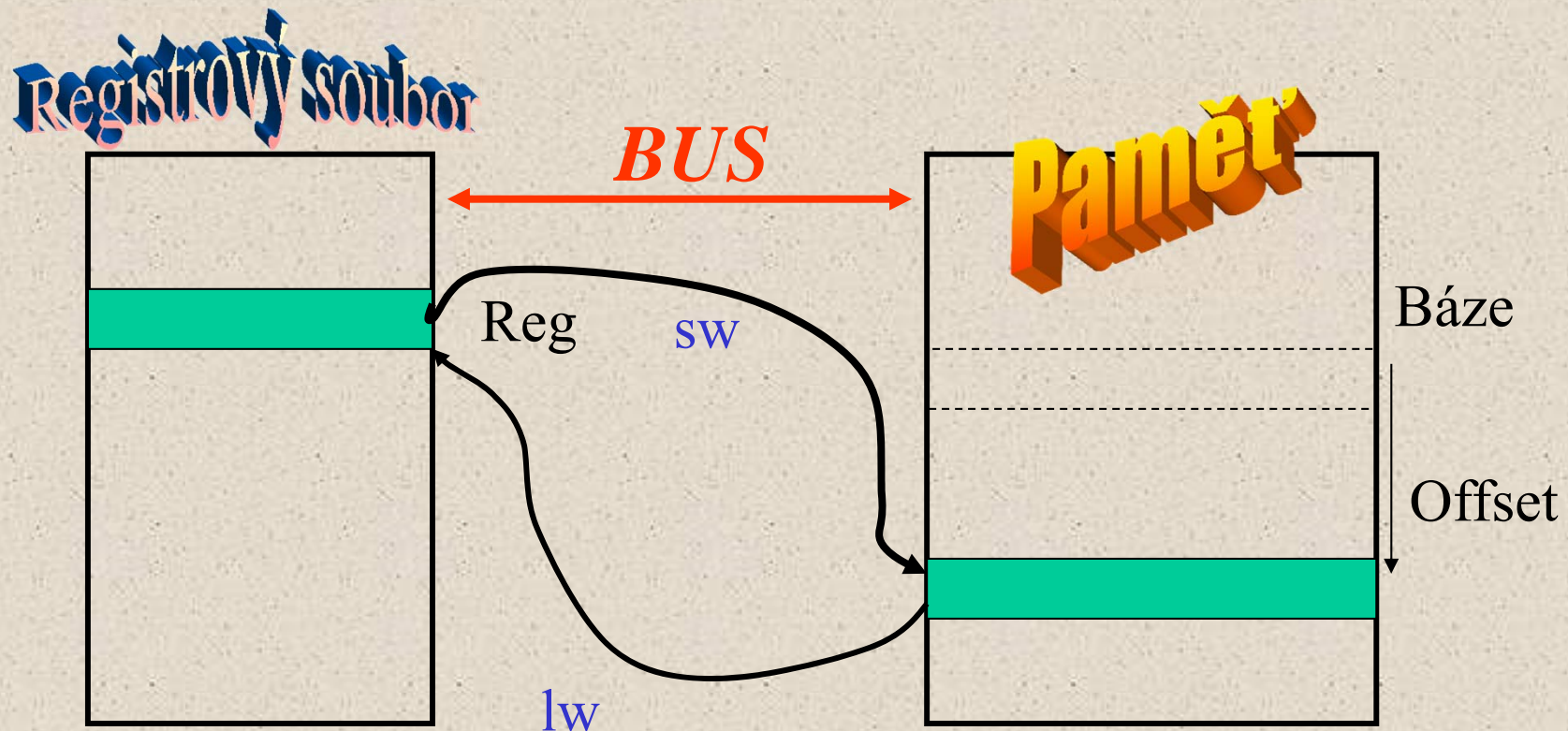
- I/O zařízení jsou velmi různorodá z hlediska
 - Chování – vstup, výstup nebo paměť
 - Partner – člověk nebo stroj
 - Rychlost přenosu dat – špičková rychlost, se kterou jsou data přenášena mezi I/O zařízením a hlavní pamětí nebo procesorem

Zařízení	Chování	Partner	Rychlost přenosu dat (Mb/s)
Klávesnice	vstup	člověk	0.0001
Myš	vstup	člověk	0.0038
Laserová tiskárna	výstup	člověk	3.200
Grafický display	výstup	člověk	800.000-8000.000
Síť/LAN	vstup nebo výstup	stroj	100.000-1000.000
Magnetický disk	paměť	stroj	240.000-2560.000

↑
o 8 řádů rozdíl
↓
rychlost

Konfigurace sběrnice

- Vysílač/Přijímač: Zdroj/Příjemce dat
- Kanál: Cesta pro data nebo instrukce
- Řadič: Master řídí akce sběrnice



Fyzické sběrnice

- **Paralelní sběrnice**

- N paralelních vodičů:
- Výhoda: Rychlé Nevýhoda: Složitost

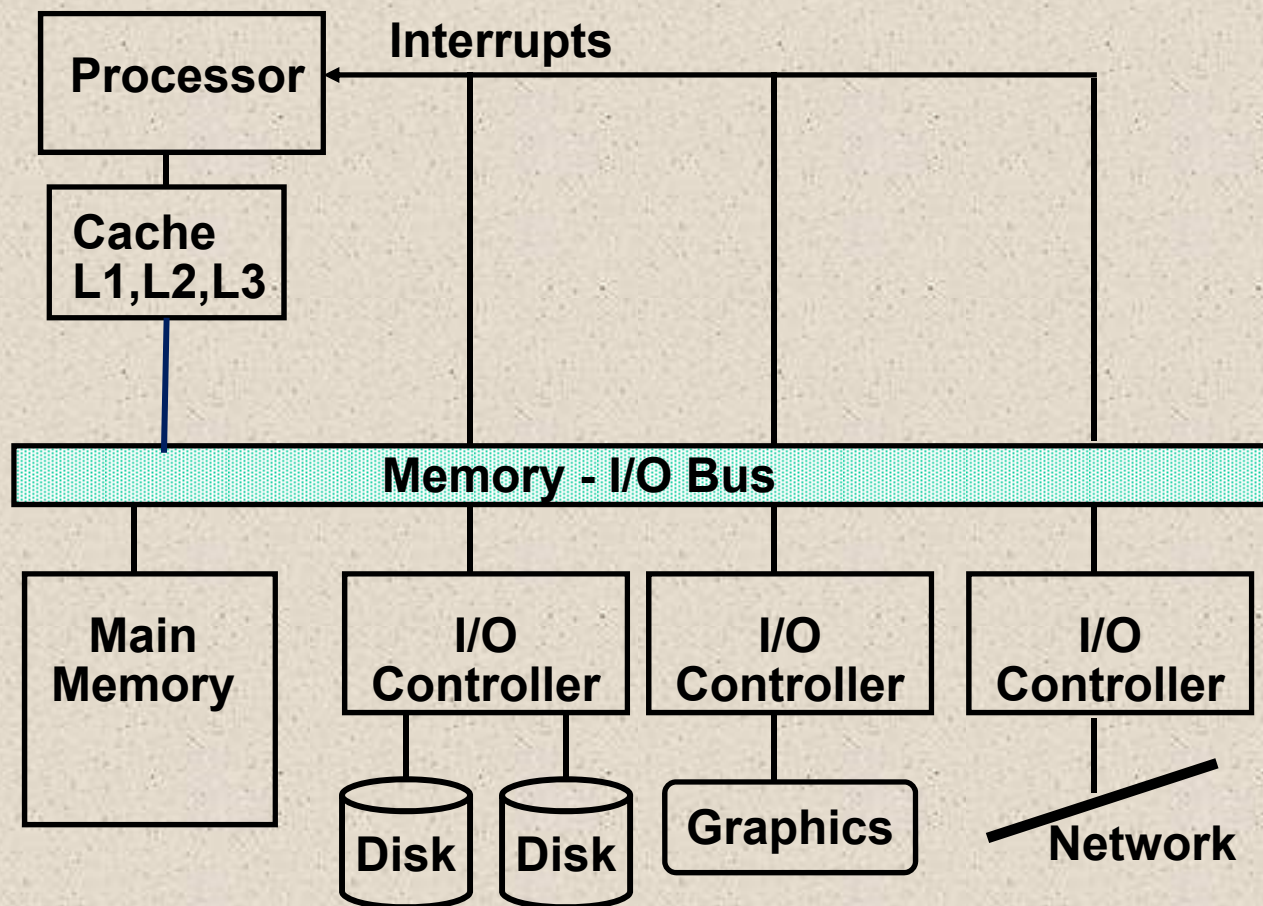


- **Sériové sběrnice**

- Jedna přenosová cesta
- Obvykle *kroucená dvoulinka* (diferenciální vstupy)
- Může být *stíněná* (koaxiální kabel, příklad Ethernet)
- Simplexní komunikace: Jednosměrná
- Duplexní komunikace: Obousměrná
- Problémy: *Kolize (duplex), chyby, výpadky*
- Výhoda: Jednoduchost (?) Nevýhoda: Pomalé (???)

Dnes už příliš neplatí

Typický I/O systém



Přehled organizace I/O zařízení a sběrnic

- Přenos dat a instrukcí
- Paralelní nebo sériové sběrnice
- Různé I/O protokoly
- I/O zařízení se velmi liší
- Rovnice výkonu sběrnice
- Typy organizace I/O
 - Polled: Specifické testy zařízení
 - Interrupt-Driven: Přenos na žádost
 - DMA: Rychlé blokové I/O přenosy DMA kanálem

Typy organizace I/O

1. Polled

- Programová kontrola stavu I/O zařízení a následné plánování činnosti volných I/O zařízení
- *Dotaz na stav (status)* (busy, wait, idle, dead...)

2. Interrupt-Driven

- Obsluha I/O na požadavek, vyjádřený interruptem
- *Vyžaduje **frontu** na uložení čekajících I/O žádostí*

3. Direct Memory Access (DMA)

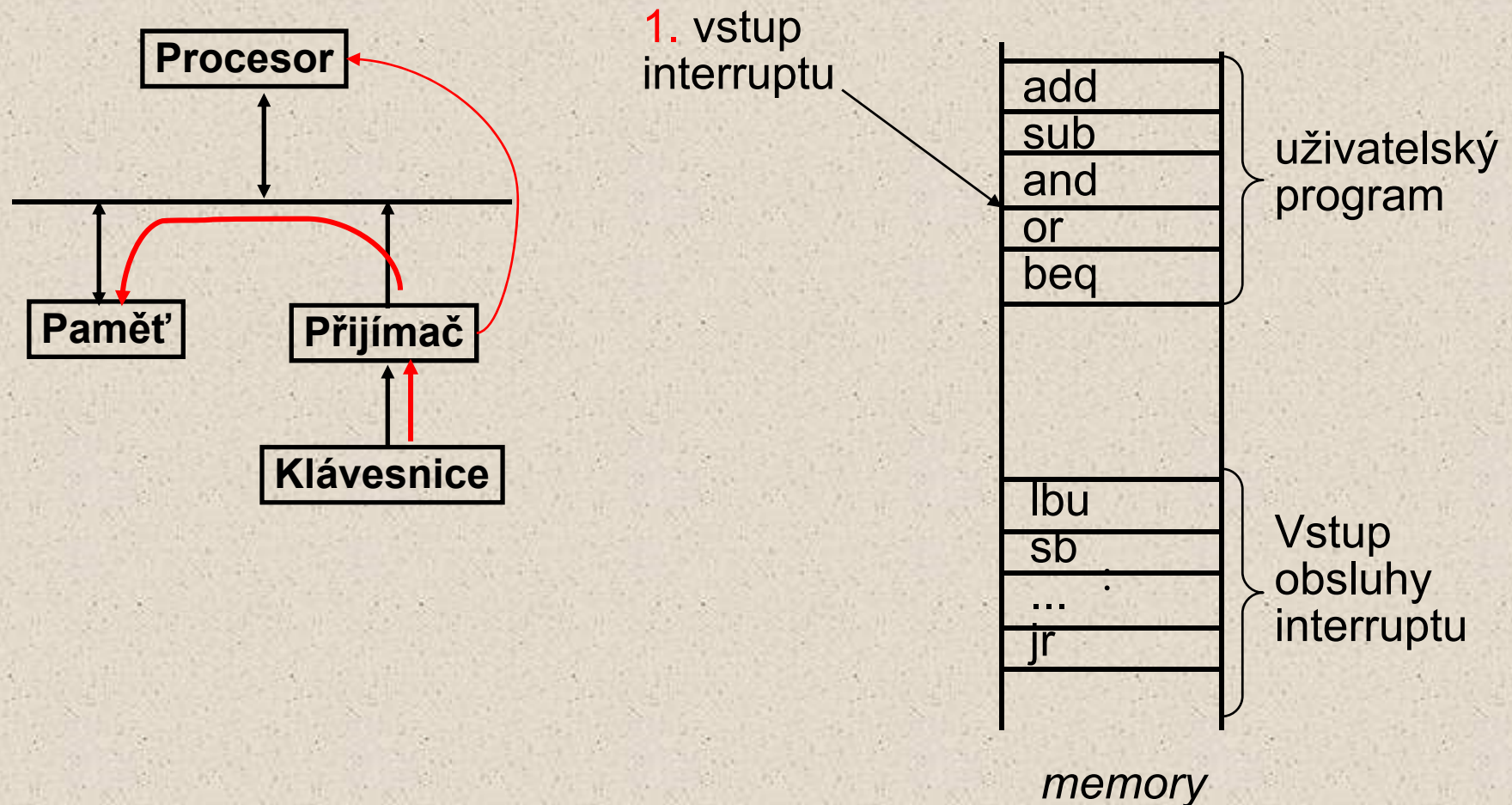
- Přímý přenos dat mezi I/O zařízením a pamětí
- Zajišťuje DMA kanál = zařízení aktivní na sběrnici
- *Velmi rychlé, používá se pro velká množství dat, blokové přenosy, (např., disky, video, audio)*

Registry I/O zařízení zaujímají vlastní adresní prostor nebo bývají mapovány do oblasti paměťového adresního prostoru.

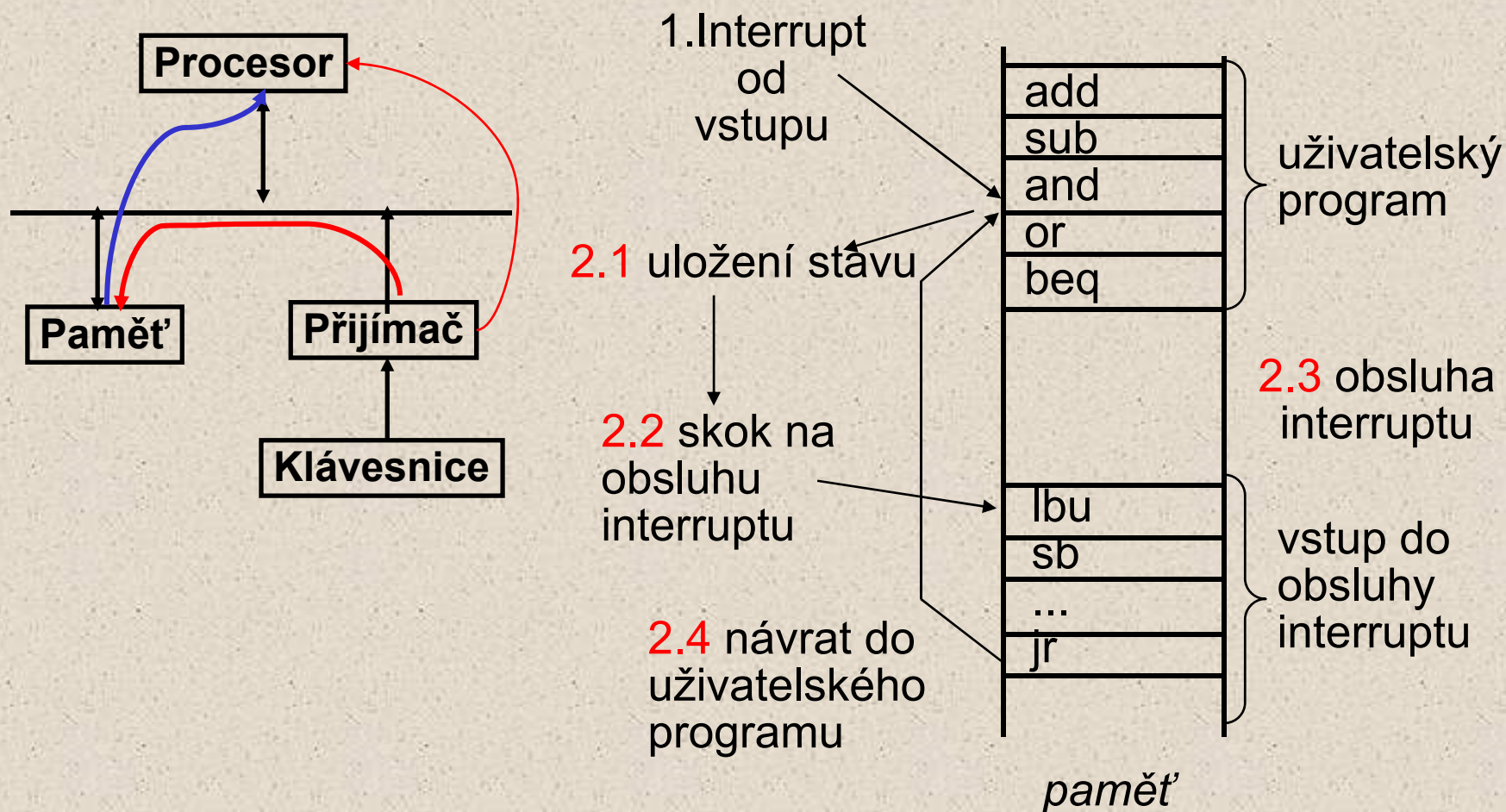
Komunikace I/O zařízení a procesoru

- Jak procesor ovládá I/O zařízení
 - Speciální I/O instrukce
 - Specifikují jak zařízení, tak vlastní příkaz
 - I/O mapované do paměťového prostoru
 - Část adresního prostoru (obvykle horní adresy) je přiřazena I/O zařízením
 - Čtení a zápis na tato paměťová místa se interpretují jako příkazy pro I/O zařízení
 - Čtení a zápis na tyto adresy může provádět jen OS
- Jak procesor komunikuje s I/O zařízeními
 - „Polling“ – procesor periodicky testuje stav I/O zařízení aby zjistil, zda nepotřebuje obsluhu
 - Procesor zajišťuje všechno řízení – vykonává **veškerou** práci
 - Velká ztráta času procesoru vlivem rozdílných rychlostí
 - „Interrupt-driven“ I/O – I/O zařízení způsobí interrupt a tím oznámí procesoru nutnost obsluhy

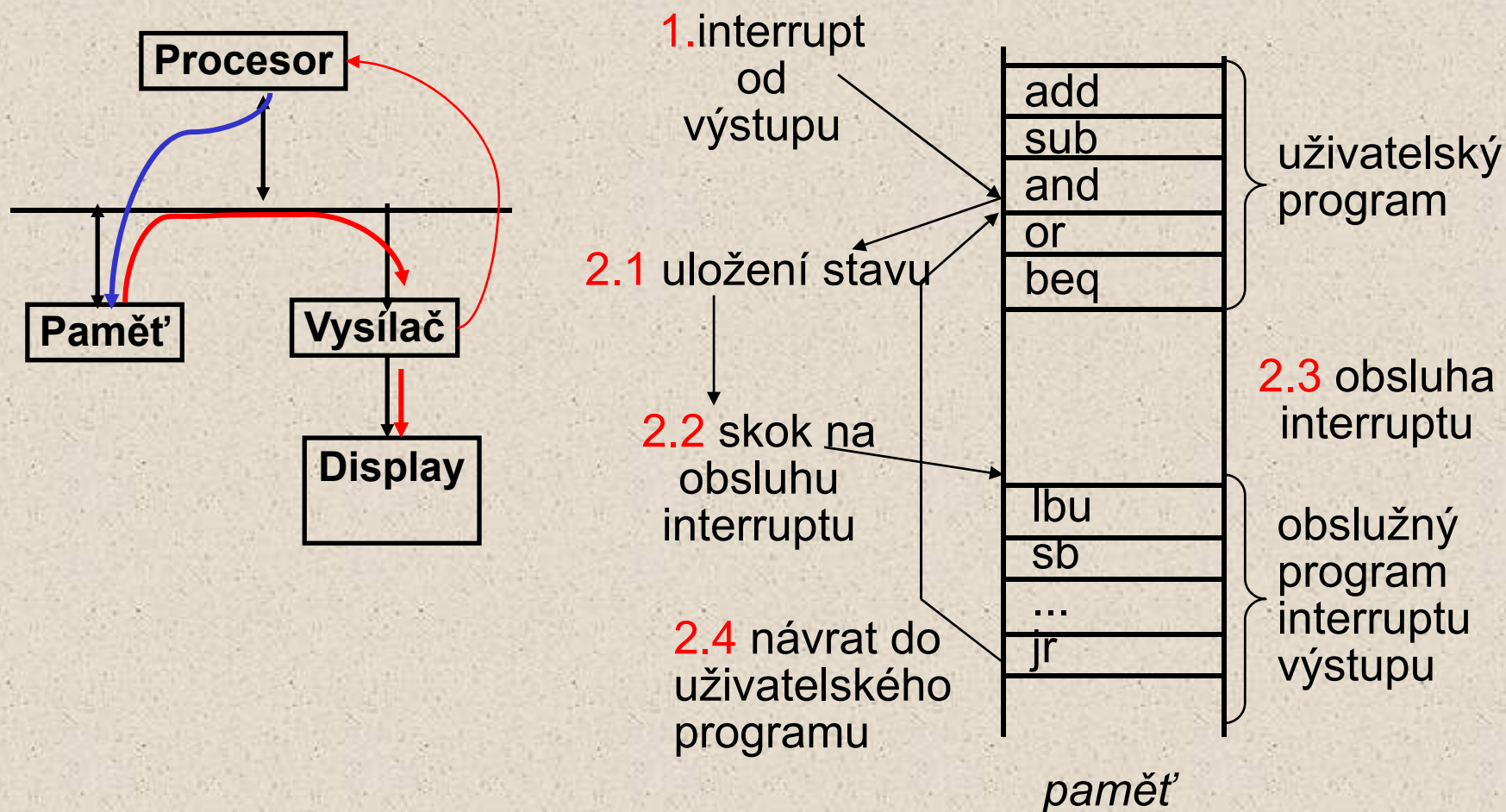
Vstup s využitím interruptů



Vstup s využitím interruptů



Výstup s využitím interruptů



I/O s využitím interruptů

- I/O interrupt je **asynchronní** událost, nezávislá na prováděných instrukcích
 - Není propojena s žádnou instrukcí a neomezuje žádné instrukci v provedení
 - Můžete vlastně vybrat vlastní okamžik, kdy interrupt obsloužit
- S využitím I/O interruptů
 - Způsob, jak identifikovat zařízení, které způsobilo interrupt
 - Mohou být různé stupně důležitosti (organizace pomocí priorit)
- Výhody využití interruptů
 - Procesor nemusí kontinuálně testovat události I/O; pokračování uživatelského programu je pozastaveno jenom během přesunu I/O dat z/do uživatelské paměti
- Nevýhoda – je třeba speciální hardware
 - Generace interruptu (I/O zařízení), jeho detekce a uložení nutné informace tak, aby pak výpočet zase mohl po obsluze interruptu pokračovat.

Přímý přístup do paměti (DMA)

- Pro zařízení s velkou přenosovou rychlostí (např. disky) by interruptový režim pro I/O spotřeboval příliš mnoho cyklů procesoru
- DMA – I/O controller má schopnost přenášet data **přímo** z/do paměti bez účasti procesoru
 1. Procesor inicializuje DMA přenos dodáním I/O adresy zařízení, typu operace, která se má vykonat, adresou do paměti zdroje/určení a počtem bytů, které se mají přenést
 2. I/O DMA řadič řídí celý přenos (i tisíce bytů), přitom soupeří o sběrnici
 3. Když je přenos DMA ukončen, I/O řadič generuje interrupt pro procesor. Tím oznamuje ukončení požadované přenosové operace.
- V jednom systému může pracovat větší počet DMA zařízení
 - Procesor a I/O DMA řadiče soupeří o cykly sběrnice a o paměť

Problém „zastaralých“ dat

- V systémech s cache paměťmi může existovat více kopií jedné položky, jedna v cache, druhá v hlavní paměti
 - Při čtení DMA (z disku do paměti) – procesor použije **stará (již neplatná)** data, jestliže požadovaná data mají svoji kopii v cache
 - Při zápisu DMA (z paměti na disk) a strategii write-back v cache – I/O zařízení dostane **stará** data pokud došlo k modifikaci dat v cache a daný blok nebyl dosud zapsán do hlavní paměti
- Problém koherence lze řešit:
 1. Směřováním všech I/O aktivit přes cache – drahé a velmi redukuje celkový výkon
 2. Jestliže OS selektivně zneplatňuje cache pro I/O čtení a vynucuje zpětné zápisy pro I/O zápis (flushing)
 3. Nutnost hardware pro selektivní zneplatnění nebo vynucení zápisu do hlavní paměti (hardware **snooper**)

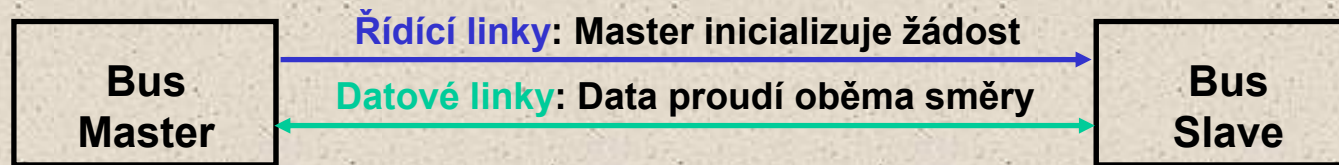
I/O a operační systém

- Operační systém vytváří interface mezi I/O hardwarem a programovými požadavky na I/O
 - Kvůli ochraně **sdílených I/O zdrojů**, nemůže uživatelský program komunikovat přímo s I/O zařízením
- Proto musí být OS schopen dávat příkazy I/O zařízením, obsluhovat přerušení, která I/O zařízení generují, provádět vyvážený přístup ke sdíleným I/O zdrojům a plánovat I/O požadavky tak, aby se optimalizoval výkon celého systému
 - I/O interputy způsobují přechod od zpracování uživatelských procesů k procesům OS

Připojení I/O systému

- **Sběrnice** je sdílená komunikační linka (jednoduchý soubor vodičů, které slouží k propojení subsystémů), propojující celou řadu rozdílných zařízení s různými latencemi a značně rozdílnými přenosovými rychlostmi.
 - Výhody
 - Univerzální – nová zařízení lze snadno přidávat a lze je používat ve více systémech, které používají stejný typ (standard) sběrnice
 - Nízká cena – soubor vodičů je sdílen pro vytvoření mnoha spojů
 - Nevýhody
 - Tvoří „úzké místo“ komunikace – **šířka pásma** sběrnice omezuje maximální **propustnost** I/O
- Maximální rychlost sběrnice je omezena
 - **Délkou** sběrnice (!závisí také na typu - sériová x paralelní)
 - **Počtem** zařízení připojených na sběrnici

Charakteristika sběrnice



- Řídící linky
 - Signály žádosti (request) a zpětného hlášení (acknowledge)
 - Indikace typu informace na datových linkách
- Datové linky
 - Data, adresy a komplexní příkazy
- Transakce na sběrnici se skládá z
 - Master vysílá povel (command) a adresu – žádost (request)
 - Slave přijme (nebo vyšle) data – akce
 - Definováno vzhledem k paměti
 - vstup – vstup dat z I/O zařízení do paměti
 - výstup – výstup dat z paměti do I/O zařízení

Typy sběrnic

- **Sběrnice procesor-paměť** (proprietární)
 - Krátká a vysoká rychlost
 - Přizpůsobena paměťovému systému, aby se maximalizovala přenosová rychlost procesor-paměť
 - Optimalizována pro přenosy bloků do cache
- **I/O sběrnice** (průmyslový standard, např., SCSI, USB, Firewire)
 - Obvykle je delší a pomalejší
 - Musí přizpůsobit velmi rozdílná I/O zařízení
 - Připojena ke sběrnici procesor-paměť a nebo ke sběrnici typu „backplane bus“
- **Backplane bus** (průmyslové standardy, např., ATA, PCI, PCIexpress)
 - „Backplane“ je propojovací struktura spojená s chassis
 - Používá se jako sběrnice, propojující I/O sběrnice a sběrnici procesor-paměť

Synchronní a asynchronní sběrnice

- **Synchronní sběrnice** (např. sběrnice procesor-paměť)
 - Zahrnuje hodiny mezi řídicí linky a má fixní protokol pro komunikaci, který je **vztažený** k hodinám
 - Výhoda: Obsahuje málo logiky a dosahuje vysoké rychlosti
 - Nevýhody:
 - Každé zařízení, komunikující na sběrnici musí používat stejnou frekvenci
 - Aby se zamezilo „skew“ hodin, nemůže být dlouhá, má-li pracovat rychle
- **Asynchronní sběrnice** (např. I/O sběrnice)
 - Není taktována, proto vyžaduje **handshaking** protokol a přídatné řídicí linky (ReadReq, Ack, DataRdy)
 - Výhody:
 - Může zahrnout široké spektrum zařízení a přenosových rychlostí
 - Větší délka, aniž vzniknou problémy se „skew“ hodin nebo se synchronizací
 - Nevýhoda: nižší rychlost

Fyzické vs. logické I/O sběrnice

- **Fyzické sběrnice**

- *Instalováno v počítačích: sběrnice ISA, PCI, AGP pro grafické karty*
- *Limitována velikost a spotřeba el. výkonu*
- *Výkon omezen šířkou sběrnice, rychlostí řadiče*

- **Logické I/O (rekonfigurovatelné sběrnice)**

- Používají fyzické sběrnice, které mohou být různě konfigurovány
- *Vhodné pro maximální využití sběrnice*
- *CPU se chová jako kdyby měla variabilní sběrnice*
- Rekonfigurace sběrnic – přizpůsobení aktuálním I/O požadavkům
- *Vyžaduje komplexní řadič sběrnice a plánovací software*

Příklad výkonnosti I/O systému

- Zátěž disku představuje 64 KB čtení a zápisů, kde uživatelský program provede $2 \cdot 10^5$ instrukcí na jednu diskovou I/O operaci a
 - procesor s výkonem $3 \cdot 10^9$ instr/s a průměrně 10^5 instrukcí OS na provedení jedné diskové I/O operace

Maximální rychlost diskových I/O operací (# I/O/sec) procesoru je rovna:

- Sběrnice I/O-paměť dosahuje přenosovou rychlost 1000 MB/s

Každá disková I/O čte nebo zapisuje 64 KB, takže maximální rychlost I/O sběrnice je:

- Diskové SCSI I/O kontroléry DMA s přenosovou rychlostí 320 MB/s, které obsluhují až 7 disků/kontrolér
- Diskové jednotky s přenosovou rychlostí (při operaci read/write) 75 MB/s a střední přístupovou dobou latence 6 ms

Jaká je maximální dosažitelná rychlost I/O a jaký je počet disků a SCSI kontrolérů potřebných pro dosažení této rychlosti?

Příklad výkonnosti I/O systému

- Zátěž disku představuje 64 KB čtení a zápisů, kde uživatelský program provede $2 \cdot 10^5$ instrukcí na jednu diskovou I/O operaci a
 - procesor s výkonem $3 \cdot 10^9$ instr/s a průměrně 10^5 instrukcí OS na provedení jedné diskové I/O operace

Maximální rychlost diskových I/O operací (# I/O/sec) procesoru je rovna:

$$\frac{\text{Instr execution rate}}{\text{Instr per I/O}} = \frac{3 \times 10^9}{(2 + 1) \times 10^5} = 10,000 \text{ I/O's/s}$$

- Sběrnice I/O-paměť dosahuje přenosovou rychlost 1000 MB/s

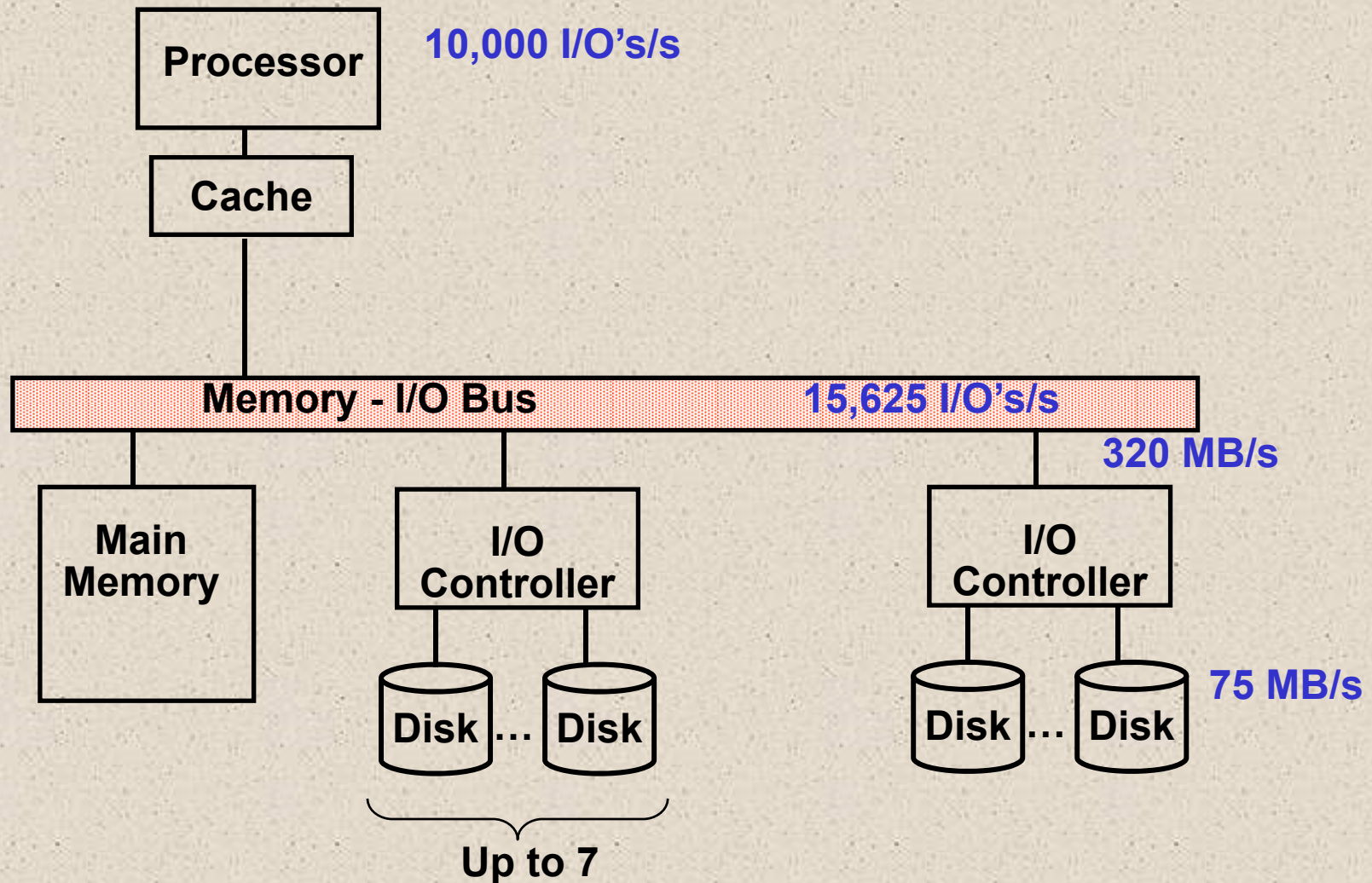
Každá disková I/O čte nebo zapisuje 64 KB, takže maximální rychlost I/O sběrnice je:

$$\frac{\text{Bus bandwidth}}{\text{Bytes per I/O}} = \frac{1000 \times 10^6}{64 \times 10^3} = 15,625 \text{ I/O's/s}$$

- Diskové SCSI I/O kontroléry DMA s přenosovou rychlostí 320 MB/s, které obsluhují až 7 disků/kontrolér
- Diskové jednotky s přenosovou rychlostí při read/write 75 MB/s a střední přístupovou dobou latence 6 ms

Jaká je maximální dosažitelná rychlost I/O a jaký je počet disků a SCSI kontrolérů potřebných pro dosažení této rychlosti?

Příklad diskového I/O systému



Příklad výkonnosti I/O systému (pokračování)

Procesor je nejslabším místem, nikoliv sběrnice

- disková mechanika se šířkou pásma pro operace (read/write) 75 MB/s a střední dobou latence přístupu 6 ms (seek + rotace)

Doba I/O operace disku (read/write) = seek + rotational time + transfer time =
 $6\text{ms} + 64\text{KB}/(75\text{MB/s}) = 6.9\text{ms}$

Proto každý disk může provést $1000\text{ms}/6.9\text{ms} = 146$ I/O's za sekundu.

Saturování procesoru vyžaduje 10,000 I/O's za sekundu nebo-li

$$10,000/146 = 69 \text{ disků}$$

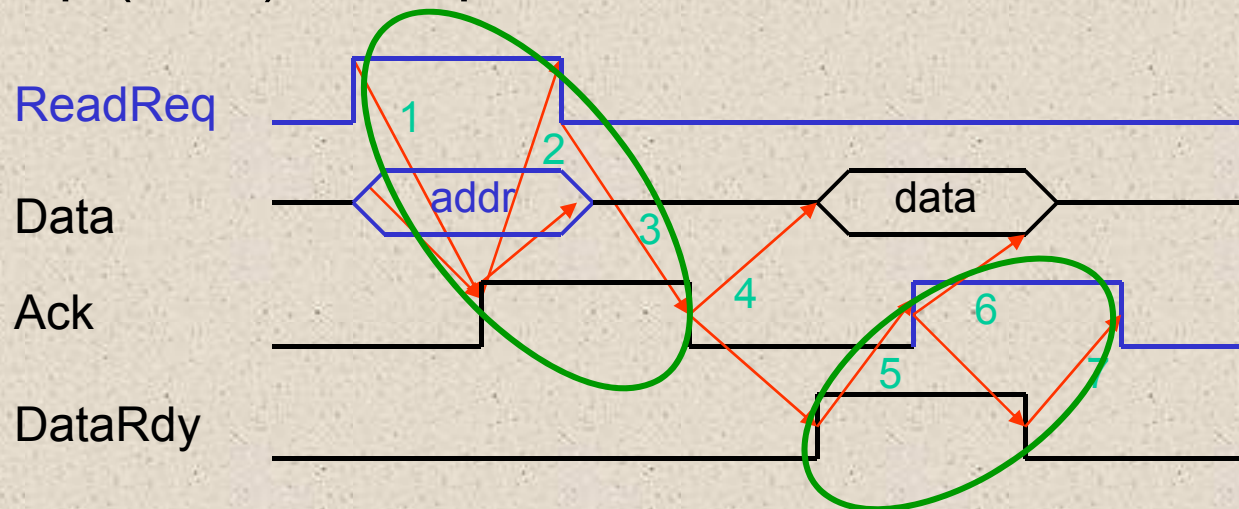
Pro výpočet počtu SCSI diskových kontrolérů potřebujeme znát střední přenosovou rychlost jednoho disku, abychom určili, zda můžeme připojit maximální počet 7 disků na SCSI kontrolér a že diskový kontrolér nebude saturovat sběrnici IO-paměť během DMA přenosu.

Přenosová rychlost disku = (velikost bloku)/(doba přenosu) = $64\text{KB}/6.9\text{ms} = 9.56 \text{ MB/s}$

Proto 7 disků nebude saturovat ani SCSI kontrolér (s maximální přenosovou rychlostí 320 MB/s), ani sběrnici I/O-paměť (1000 MB/s). To znamená – budeme potřebovat $69/7$ tedy 10 SCSI kontrolérů.

Protokol asynchronní sběrnice (handshaking)

❑ Výstup (read) dat z paměti na I/O zařízení



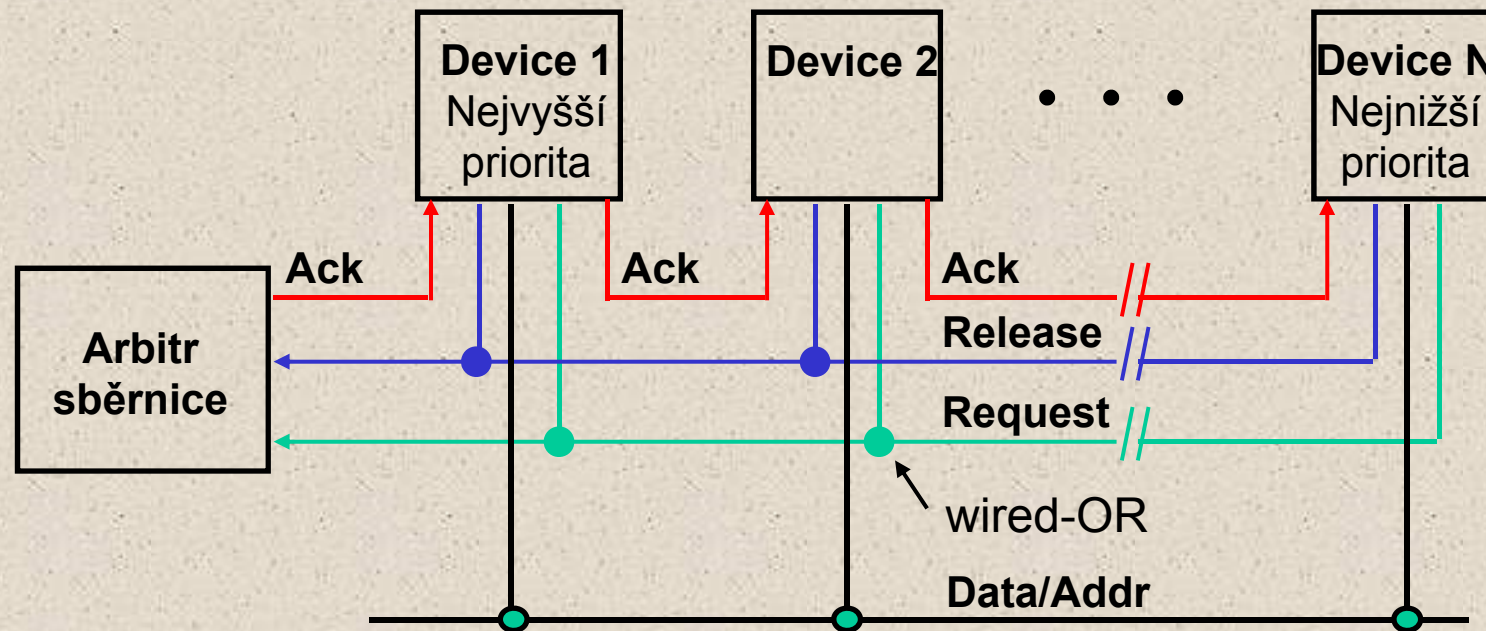
Zařízení I/O oznamuje požadavek nastavením **ReadReq** a vydáním **addr** na datových linkách.

1. Paměť dostane **ReadReq**, převezme **addr** z datových linek a aktivuje Ack
2. Zařízení I/O reaguje na Ack, uvolňuje ReadReq a datové linky
3. Paměť zjistí sestupnou hranu **ReadReq** a deaktivuje Ack
4. Když paměť dokončí čtení, umístí data na datové linky a aktivuje DataRdy
5. Zařízení I/O zjistí DataRdy, sejme data z datových linek a aktivuje Ack
6. Paměť zjistí aktivní Ack, uvolní datové linky a deaktivuje DataRdy
7. Zařízení I/O reaguje na sestupnou hranu DataRdy deaktivací Ack

Arbitrace sběrnice

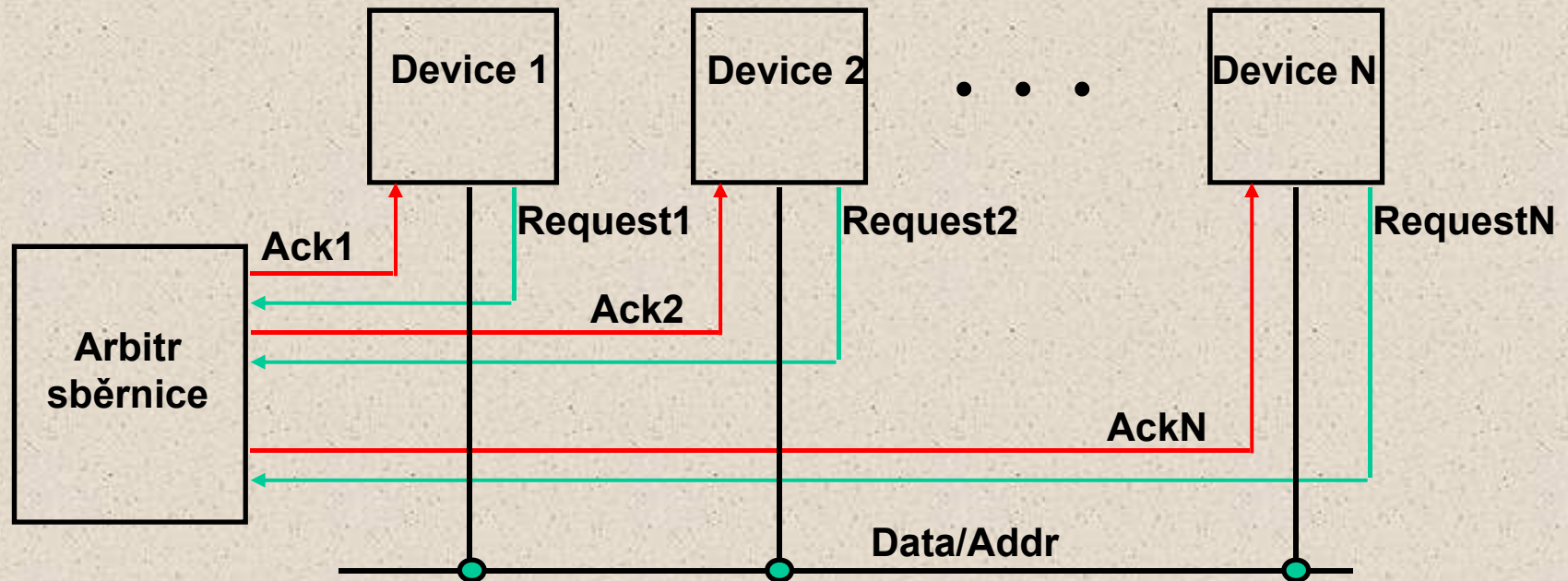
- Sběrnici může být schopno současně řídit větší množství zařízení => nutnost arbitrovat požadavky
- Arbitrační schémata se snaží zohledňovat:
 - Bus priority – zařízení nejvyšší priority by mělo být obslouženo nejdříve
 - „Fairness“ – i zařízení s nejnižší prioritou nesmí být odříznuto od sběrnice
- Arbitrační mechanismy sběrnic lze dělit do čtyř tříd:
 - „Daisy chain“ arbitrace (jinak „postupná obsluha“) – další snímky
 - Centralizovaná, paralelní arbitrace – další snímky
 - Distribuovaná arbitrace (self-selection) – každé zařízení, které se uchází o sběrnici vydává identifikační kód na sběrnici
 - Distribuovaná arbitrace s detekcí kolize – zařízení využije sběrnici pokud je volná a nastane-li kolize (protože i jiná zařízení se mohou rozhodnout stejně), potom zařízení pokus opakuje později (Ethernet)

„Daisy Chain“ arbitrace



- Výhoda: jednoduchost
- Nevýhody:
 - Nelze zajistit „spravedlnost“ – zařízení nízké priority mohou být trvale blokována
 - Pomalé – „daisy chain“ signál omezuje rychlost procesu přidělování

Centralizovaná paralelní arbitrace



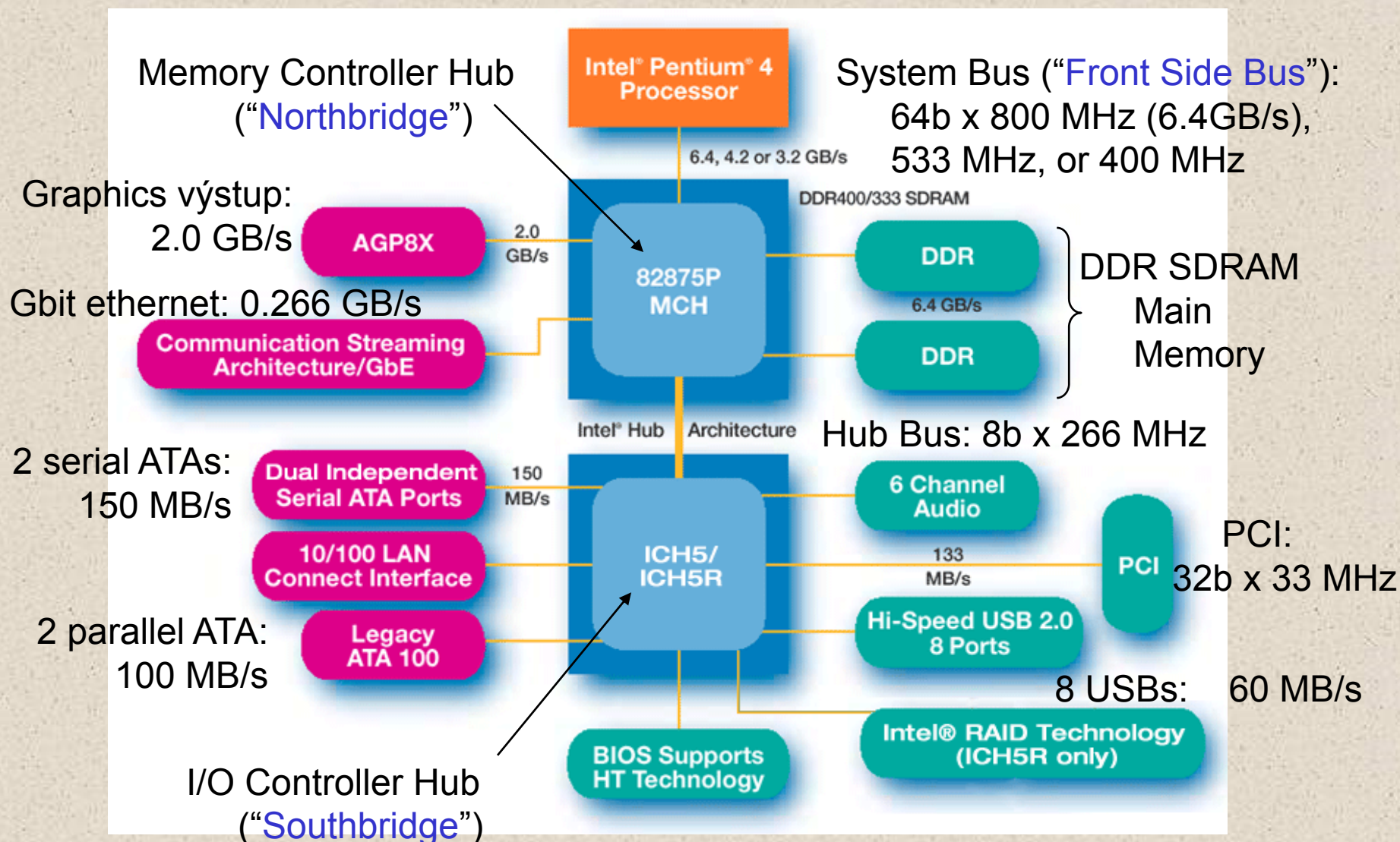
- Výhody: flexibilní, může zajistit „spravedlnost“
- Nevýhody: složitější hardware arbitru
- Používáno hlavně u všech sběrnic procesor-paměť a u rychlých I/O sběrnic

Šířka pásma sběrnice

- Šířku pásma sběrnice ovlivňuje:
 - Zda se jedná o asynchronní nebo synchronní sběrnici a dále pak charakteristika použitého protokolu
 - Šířka sběrnice
 - Zda sběrnice podporuje blokové přenosy nebo nikoliv

	Firewire	USB 2.0
Typ	I/O	I/O
Datové linky	4	2
Časování	Asynchronní	Synchronní
Max. # zařízení	63	127
Max. délka	4.5 metru	5 metrů
Špičkový přenosový výkon (šířka pásma)	50 MB/s (400 Mbps) 100 MB/s (800 Mbps)	0.2 MB/s (low) 1.5 MB/s (full) 60 MB/s (high)

Příklad: Sběrnice Pentia 4



Sběrnice z hlediska vývoje

- Výrobci dříve přecházeli od asynchronních sběrnic k synchronním, dnes od *širokých* synchronních k *úzkým* asynchronním sběrnicím.
 - Odrazy na vedeních a *skew hodin* nedovolují zvyšovat hodinové frekvence u sběrnic, kde se používá 16 až 64 paralelních vodičů (nad ~400 MHz). Proto výrobci přecházejí na úzké jednosměrné s vysokou hodinovou frekvencí (~2 GHz)

	PCI	PCIexpress	ATA	Serial ATA
Celkový # vodičů	120	36	80	7
# datových linek	32 – 64 (obousměrné)	2 x 4 (jednosměrné)	16 (obousměrné)	2 x 2 (jednosměrné)
Hodiny (MHz)	33 – 133	635	50	150
Špičkový BW (MB/s)	128 – 1064	300	100	375 (3 Gbps)

Pozn.: PCIe má v současné době celou řadu dalších rychlejších variant, viz www.pcisig.org

Měření výkonu I/O

- **Šířka pásma I/O** (propustnost) – množství informace, která prochází vstupem (výstupem) a propojovací strukturou (např. sběrnici) k procesoru/paměti (I/O zařízení) za jednotku času
 1. Kolik dat můžeme přesunout v systému za určitou dobu?
 2. Kolik I/O operací můžeme provést za jednotku času?
- **Doba odezvy I/O** (latence) – celková doba nutná k provedení vstupní nebo výstupní operace
 - Zvláště důležitá metrika pro systémy pracující v reálném času
- Mnoho aplikací vyžaduje obojí – vysokou propustnost a krátkou dobu odezvy

Výkon I/O systému

- Návrh I/O systému aby vyhověl požadavkům na šířku pásma a/nebo požadavkům na latence
 1. Nalezení „nejslabší“ linky v I/O systému – prvek, který způsobuje omezení
 - Procesor a paměťový systém?
 - Propojovací struktura (např., sběrnice) ?
 - I/O kontroléry ?
 - I/O zařízení sama o sobě ?
 2. (Re)konfigurace nejslabšího prvku tak, aby byly splněny požadavky na šířku pásma a/nebo požadavky na latence
 3. Určení požadavků na zbylé části a jejich (re)konfigurace tak, aby byly splněny požadavky na šířku pásma a/nebo požadavky na latence

Výkonové parametry sběrnice

- Šířka pásma nebo propustnost
 - *Kolik dat lze přenést sběrnici za jednotku času (jednotka = bity za sekundu)*
- Četnost poruch a cena
 - Četnost: ~ Pravděpodobnost poruchy sběrnice
 - Cena: *Kolik stojí restart*
 - Sběrnice se musí **zotavit** (cykly sběrnice, x bitů na cykl)
 - Opakování vadných paketů (bity, které se musí opakovat)
- Četnost chyb a cena
 - Podobné jako četnost poruch

Rovnice výkonu sběrnice

- Předpoklady
 - Šířka pásma (**B**), četnost bitových chyb (**BER**)
 - Četnost poruch (**FR**), cena poruch (**FC**)
- Výpočet aktuální šířky pásma (**B'**)

$$B' = B * \frac{(1-BER) - FC/(1-FR)}{1}$$

Vliv chyb

Error

Vliv poruch

Failure

Výkon sběrnice - příklad #1

- Předpoklady

- Nominální šířka pásma: 32 MHz, 32 bitů paralelně
- Četnost poruch = 10^{-4} ; Cena poruchy = 0.2 Mbps
- Četnost bitových chyb = 10^{-6}

- Výpočet aktuální šířky pásma (B')

$$\begin{aligned} B' &= B * (1-BER) - FC/(1-FR) \\ &= 32\text{bitů} * (32 * 10^6 \text{ Hz}) * (0.999999) \\ &\quad - (0.2 * 10^6 \text{ bps} / 0.9999) \\ &= 1.023999 \text{ Gbps} - 0.20002 \text{ Mbps} \\ &= 1023.799 \text{ Gbits/sec} = 0.02\% \text{ snížení} \end{aligned}$$

Výkon sběrnice - příklad #2

- Předpoklady

- Nominální šířka pásma: 32 MHz, 32 bitů paralelně
- Četnost poruch = 10^{-1} ; Cena poruchy = 0.2 Mbps
- Četnost bitových chyb = 10^{-6}

- Výpočet aktuální šířky pásma (B')

$$\begin{aligned} B' &= B * (1-BER) - FC/(1-FR) \\ &= 32\text{bitů} * (32 * 10^6 \text{ Hz}) * (0.999999) \\ &\quad - (0.2 \times 10^6 \text{ bps} / 0.9) \\ &= 1.023999 \text{ Gbps} - 0.2222 \text{ Mbps} \\ &= 1023.7768 \text{ Gbitů/sek} = 0.03\% \text{ snížení} \end{aligned}$$

Výkon sběrnice - příklad #3

- Předpoklady

- Nominální šířka pásma: 32 MHz, 32 bitů paralelně
- Četnost poruch = 10^{-1} ; Cena poruchy = 0.2 Mbps
- Četnost bitových chyb = 10^{-3}

- Výpočet aktuální šířky pásma (B')

$$\begin{aligned} B' &= B * (1-BER) - FC/(1-FR) \\ &= 32\text{bitů} * (32 * 10^6 \text{ Hz}) (0.999) \\ &\quad - (0.2 \times 10^6 \text{ bps} / 0.9) \\ &= 1.022976 \text{ Gbps} - 0.2222 \text{ Mbps} \\ &= 1023.7538 \text{ Gbps} = 0.23\% \text{ snížení} \end{aligned}$$

Výkon sběrnice - realita

- Problémy

(BW ... BandWidth)

- Kolize na sběrnici: Pakety používají stejný HW
- Simplex: Méně kolizí, Duplex: Více kolizí

- Některé praktické výsledky testů

PCI: 32 bitů paralelně na 32 MHz (128MB/s)

Nominální BW = 1K MHz ~ 1GHz

Simplex: 70 - 80% of BW

Duplex: 20 - 40% of BW

např., duplex => 25 to 50 MB/s

Sběrnice: Aplikace => Požadavky

- **Aplikace**
 - Obrázky: $M*N$ pixelů v rámci, K bitů na pixel
 - Video: F rámců za sekundu
- **Složitost = $O(M*N*K*F)$ bitů za sekundu**
 - Reálně:** $M, N = 1024, K = 24 \text{ bpp}, F = 30 \text{ fps}$
 $MNKF = 1\text{M} (720) = 720 \text{ Mbitů/sec}$
 - Simplex:** $720 \text{ Mbps} / 0.7 \Rightarrow B = 1.03 \text{ Gbps}$
 - Duplex:** $720 \text{ Mbps} / 0.3 \Rightarrow B = 2.4 \text{ Gbps}$

Důsledek: Pro zpracování obrazů jsou
třeba *velmi rychlé* sběrnice

Technologie sběrníc

- **Současné:**
 - Měděné vodiče, cesty **na PCB** (2-8 GHz)
 - Koaxiální, Fiber optic Internet (2 Gbps - ...)
- **Rozšiřuje se:**
 - **Optický přenos volným prostorem:** 20+ Gbps
 - BW omezena šířkou pásma by vysílače/přijímače
 - Problémy s atmosférickými vlivy rozptyl & absorpce
 - **“Vše opticky”**
 - Nelze doslova – vždy je třeba nějaké elektronika a optoelektronika
 - Rychlost omezena šířkou pásma použité elektroniky
- **V dohlednu:** Fiber Optic (rychlé, levné)

Závěr

- I/O ovlivňuje přenos dat:
 - Dělením toku dat do bloků nebo paketů
 - Vysíláním datových paketů sériově po sběrnici
 - Udržováním I/O sběrnice na plném výkonu (obsazena) pro dosažení *maximálního výkonu I/O systému*
- Rekonfigurovatelné sběrnice jsou výhodné, protože:
 - Různé aplikace mají různé nároky na I/O
 - Konfigurací může být sběrnice přizpůsobena těmto požadavkům