



OSNOVE RAČUNALNIŠKE ARHITEKTURE II

12 Vhod in izhod

- Zmogljivost računalniškega sistema je skoraj vedno omejena z zmogljivostjo vhoda/izhoda, kar se odraža tudi v Case/Amdahlovih pravilih.

- V/I sistem računalnika sestavljajo tri vrste komponent:
 - V/I (periferne) naprave
 - Krmilniki
 - Programi za izvajanje V/I operacij

- Pri V/I napravah imamo dve skupini naprav:
 - Za prenos med CPE in glavnim pomnilnikom ter zunanjim svetom
 - Pomožni pomnilniki

- Pri priključitvi V/I naprav je treba zagotoviti tri funkcije:
 - Izbiro ali naslavljanje V/I naprave, ki naj izvrši operacijo
 - Preverjanje stanja ali pripravljenosti izbrane V/I naprave
 - Prenos podatkov v ali iz izbrane V/I naprave

- Osnovna V/I operacija je prenos določene količine podatkov iz glavnega pomnilnika v V/I napravo ali obratno.

12.1 Vrste in lastnosti V/I naprav

- Naprave za prenos informacij med CPE in glavnim pomnilnikom ter zunanjim svetom:
 - Tipkovnice
 - Miške
 - Zasloni
 - Tiskalniki
 - Modemi
 - Telekomunikacijske linije
 - Senzorji
 - Aktuatorji
 - . . .

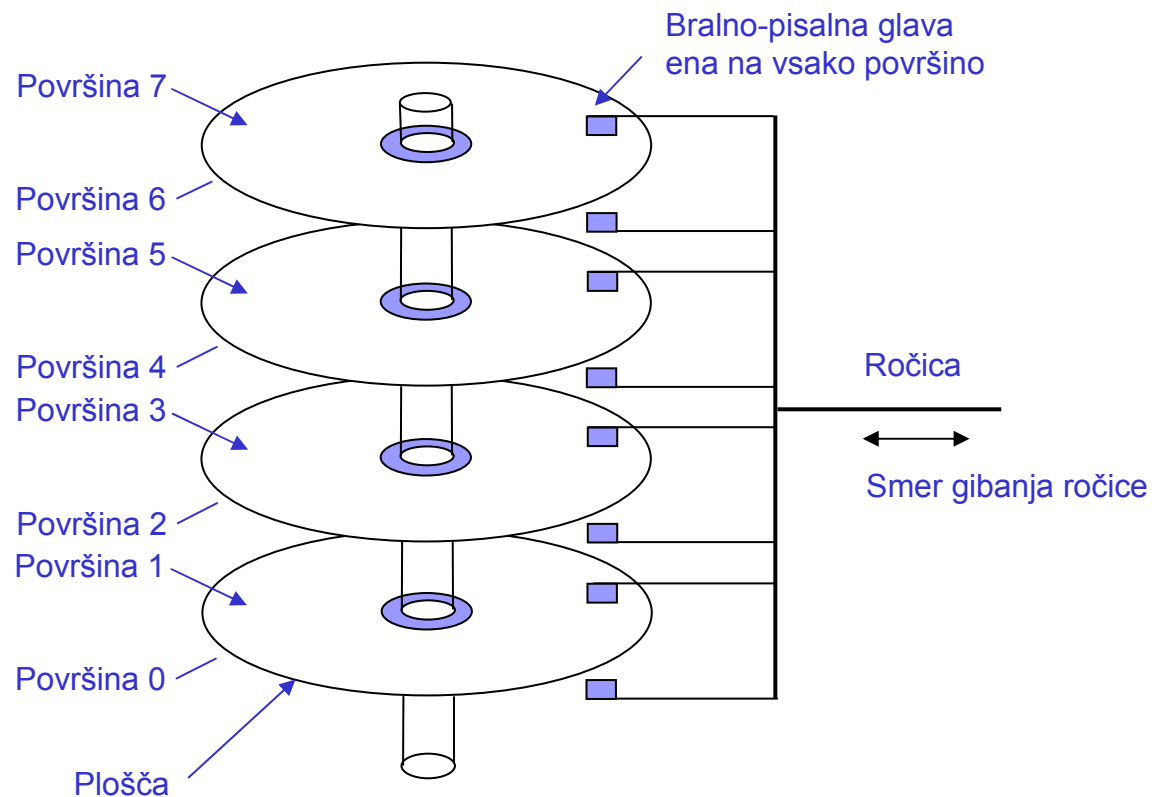
- Pomožni pomnilniki:
 - Magnetni trakovi
 - Magnetni diski
 - Trdi diski
 - Gibki diski (diskete)
 - Optični diski
 - Flash diski
 - USB flash pomnilniki
 - ...

Magnetni diski

- Magnetni diski so od leta 1950 dalje najpomembnejša vrsta pomožnega pomnilnika.

- Vrteča se plošča, ki je prevlečena z magnetno snovjo, za shranjevanje in branje informacij se uporablja premična bralno-pisalna glava.
 - Gibki disk - plošča je iz mehke plastike, bralno-pisalna glava se pri branju ali pisanju dotika površine plošče
 - Trdi disk - plošča (ali več plošč) je iz trdega materiala, danes steklo, prej aluminij. Ko se disk vrti, bralno-pisalna glava lebdi na zračni blazini nad površino diska (premer 3,5 ali 2,5 palca, . . .)

Magnetni disk s štirimi ploščami in osmimi površinami

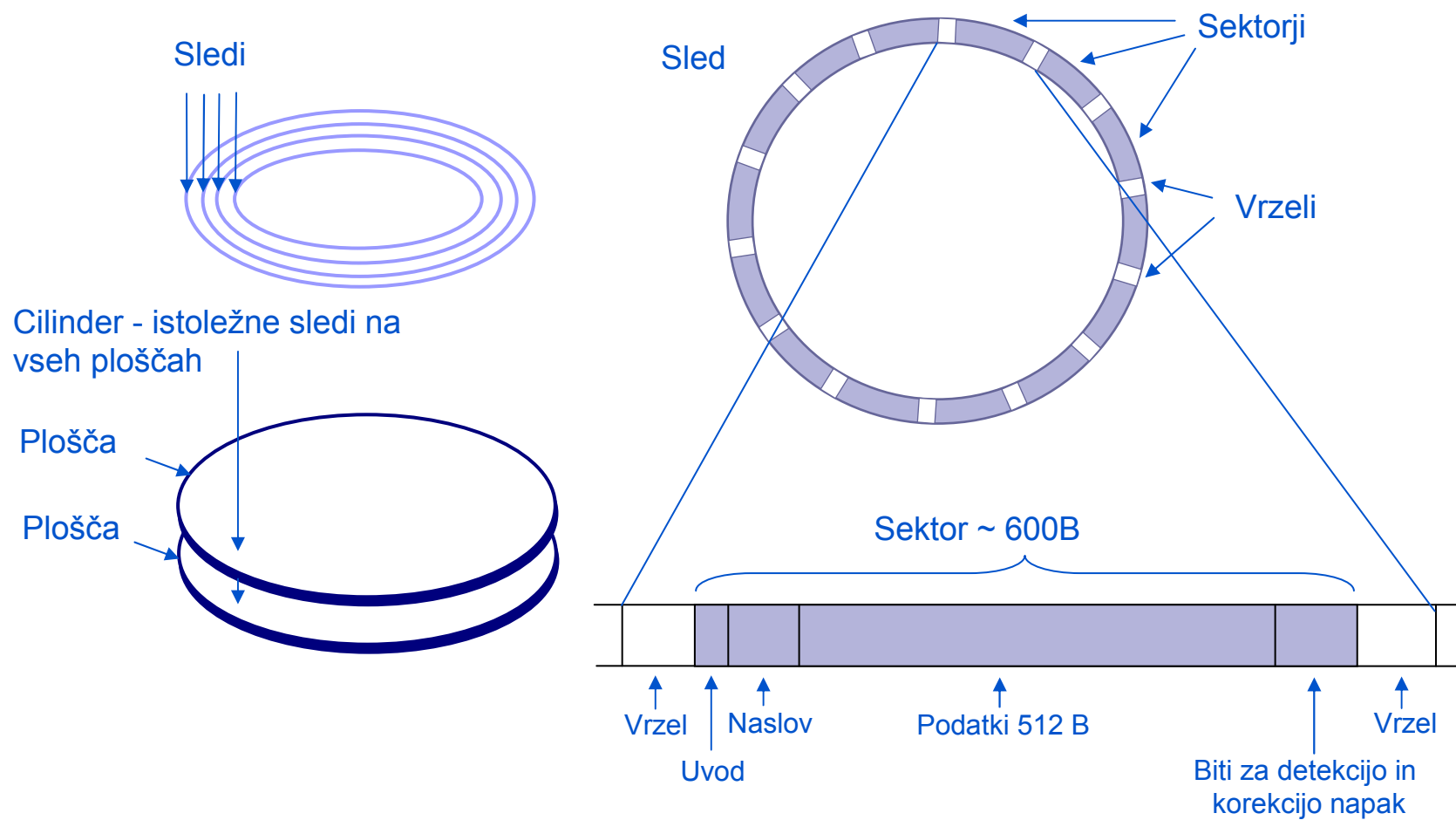


Magnetni diski

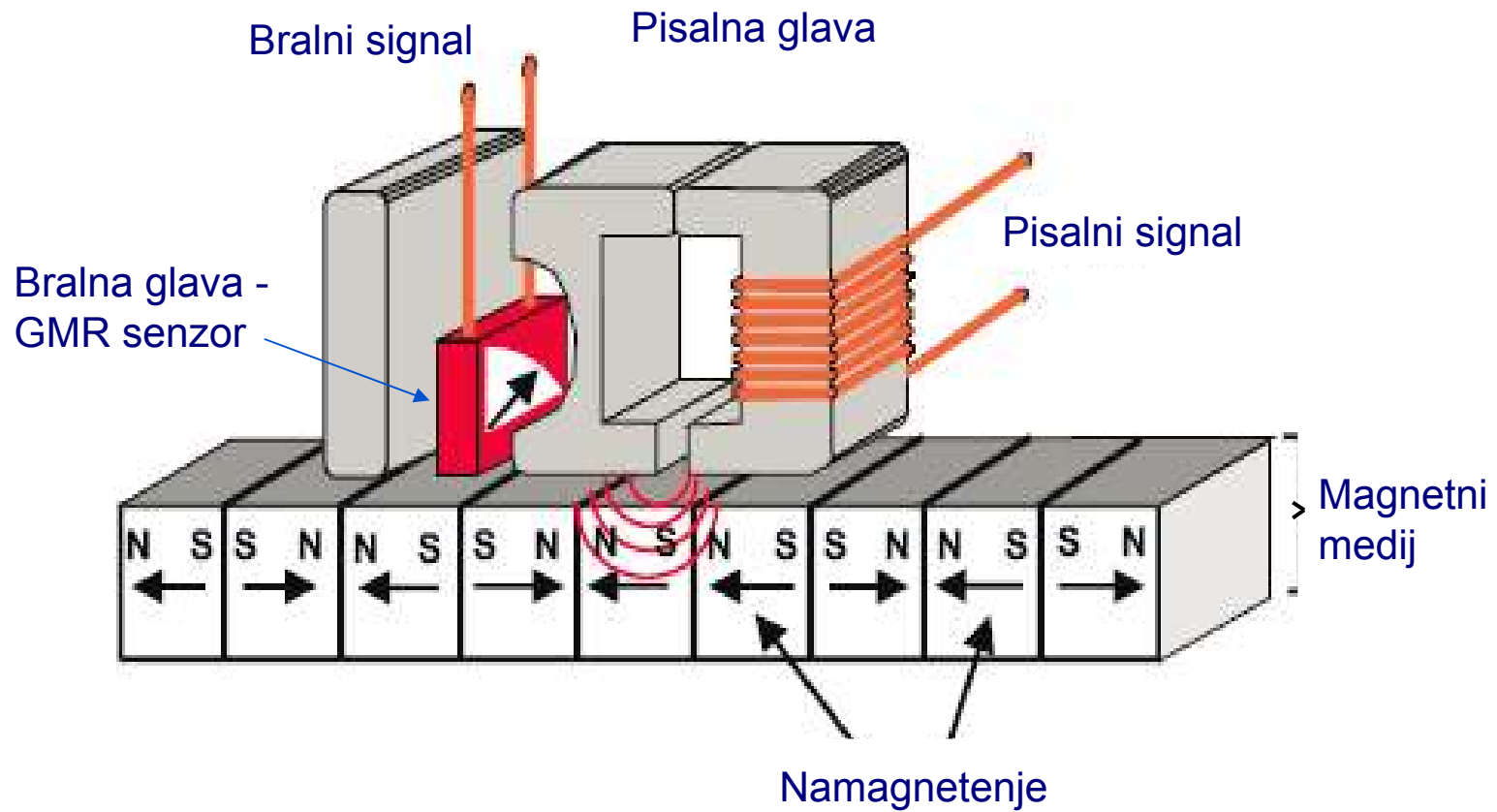


© mmi

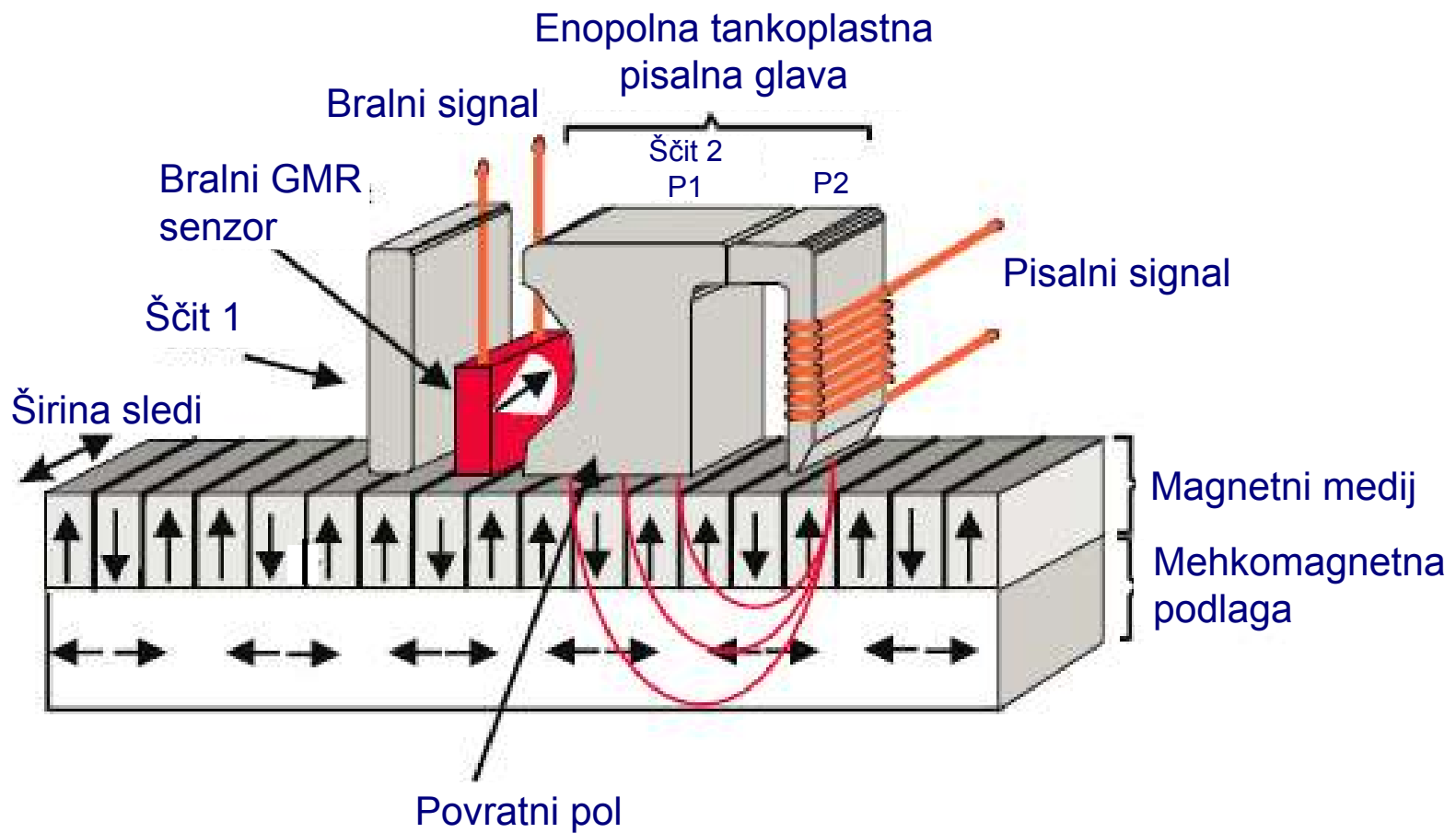
Organizacija podatkov na disku



Longitudinalno (vzdolžno) zapisovanje



Perpendicular (vertikalno) zapisovanje



■ Gostota zapisa:

- Gostota sledi (Track density) - število sledi na enoto dolžine (tpi - tracks per inch)
- Linearna gostota (Linear density) - število bitov vzdolž sledi na enoto dolžine (bpi - bits per inch)
- Površinska gostota (Areal density) - število bitov na enoto površine (bpi² - bits per inch²)

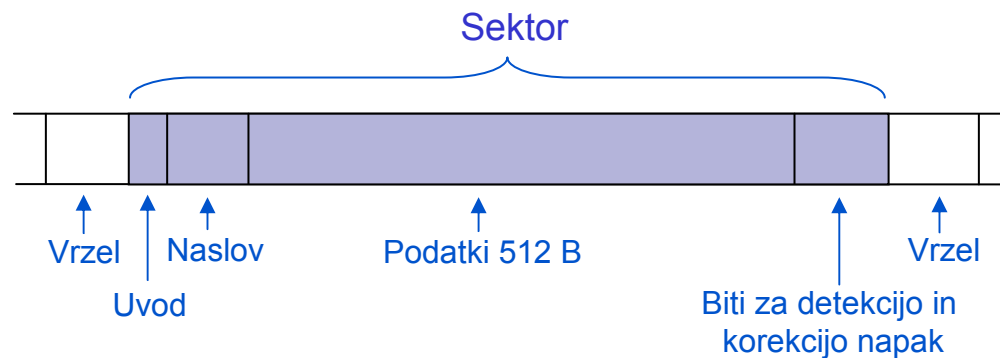
■ Površinska gostota = Gostota sledi x Linearna gostota

■ Površinska gostota pri današnjih diskih je približno 100Gb/palec² (= 155Mb/mm²)

- 1 palec (inča) = 25,4 mm

- Do površinske gostote 100Gb/palec^2 lahko pridemo npr.
 - Z linearno gostoto 800 Ktpi ($= 800 \cdot 10^3$ bitov na dolžini $25,4\text{mm}$), kar pomeni, da je presledek med biti na sledi $1,25$ mikropalca, kar je približno 31nm ($= 31 \times 10^{-9}\text{m}$)
 - In gostoto sledi 125 Ktpi ($= 125 \cdot 10^3$ sledi na širini $25,4\text{ mm}$), kar pomeni, da je presledek med sosednjima sledema na disku 8 mikropalcev, to je približno 200nm ($= 200 \times 10^{-9}\text{m}$)
 - $800 \cdot 10^3\text{ tpi} \cdot 125 \cdot 10^3\text{ bpi} = 100 \cdot 10^9\text{ bpi}^2 = 100\text{ Gbpi}^2$
- Število sektorjev na sledi in zgradbo sektorja imenujemo format diska.

- Sektor je običajno sestavljen iz štirih delov:
 - Uvod ali adresna marka je enolična kombinacija bitov, ki določa začetek sektorja. Potrebna je, ker vsebina vrzeli ni definirana.
 - Naslov sektorja na disku (CHS - Cylinder Head Sector) je sestavljen iz:
 - številke cilindra C (številke sledi)
 - številke bralno-pisalne glave H (številke površine)
 - številke sektorja S
 - Podatkovni zapis je običajno dolg 512 bajtov



- Biti za detekcijo in korekcijo napak (tipično 64 ali 128 bitov). Pri vsakem pisanju se izračunajo iz podatkovnih bitov in dodajo k podatkovnemu zapisu. Pri branju se uporabijo za detekcijo napak in njihovo popraviljanje. Tako dosežemo $BER = 10^{-14}$ do 10^{-15} .
- Prostor za shranjevanje podatkov v sektorju je le 512 bajtov podatkovnega zapisa.
- Formatirana velikost diska je vsota podatkovnih zapisov vseh sektorjev.
- Neformatirana velikost je večja in vključuje tudi prostor, ki ga zasedajo vrzeli, uvod, naslov in biti za detekcijo in korekcijo napak.

- Branje in pisanje poteka zaporedoma bit za bitom samo preko ene bralno-pisalne glave.

- Dostop do podatkov na disku sestavljajo trije koraki:
 - Iskanje sledi - pomik glave na želeno sled (cilinder)
 - Povprečni iskalni čas 8 - 15 ms
 - Vrtilna zakasnitev (latenca) - povprečna vrtilna zakasnitev je $\frac{1}{2}$ časa enega obrata
 - Pri 5400 obr/min 5,56 ms
 - Pri 7200 obr/min 4,167 ms
 - Prenos podatkov
 - Čas prenosa je odvisen od notranje prenosne hitrosti in števila prenesenih sektorjev

- Notranja prenosna hitrost (Media Transfer Rate v bitih/s) je odvisna od:
 - Števila vrtljajev diska
 - Gostote zapisa na sledi (linearna gostota)
 - Pozicije sledi (večja na zunanjih sledih in manjša na notranjih sledih)
 - Do 850 Mb/s (max 1120Mb/s pri HITACHI Ultrastar 15K147)

- Zunanja prenosna hitrost (Interface Transfer Rate v Bajtih/s) je odvisna od vrste vmesnika:
 - ATA 133 - 133MB/s
 - SATA 3.0 - 300 MB/s

Optični diski

- Princip shranjevanja in branja informacij pri optičnih diskih temelji na optičnem odboju laserskega žarka.

- Dva načina zapisa informacij:
 - Pri pisanju se v prosojno snov vtisnejo jamice (pits), na to plast pa je nanescna odbojna plast. Na prehodu med ravnino in jamico se pri branju jakost odbitega laserskega žarka zmanjša.
 - Pri pisanju se pod vplivom laserkega žarka spremeni struktura materiala (iz kristalne preide v amorfno) in s tem zmanjša prosojnost. Na teh mestih je pri branju jakost odbitega laserskega žarka manjša.

- Prvi način se uporablja pri CD-DA in CD-ROM
- Drugi način pa se uporablja pri zapisljivih CD-R, CD-RW in DVD optičnih diskih.
- Prvi optični diski (Philips in Sony 1982) so bili razviti za zamenjavo vinilnih gramofonskih plošč (CD-DA Compact Disc - Digital Audio). Kapaciteta 74 minut glasbe.
 - 1984 CD-ROM izpeljan iz CD-DA za shranjevanje digitalnih podatkov (kapaciteta 650MB)
 - 1988 CD-R enkrat zapisljiv CD
 - 1996 DVD (Digital Video ali Versatile Disc) za video podatke

- Kapacitete DVD:
 - DVD-5 enostranski, enoslojni 4,7GB
 - DVD-9 enostranski, dvoslojni 8,5GB
 - DVD-10 dvostranski, enoslojni 9,4GB
 - DVD-18 dvostranski, dvoslojni 17GB

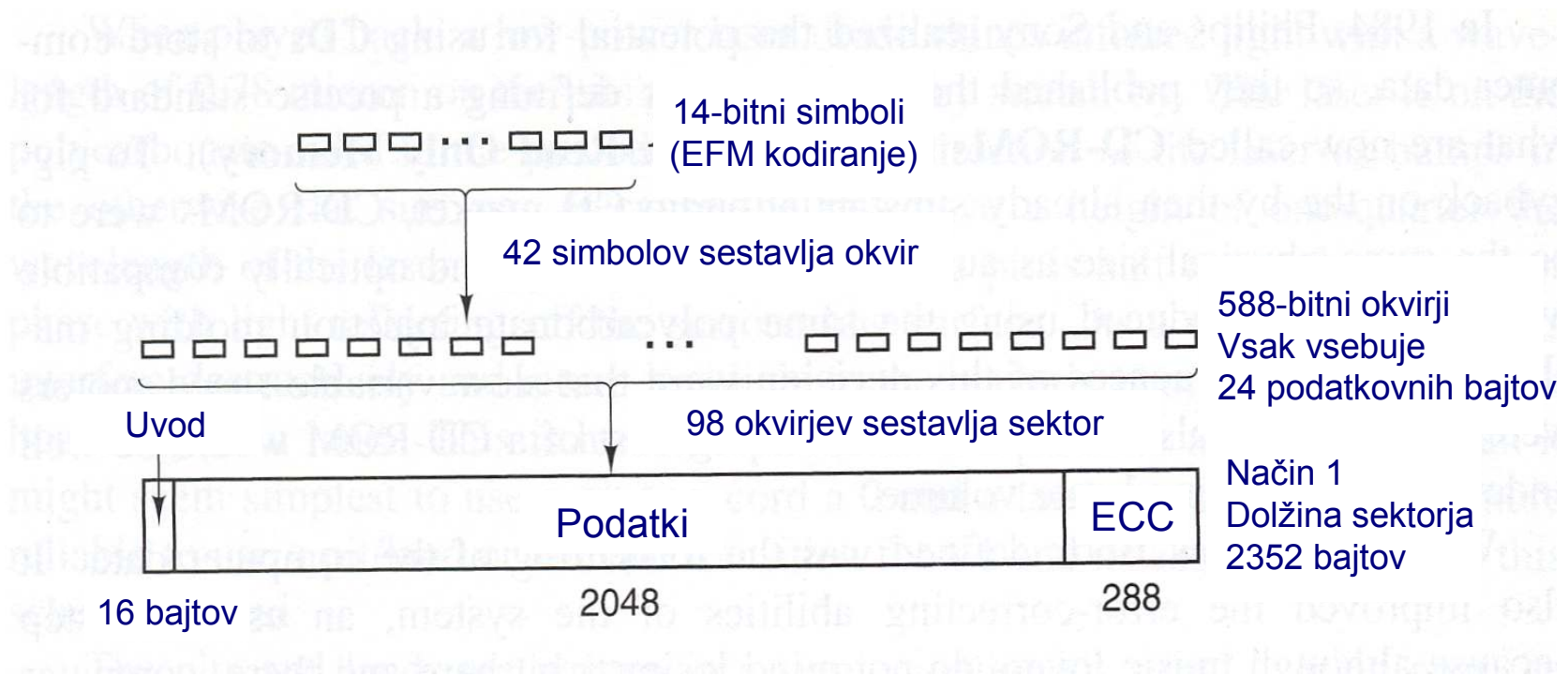
- 1997 CD-RW (Read-Write) večkrat zapisljivi CD

- 2003 BD (Blu-Ray Disc)
- Kapaciteta Blu-Ray
 - Enoslojni 25GB
 - Dvoslojni 50GB

- Zapis na optičnem disku je v obliki spirale, ki poteka iz sredine proti obodu.
- Pri CD-DA je zahtevana konstantna hitrost prenosa, zato se mora število vrtljajev spreminjati (od 530 obr/min na notranjem delu sledi do 200 obr/min na zunanjem delu sledi, kar da konstantno obodno hitrost 1,2 m/s)
- CD-ROM z 1-kratno hitrostjo ima hitrost prenosa podatkov 153KB/s ($1K = 10^3$; oziroma 150KB/s - $1K = 2^{10}$)
 - CD-ROM 1x \Rightarrow 150KB/s (konst. obodna hitrost)
 - CD-ROM 12x \Rightarrow 12 x 150KB/s = 1,8MB/s
 - CD-ROM 24x \Rightarrow 3,6MB/s (konst. število vrtljajev)
 - CD-ROM 52x \Rightarrow 7,8MB/s

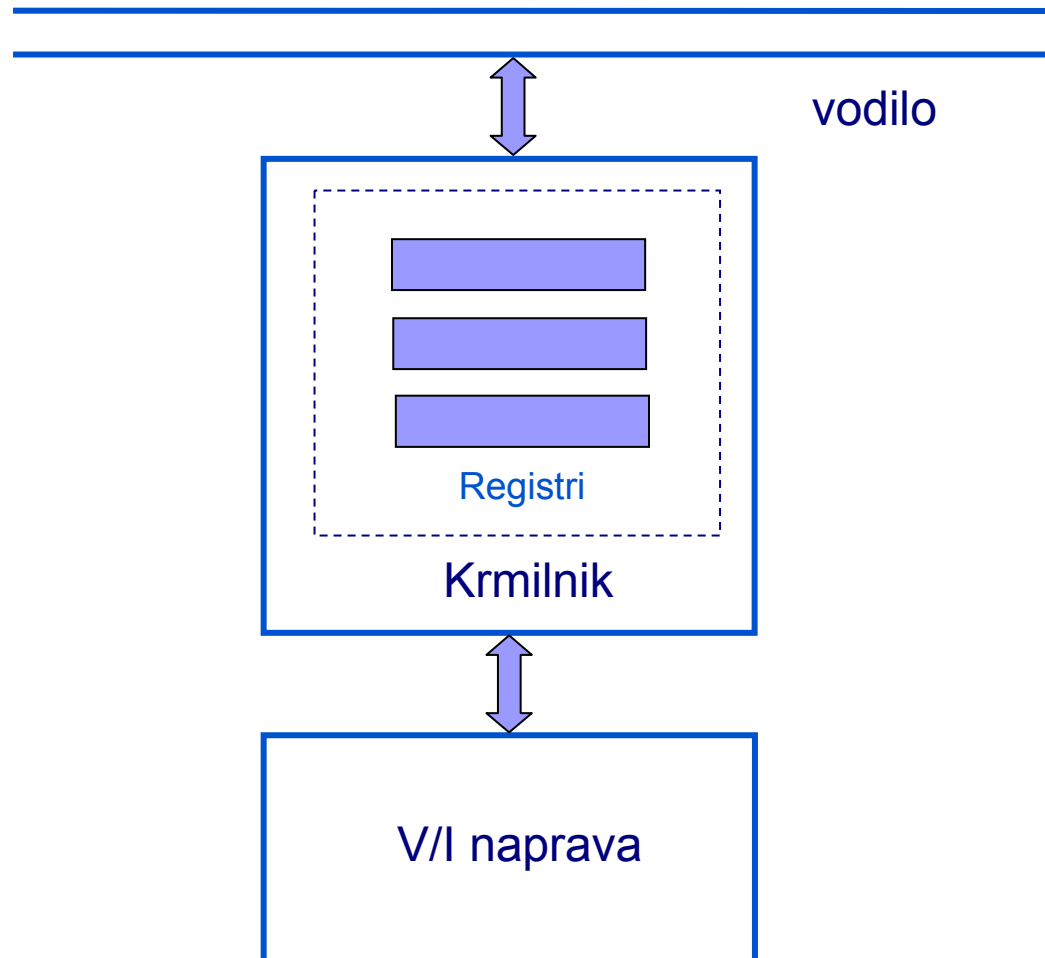
- DVD z 1-kratno hitrostjo ima hitrost prenosa 1,385MB/s
(1M = 10^6 ; oziroma 1,32MB/s - 1M = 2^{20})
 - DVD 1x \Rightarrow 1,32MB/s (konst. obodna hitrost)
 - DVD 4x \Rightarrow 4 x 1,32MB/s = 5,28MB/s
 - DVD 16x \Rightarrow 21,13MB/s

■ Format zapisa na CD-ROMu



12.2 Krmilniki vhodno/izhodnih naprav

- Predpostavljamo, da je vsaka V/I naprava na vodilo priključena preko **krmilnika naprave**.
- Krmilnik enostavnih naprav (npr. tipkovnica) je zelo enostaven, krmilnik zmogljivejših naprav (npr. magnetni disk) pa je specializiran računalnik s svojim fiksnim programom (firmware).
- Vsak krmilnik pa je s strani CPE videti kot določeno število registrov, v katere CPE lahko piše ali iz njih bere.



- V opisu krmilnika je točno določeno kaj se zgodi po pisanju v določen register in kaj po branju registra.
- Posamezni registri in biti v njih imajo običajno vnaprej določeno funkcijo.
- Pisanje določene vsebine v register običajno pomeni:
 - Ukaz krmilniku za izvajanje določene operacije
 - Nastavitev lastnosti krmilnika in načina delovanja
 - Prenos podatka v napravo

- Branje iz določenega registra običajno omogoča:
 - Spremljanje izvajanja operacije
 - Prenos podatka iz naprave

- Danes so pri zapletenih V/I napravah krmilnikove zmogljivosti v dveh ločenih delih:
 - V krmilniku, ki je blizu CPE
 - V elektroniki, ki je vgrajena v V/I napravo

- Vsem realizacijam krmilnikov je skupno, da gledano iz CPE, velja za priključevanje V/I naprave:
 - Dostop do V/I naprave poteka preko registrov krmilnika
 - Izvajane operacij dosežemo s pisanjem določene vsebine (ukaza) v ustrezen register
 - Potek izvajanja operacije lahko spremljamo z branjem vsebine določenih registrov

- Pri določanju procesorskih sposobnosti krmilnika gre za delitev dela med CPE in krmilniki. Danes velja načelo, da naj bo CPE čim manj obremenjena z V/I operacijami.

- To pomeni, da naj bo v krmilnik vgrajenih čim več procesorskih sposobnosti.

- Razlogi za take rešitve so:
 - Osnovna naloga CPE je izvajanje programov, čemur so prilagojeni strojni ukazi (ne pa izvajanju V/I operacij)
 - Cena vgraditve procesorskih sposobnosti v krmilnike je nizka

Naslavljanje V/I naprav

- Če želimo, da določena V/I naprava izvede neko operacijo, je napravo treba izbrati.
- Zato se običajno uporablja izraz **naslavljanje V/I naprave**.
- Vsak register v krmilniku mora imeti svoj enoveljaven naslov, da je do njega možen bralni ali pisalni dostop.

- Vsi današnji računalniki uporabljajo enega (ali več) od treh načinov naslavljanja V/I naprav:
 - Pomnilniško preslikan vhod/izhod
 - Ločen vhodno/izhodni naslovni prostor
 - Posredno preko vhodno/izhodnih procesorjev

- **Pomnilniško preslikan vhod/izhod (memory mapped I/O)**
 - Registri krmilnikov so iz CPE videti enako kot pomnilniške lokacije.
 - Del pomnilniškega naslovnega prostora je uporabljen za V/I naprave in ta del je za pomnilnik izgubljen.

- Značilno za to vrsto naslavljanja je, da posebni V/I ukazi niso potrebni, uporabljajo se lahko ukazi, ki imajo enega od operandov v pomnilnik.
- Naslovi V/I registrov morajo biti v fizičnem naslovnem prostoru (ne v navideznem), prav tako se ti naslovi ne smejo preslikati v predpomnilnik.

■ Ločen vhodno/izhodni naslovni prostor

- Naslovi registrov krmilnikov V/I naprav so v posebnem vhodno/izhodnem naslovnem prostoru, ki je ločen od pomnilniškega.
- CPE dostopa do registrov naprav s posebnimi vhodno/izhodnimi ukazi, ki naslavlajo vhodno/izhodni naslovni prostor.
- Ob izvajanju teh ukazov CPE aktivira posebne signale, ki omogočajo dostop do V/I naslovnega prostora.

- Veliko računalnikov uporablja oba načina.

■ Posredno preko vhodno/izhodnih procesorjev

- Večina današnjih računalnikov ima enega ali več V/I procesorjev, ki skrbijo za operacije z V/I napravami.
- CPE pri tem načinu nima neposrednega dostopa do registrov V/I naprav.
- CPE izbere enega od V/I procesorjev in eno od nanj priključenih naprav.
- Zahtevo CPE sporoči V/I procesorju, ta pa poskrbi, da se zahteva izvrši.
- V/I procesor mora CPE obvestiti (običajno s prekinitvijo), ali je bila zahteva izvršena, ali je morda prišlo do napake.

12.3 Prenos vhodno/izhodnih podatkov

- Osnovna V/I operacija je prenos določene količine podatkov iz glavnega pomnilnika v napravo ali obratno.
- Količina podatkov in hitrost prenosa je odvisna od naprave in znaša od nekaj 10 bitov/s pri tipkovnici do 300MB/s pri trdih diskih.
- Rešitve delimo glede na stopnjo sodelovanja CPE pri V/I prenosih v štiri skupine:

- Programski vhod/izhod (programmed I/O - PIO)
- Programski vhod/izhod z uporabo prekinitev
- Neposreden dostop do pomnilnika (Direct Memory Access - DMA)
- Vhodno/izhodni procesorji

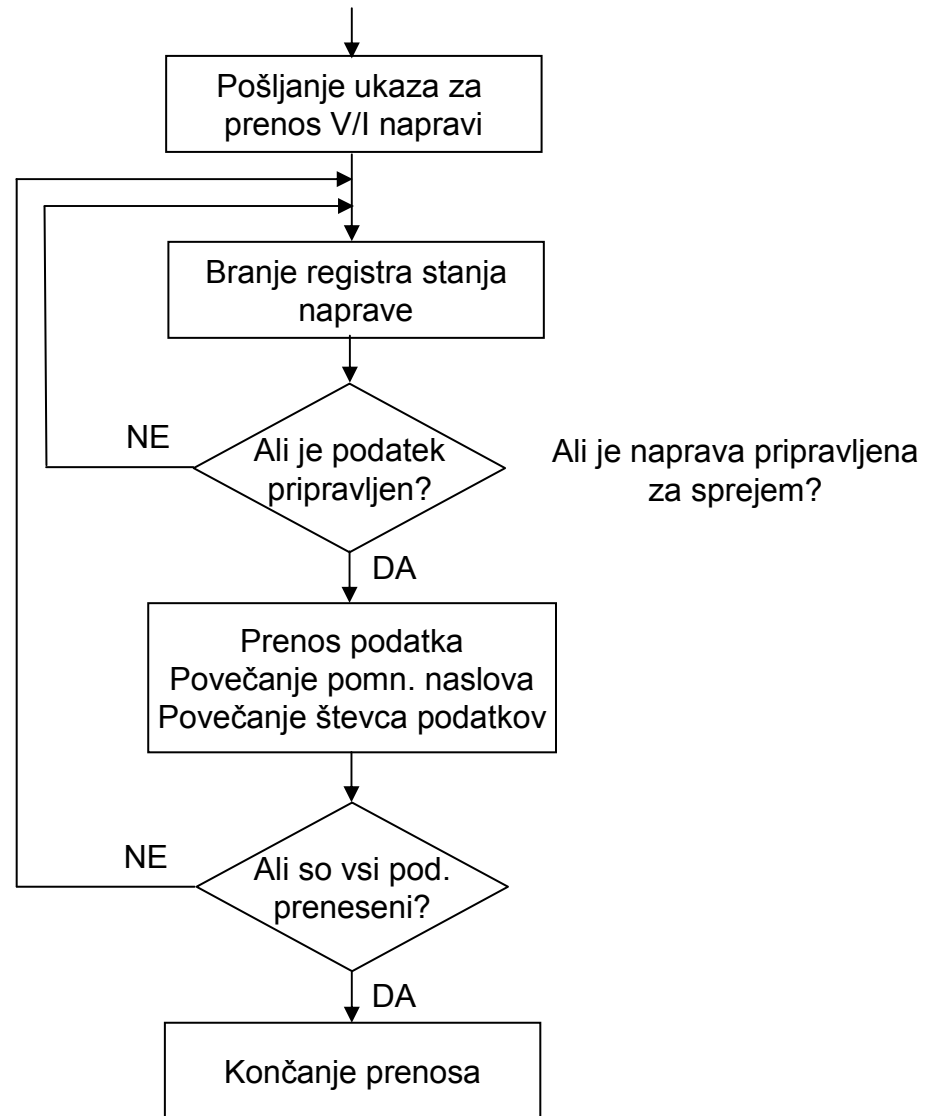
Programski vhod/izhod

- Delovanje V/I naprave je pod neposrednim nadzorom CPE. Stopnja sodelovanja CPE je pri tem načinu prenosa največja.
- CPE izvaja program, ki:
 - prične V/I operacijo
 - nadzoruje njeno izvajanje
 - prenaša podatke
 - zaključi V/i operacijo
- Vsi podatki se prenašajo skozi CPE, običajno iz registra krmilnika v nek register v CPE in od tam v pomnilnik, ali obratno.

- Za prenos vsakega podatka sta potrebna najmanj dva ukaza:
 - register krmilnika → register v CPE
 - register v CPE → pomnilnik (ali v obratni smeri)

- Veliko računalnikov poleg drugih načinov prenosa omogoča tudi programski vhod/izhod, ker je nezahteven glede strojne opreme (PIO mode).

- Dogajanje pri programskem V/I prenosu lahko ponazorimo z diagramom poteka (za vsak prenos je potreben en obhod zunanje zanke):



Ali je naprava pripravljena za sprejem?

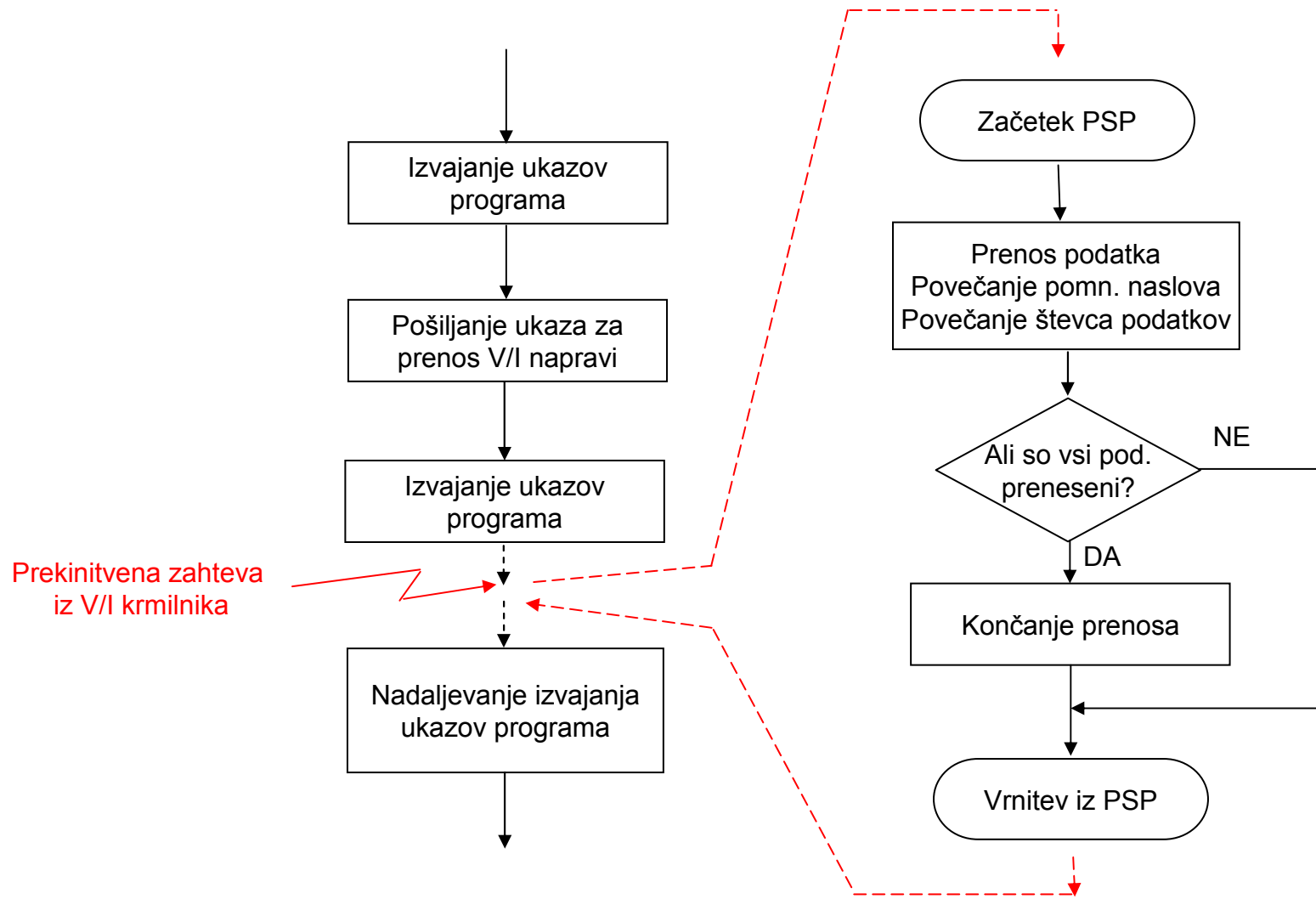
- Pri tem načinu prenosa lahko CPE porabi veliko časa za preverjanje stanja naprave (čakanje na naslednji podatek, ali čakanje, da je naprava pripravljena za sprejem naslednjega podatka)
- Ker je večina V/I naprav mnogo počasnejših kot CPE, to pomeni veliko nekoristno izgubljenih ukazov CPE.
- Preverjanje stanja naprave imenujemo programsko izpraševanje (polling) in ga lahko nadomestimo s prekinitvami.

Programski vhod/izhod z uporabo prekinitev

- Če se za obveščanje CPE o spremembah stanja V/I naprave:
 - podatek pripravljen za oddajo ali
 - naprava pripravljena na sprejem podatkauporabijo prekinitve, se izkoriščenost CPE izboljša.

- Pri tem načinu CPE ni treba preverjati stanja naprave:
 - CPE pošlje napravi ukaz za prenos
 - CPE nadaljuje z izvajanjem programa
 - Ko je naprava pripravljena, pošlje v CPE zahtevo za prekinitev
 - Vključi se prekinitveni servisni program, ki prenese podatek

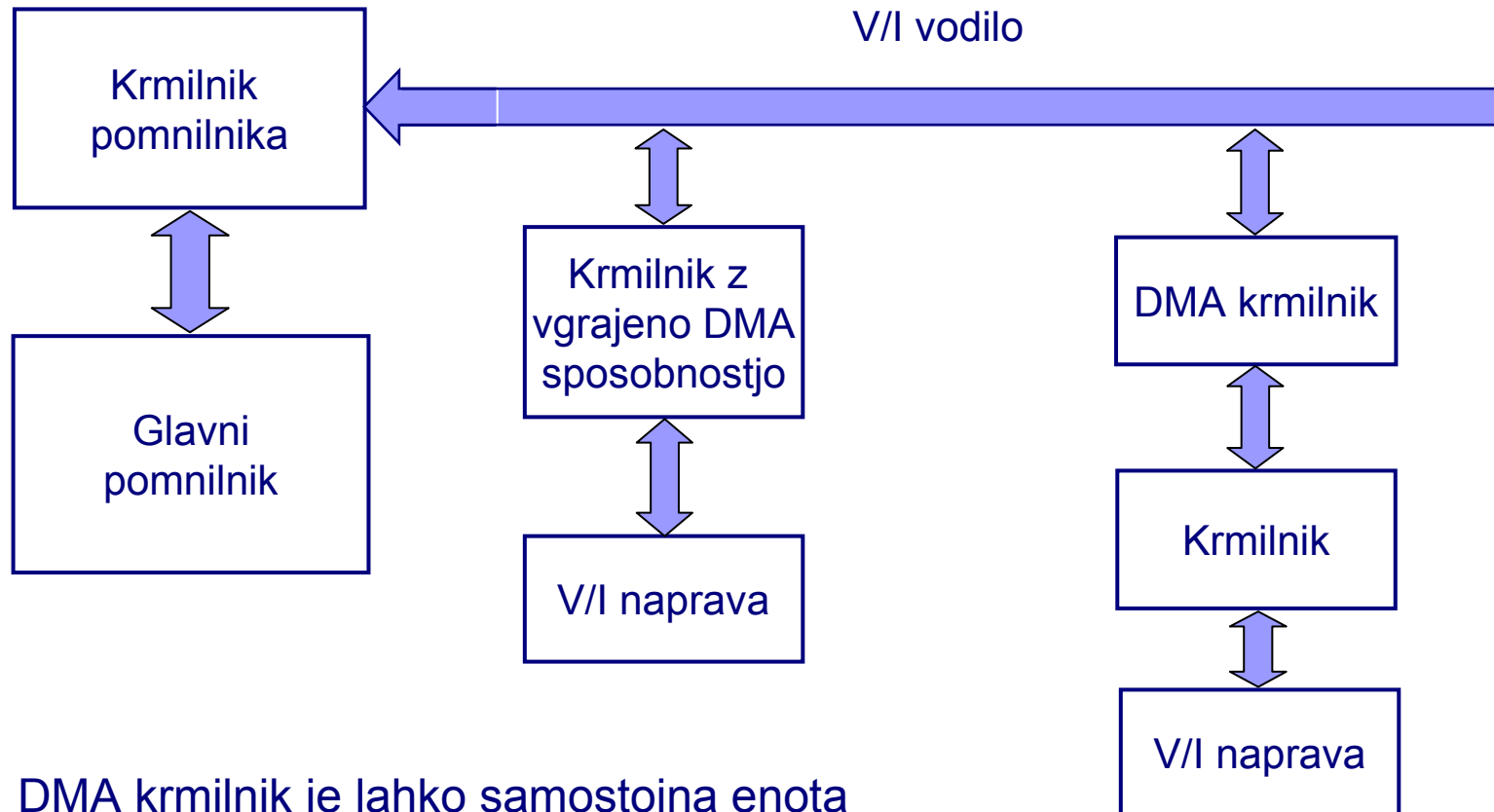
- Programski prenos s prekinitvami posebno pri počasnih V/I napravah zelo malo obremenjuje CPE in zglada kot da bi potekal istočasno z izvajanjem programa.
- CPE mora imeti vgrajen nek prekinitveni mehanizem (kar imajo danes vsi procesorji), krmilnik V/I naprave pa mora v CPE pošiljati zahteve za prekinitve, ki jih CPE prepozna.
- Dogajanje pri programskem V/I prenosu s prekinitvami lahko ponazorimo z diagramom poteka:



Neposreden dostop do pomnilnika

- Pri napravah, ki zahtevajo hiter prenos velike količine podatkov, postane programski V/I prenos prepočasen.
- Prenos podatkov pri trdih diskih s hitrostjo npr.
 - 133MB/s (ATA 133) zahteva prenos 16 bitov vsakih 15 ns
 - 300 MB/s (SATA 3.0) pa 8 bitov vsake 3,3 ns
- Večina CPE v tem času ne uspe izvesti vse potrebne ukaze (en obhod zanke), če pa jih, bi bila popolnoma zasedena z V/I prenosom.
- Rešitev za tako hitre prenose je neposreden dostop do pomnilnika - DMA.

- Podatki se v pomnilnik iz V/I naprave (ali obratno) ne prenašajo preko CPE, temveč neposredno. Izpolnjena morata biti dva pogoja:
 - Obstajati mora neposredna povezava med krmilnikom V/I naprave in glavnim pomnilnikom
 - Krmilnik mora biti sposoben:
 - Tvoriti pomnilniške naslove in kontrolne signale za dostop do pomnilnika
 - Štetiti prenesene besede
 - Izvršiti prenos, ko je podatek pripravljen
- Tak krmilnik - DMA krmilnik, mora biti sposoben izvesti vse operacije, ki jih pri programskem prenosu izvaja CPE.



DMA krmilnik je lahko samostojna enota ali pa je vgrajen v krmilnik V/I naprave

- Pri V/I prenosu lahko pride do primerov, ko CPE in DMA krmilnik hkrati zahtevata dostop do glavnega pomnilnika.
- Krmilnik pomnilnika omogoča, da do glavnega pomnilnika istočasno dostopata CPE in DMA krmilnik, pogoj pa je, da je glavni pomnilnik narejen z uporabo pomnilniškega prepletanja.
- Pri DMA prenosu mora CPE opraviti naslednje operacije:
 - V naslovni register DMA krmilnika vpisati začetni naslov polja v glavnem pomnilniku
 - Dolžino polja (število besed), ki naj se prenese, vpisati v števeni register DMA krmilnika

- V ustrezne registre vpisati vrednosti, ki določajo operacijo in način delovanja DMA krmilnika
- V DMA krmilnik poslati ukaz za začetek izvajanja V/I prenosa
- DMA krmilnik nato prične z izvajanjem V/I operacije, ki poteka brez sodelovanja CPE.
- Ob zaključku V/I operacije DMA krmilnik običajno obvesti CPE s prekinitveno zahtevo, CPE pa preveri, ali je bila operacija uspešno izvedena.

Vhodno/izhodni procesorji

- Pri velikih računalnikih, ki delujejo v multiprogramskem načinu, je tudi majhna stopnja sodelovanja CPE pri V/I operacijah neekonomična.
- Veliko V/I naprav, veliko V/I prenosov in visoka cena CPE opravičuje stroške dodatnih V/I procesorjev.
- Cilj te rešitve je CPE popolnoma razbremeniti V/I prenosov.
- V/I procesorji imajo svoj nabor ukazov, večinoma tudi svoj pomnilnik in jih lahko smatramo kot neke vrste univerzalne DMA krmilnike, ki so poleg V/I prenosa sposobni izvajati tudi svoj program.

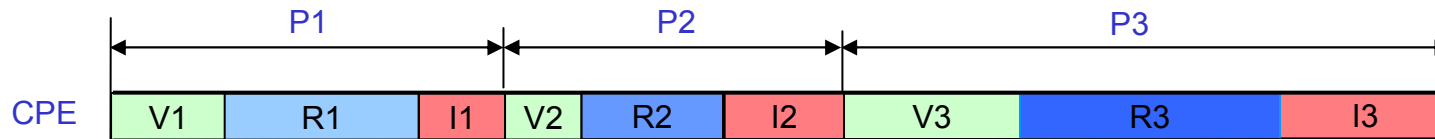
- Ukazi V/I procesorjev so običajno prilagojeni za prenose podatkov med V/I napravo in glavnim pomnilnikom.
- Delovanje V/I procesorjev poteka paralelno z delovanjem CPE.
- Na večini računalnikov so določena pravila, s katerimi lahko CPE določi, kdaj in kateri program naj izvede V/I procesor ter na kakšen način V/I procesor obvesti CPE o opravljeni nalogi.

Prepletanje delovanja CPE in V/I operacij

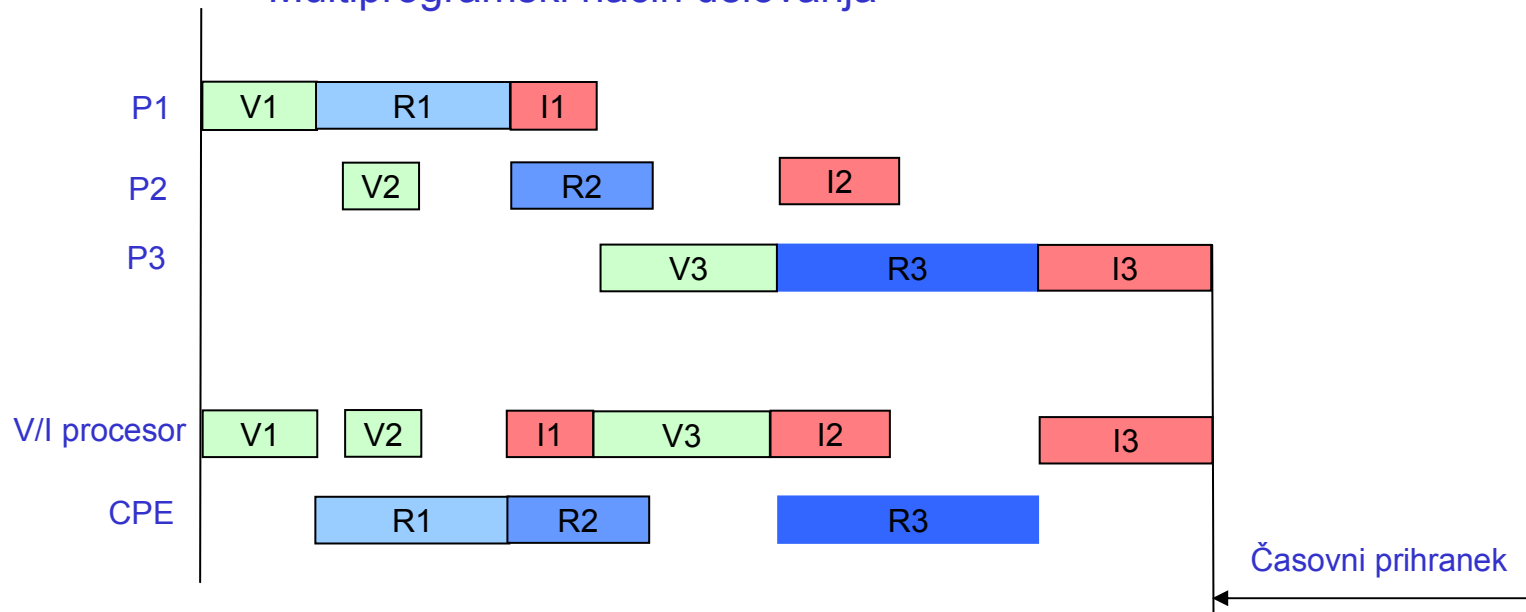
- Med izvajanjem programov se izmenjujejo obdobja v katerih se izvajajo CPE operacije in v katerih se izvajajo V/I prenosi.
- Če lahko računalnik izvaja en sam program, mora CPE med izvajanjem V/I prenosov čakati.
- Med V/I prenose spadajo tudi prenosi, ki so potrebni, ko pri navideznem pomnilniku pride do napake strani ali segmenta \Rightarrow prenos strani ali segmenta iz navideznega pomnilnika (trdi disk) v glavni pomnilnik.

- Večina večjih računalnikov danes deluje na multiprogramski način, CPE vedno izvaja enega od več med seboj neodvisnih programov, V/I procesorji pa izvajajo ostale programe.
- Izvajanje treh programov z vhodno/izhodnimi prenosi v enoprogramskem in multiprogramskem načinu delovanja z enim V/I procesorjem je prikazano na sliki.
- Če je V/I procesorjev več, se lahko hkrati izvaja več V/I prenosov.
- Tak način delovanja je možen tudi z DMA krmilniki brez V/I procesorjev.

Enoprogramski način delovanja



Multiprogramski način delovanja



P1, P2, P3 - programi V1, V2, V3 - vhodne V/I operacije programov I1, I2, I3 - izhodne V/I operacije