



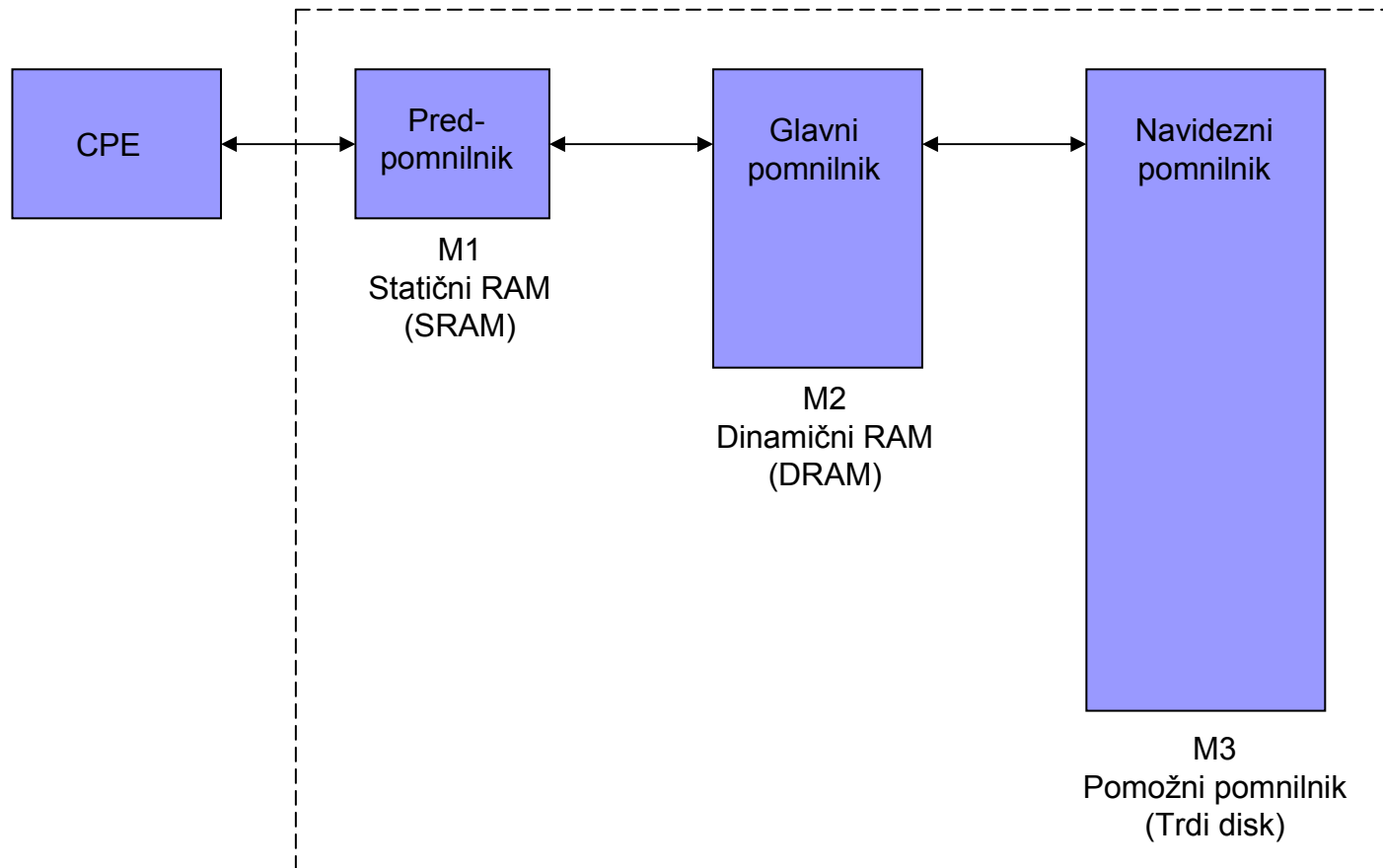
# OSNOVE RAČUNALNIŠKE ARHITEKTURE II

## 9 Glavni pomnilnik

- Glavni pomnilnik je prostor iz katerega CPE bere ukaze in operande in vanj shranjuje rezultate.
- Ključna za delovanje računalnika sta:
  - Hitrost pomnilnika
  - Velikost pomnilnika
- Zahtevi po velikosti in hitrosti si nasprotujeta, velik in hiter pomnilnik je tudi drag.

- Pri današnjih računalnikih imamo namesto enega glavnega pomnilnika več nivojsko pomnilniško hierarhijo.
- Pomnilniško hierarhijo sestavljajo predpomnilniki, glavni pomnilnik in pomožni pomnilnik.
- Pomnilniška hierarhija je iz CPE videti kot en sam pomnilnik:
  - S hitrostjo, ki je približno enaka hitrosti predpomnilnika
  - Z velikostjo navideznega pomnilnika na pomožnem pomnilniku

## Tronivojska pomnilniška hierarhija



Glavni pomnilnik kot je definiran v von Neumannovem modelu

- Razlika med glavnim pomnilnikom in pomožnimi pomnilniki:
  - Do glavnega pomnilnika ima CPE **neposreden dostop** s strojnimi ukazi, tako da poda pomnilniški naslov
  - Do pomožnega pomnilnika (magnetni diski, trakovi, CD in DVD) je **posreden dostop** preko V/I ukazov, ki prenesejo naslovljeno besedo in še več sosednjih besed v glavni pomnilnik, potem pa je šele možen neposreden dostop.

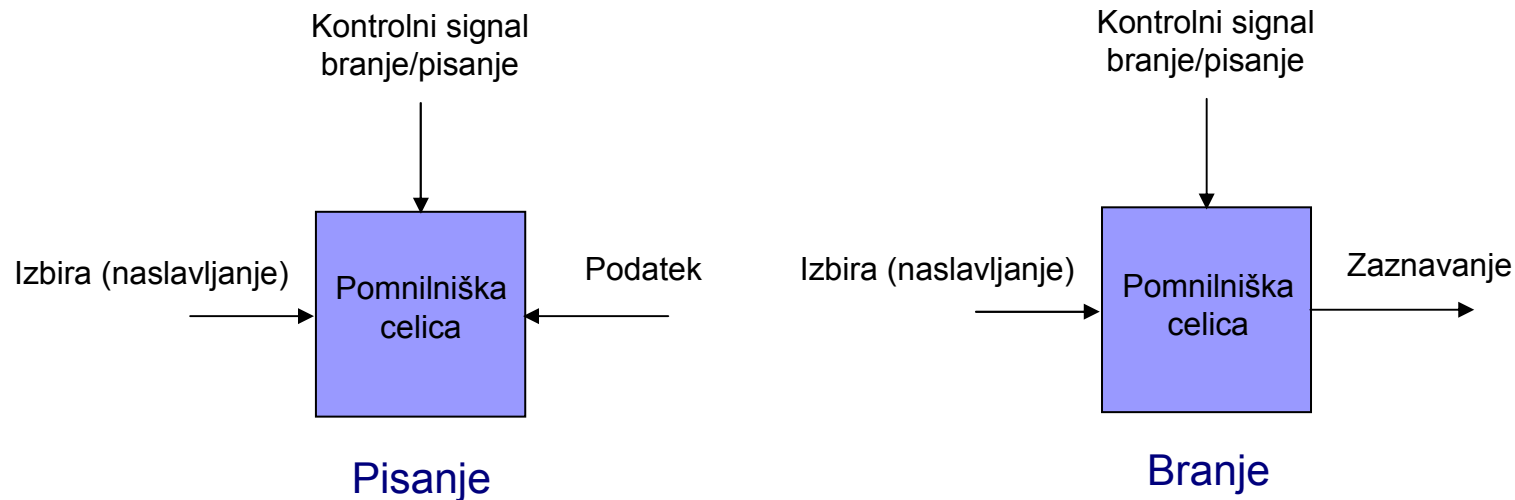
■ Razlogi za delitev:

- Včasih tehnološki (z obstoječo tehnologijo ni bilo mogoče izdelati glavni pomnilnik večji od nekaj tisoč besed)
- Danes ekonomski (cena enega bita na disku je približno 250-krat nižja kot cena v glavnem pomnilniku-marec 2007)

## 9.1 Pomnilniška tehnologija

- Glavni pomnilnik običajno imenujemo tudi pomnilnik z naključnim dostopom (Random Access), kar pomeni, da je vsaka pomnilniška lokacija dostopna preko naslovne logike v enakem času.
- Osnovna enota pomnilnika je 1 bit, ki lahko vsebuje eno od dveh vrednosti 0 in 1. En bit je tudi najmanjša enota informacije.
- Fizično je en bit shranjen v eni pomnilniški celici z naslednjimi lastnostmi:

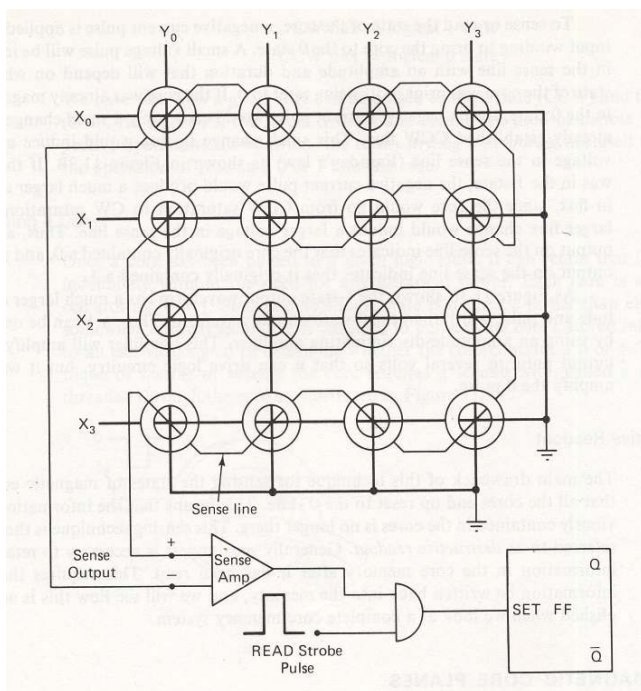
- V vsakem trenutku je celica v enem od dveh možnih stabilnih stanj, ki predstavljata vrednost 0 in 1
- Vanjo je možno pisati (vsaj enkrat) in s tem določiti stanje 0 ali 1
- Stanje v katerem je celica, je možno prebrati oz. zaznati (sense)



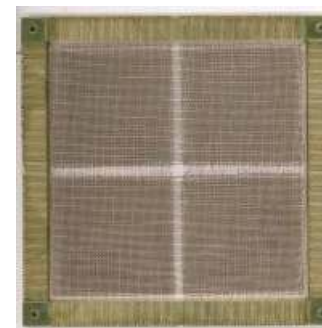


- Tehnologije, ki se ali so se uporabljale za glavni pomnilnik so:
  - Feritni pomnilnik
  - Polprevodniški pomnilnik
  
- Feritni pomnilnik je bil prvi večji in zanesljiv glavni pomnilnik.
  - Iznašel ga je Forrester na MIT v okviru projekta Whirlwind v letih 1940 do 1950
  - Biti so shranjeni v obliki namagnetenja majhnih feritnih jeder (core), ki so povezana v dvodimenzionalno polje

- Glavni pomnilnik zato včasih še vedno imenujemo core memory
- Feritni pomnilnik je bil zanesljiv in obstojen
- Dostopni čas  $\sim 1 \mu\text{s}$



Ronald J. Tocci Digital Systems, PH 1977



Feritni pomnilnik 2 KB (128 x 128 bitov)  
Velikost 16 x 16 cm (Wikipedia)

# Polprevodniški pomnilniki

- Polprevodniški pomnilniki so pomnilniki z naključnim dostopom (random access).
- To pomeni, da je posamezna pomnilniška beseda direktno dostopna preko logičnega vezja za naslavljanje, čas dostopa pa je enak pri vseh dostopih, ne glede na vrstni red.
- To velja za RAM pomnilnike (Random Access Memory) kot tudi za ROM, EPROM, EEPROM in Flash pomnilnike.

## Vrste polprevodniških pomnilnikov

Vrsta pomnilnika	Dostop	Brisanje vsebine	Način pisanja	Obstojnost vsebine
RAM	Bralno-pisalni pomnilnik	Električno - posamezen bajt	Električno	Neobstojna
ROM	Bralni pomnilnik	Ni možno	Maska pri izdelavi	Obstojna
PROM			Električno	
EPROM	UV svetloba - cel čip			
EEPROM	Električno - posamezen bajt			
Flash	Električno - posamezni bloki			

RAM – Random Access Memory

ROM – Read Only Memory

PROM – Programmable ROM

EPROM – Erasable PROM

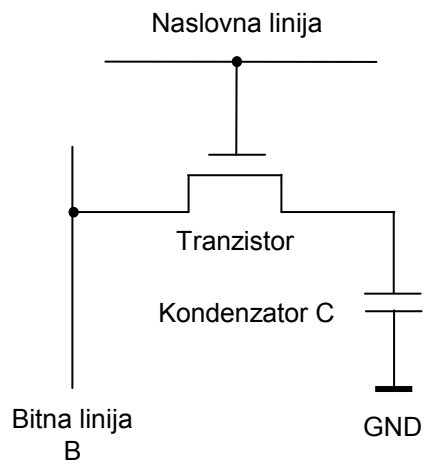
EEPROM – Electrically Erasable PROM

- Lastnosti, ki RAM pomnilnike razlikujejo od ostalih vrst so:
  - Bralno-pisalni dostop na nivoju bajta (pomnilniške besede)
  - Neobstočnost vsebine pri odklopu električne energije
  - RAM pomnilnik se zato uporablja le kot začasni pomnilnik
- V računalnikih se uporabljata dve vrsti:
  - DRAM - Dinamični RAM pomnilniki
  - SRAM – Statični RAM pomnilniki

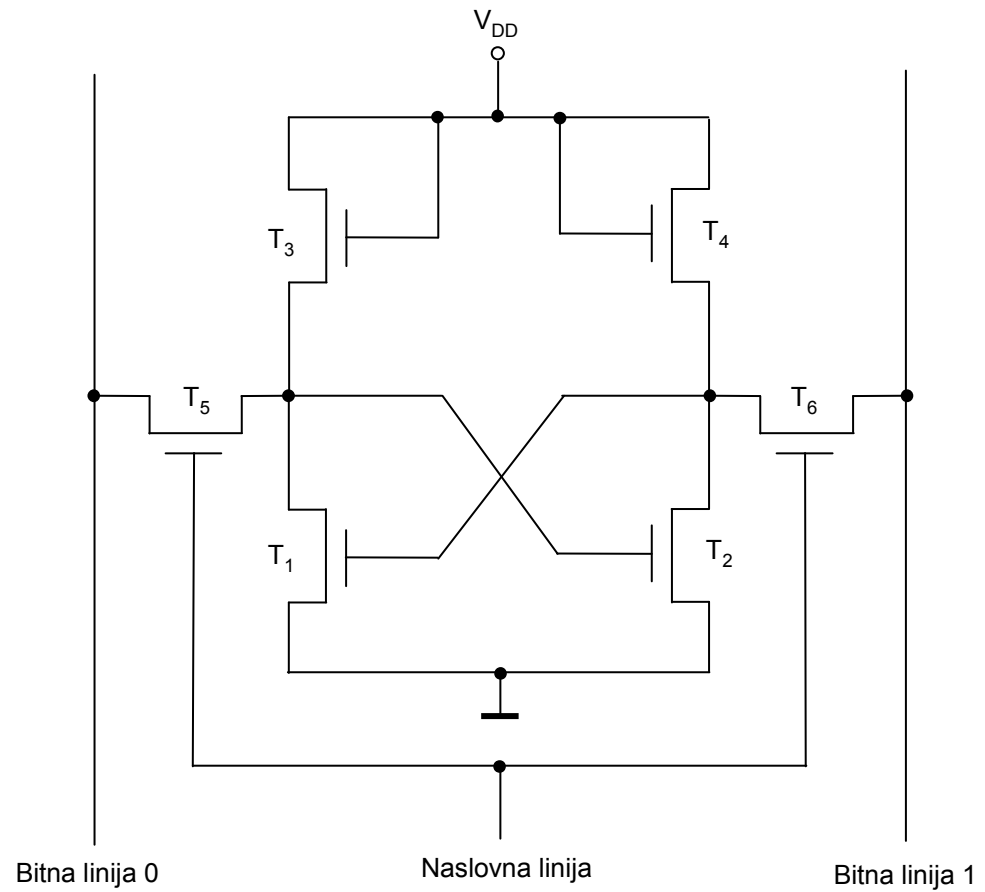
- V **DRAM pomnilniški celici** je informacija shranjena v obliki električnega naboja na parazitski kapacitivnosti pri tranzistorju.
- Kapacitivnost tega kondenzatorja je zelo majhna ( $\sim 0,1$  pF), naboj na njem pa se hitro izgubi - kondenzator se sprazni v nekaj 10 ms.
- Bit, ki se zapiše v tako DRAM celico, bi zato zelo hitro izginil. Vsebinsko v DRAM pomnilniških celicah je zato potrebno stalno (periodično) osveževati.

- **SRAM pomnilniška celica** je zgrajena kot flip-flop običajno s šestimi tranzistorji.
- Bit, ki se zapiše v SRAM celico, ostane nespremenjen, dokler se v celico ne vpiše nova vsebina.
- Vsebina obeh vrst pomnilniških celic (DRAM in SRAM) pa se izgubi ob izklopu napajalne napetosti.

### DRAM (Dinamični RAM) pomnilniška celica



### SRAM (Statični RAM) pomnilniška celica





- Primerjava lastnosti SRAM in DRAM pomnilniških celic:
  - Vsebina v obeh SRAM in DRAM celicah je ob prekinitvi napajanja neobstojna
  - DRAM celica je enostavnejša (en tranzistor) in zato manjša
    - Gostota celic na enoto površine čipa je zato pri DRAM bistveno večja kot pri SRAM
    - Cena je nižja kot pri SRAM pomnilnikih
  - DRAM celice potrebujejo osveževanje (refresh), za kar je potrebno posebno osveževalno vezje

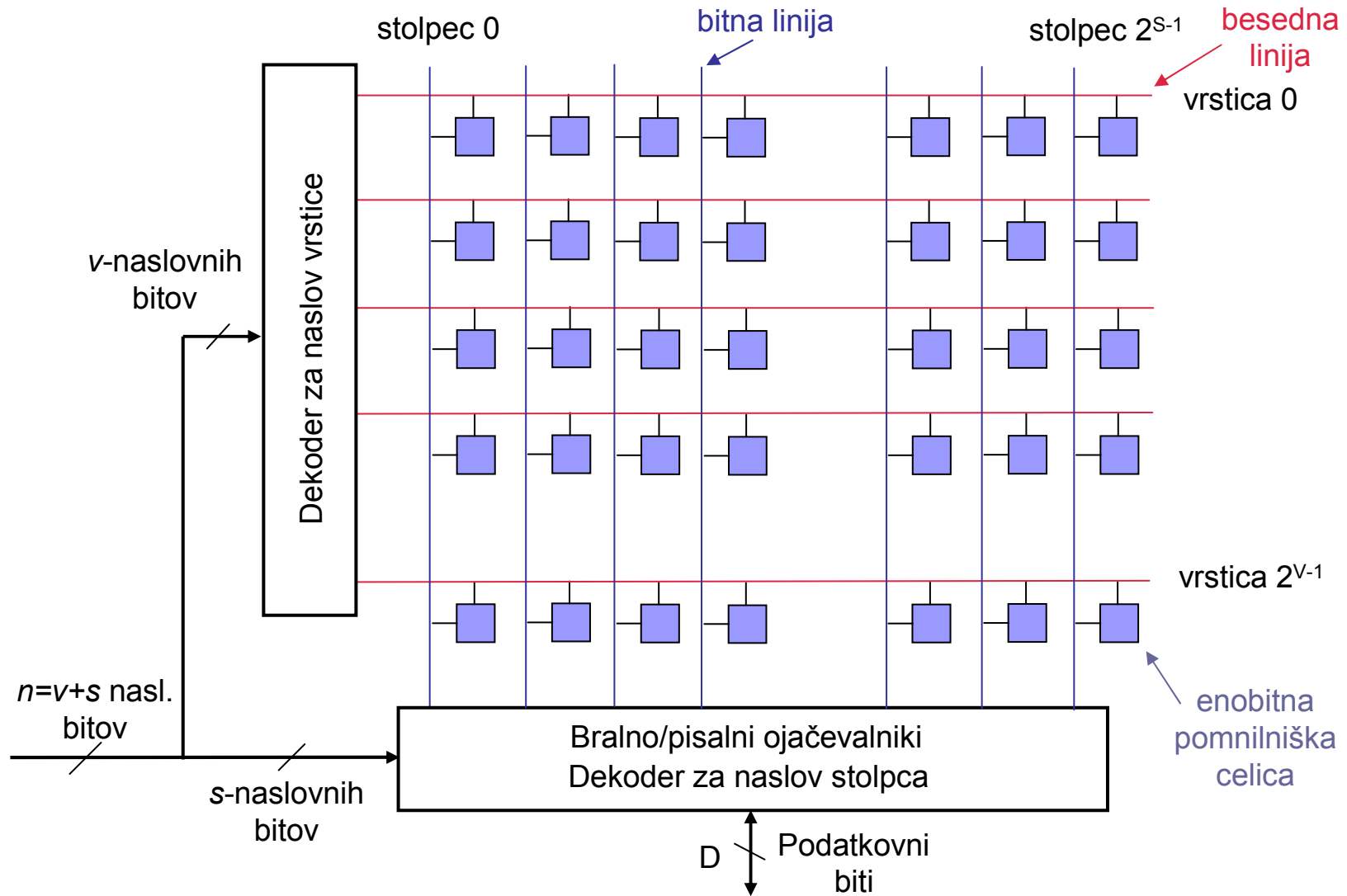
- SRAM pomnilniške celice so hitrejše (preklop tranzistorja) kot DRAM (polnjenje kondenzatorja)
- DRAM pomnilniki se zaradi nižje cene in večje gostote (več bitov na čip) uporabljajo za velike pomnilnike kot je glavni pomnilnik.
- SRAM pomnilniki pa se zaradi večje hitrosti in višje cene uporabljajo za manjše pomnilnike, to so predvsem predpomnilniki.

# Organizacija pomnilniških modulov

- Polprevodniški pomnilniki so pakirani v čipe. Vsak čip vsebuje polje pomnilniških celic.
- Pomnilniške celice so urejene v obliki dvodimenzionalnega polja z  $v$ -vrsticami in  $s$ -stolpci.
- To polje se imenuje **bitna ravnina**.
- Pomnilniški naslov dolžine  $n$ -bitov ( $n = v+s$ ) se razdeli na  $v$ -bitov za naslov vrstice in  $s$ -bitov za naslov stolpca.

- Pri branju ali pisanju v določeno celico je potrebno v čip po naslovnih linijah poslati  $n$ -bitni naslov ( $n = v + s$ ).
- Na naslovni dekoder vrstice gre  $v$ -bitov naslova vrstice in dekoder aktivira eno od  $2^{v-1}$  vrstic.
- Na naslovni dekoder stolpca pa  $s$ -bitov naslova in dekoder aktivira enega od  $2^{s-1}$  stolpcev.
- Tako se naslovi natanko ena pomnilniška celica (en bit) na križišču izbrane vrstice in stolpca.

# Pomnilniška tehnologija - zgradba DRAM pomnilnika



- Bitna ravnina ima lahko enako število vrstic in stolpcev npr:
  - Čip velikosti 4Mx1b ( $4M = 2^{22} = 2^{11} \times 2^{11}$  )
  - Dolžina pomnilniškega naslova je 22 bitov, ki jih lahko razdelimo na 11 bitov za naslov vrstice in 11 bitov za naslov stolpca
  - Polje je kvadratno z 2048 ( $2^{11}$ ) vrsticami in 2048 ( $2^{11}$ ) stolpci (2048 x 2048 pomnilniških celic - bitov)

- Običajno pa je polje pravokotno, tako da število vrstic ni enako številu stolpcev npr:
  - Čip velikosti 32Mx1b ( $32M = 2^{25} = 2^{13} \times 2^{12}$  )
  - Dolžina pomnilniškega naslova je 25 bitov, ki jih lahko razdelimo na 13 bitov za naslov vrstice in 12 bitov za naslov stolpca
  - Polje je pravokotno z 8192 ( $2^{13}$ ) vrsticami in 4096 ( $2^{12}$ ) stolpci (8192 x 4096 bitov)

- Pomnilniški čip ima lahko organizacijo x1bit, kar pomeni, da ima eno samo bitno ravnino in se pri enem dostopu dostopa samo do enega bita.
  - $64M \times 1 = 64M \text{bitov} = 8M \text{Bajtov}$
  
- Organizacija x8 pa pomeni, da ima čip 8 bitnih ravnin. Pri enem dostopu se dostopa do vseh 8 bitnih ravnin oziroma do 8 istoležnih bitov hkrati.
  - $64M \times 8 = 512M \text{b} = 64M \text{B}$
  
- Možnosti: x1, x4, x5, x8, x9, x16



## ■ Pomnilniški modul (DIMM) SDRAM DDR2 512 KB



© mmi

- 16 SDRAM čipov NT5DS32M8AT po 256Mb
- Organizacija čipa 32M x 8 bitov, v 4 modulih (bank)
- 4 moduli po 8192 vrstic x 512 stolpcev x 16 bitov

## 9.2 Lastnosti pomnilniških elementov

- Lastnosti pomnilniških elementov ocenjujemo glede na različne kriterije:
  - Cena
  - Hitrost dostopa
  - Način dostopa
  - Spremenljivost vsebine
  - Obstojnost vsebine
  - Zanesljivost

## Cena enote pomnilnika

- Danes se običajno podaja za enoto MB (MegaBajt  $1 \text{ MB} = 2^{20} = 1.048.576 \text{ B}$ )
- Ceno 1 MB dobimo tako, da ceno celotnega pomnilnika, vse spremljajoče elektronike in mehanskih delov, delimo z velikostjo celotnega pomnilnika v MB.

## Hitrost dostopa

- Zmogljivost pomnilnika je določena s hitrostjo branja in pisanja informacije v pomnilnik.
- Kot merilo za hitrost se običajno uporablja povprečen čas, ki je potreben za branje ene besede iz pomnilnika.
- Ta čas imenujemo **čas dostopa** (access time) in ga označujemo s  $t_a$ .

- Čas za pisanje je pri večini današnjih pomnilnikov približno enak času za branje.
  
- Čas dostopa je običajno definiran kot čas, ki preteče od trenutka, ko pomnilnik dobi naslov, do trenutka, ko:
  - Je pri **branju** zahtevana informacija prisotna na izhodu pomnilnika
  - Pri **pisanju** informacija na vhodu pomnilnika ni več potrebna

- Pri DRAM pomnilnikih mora po vsakem dostopu preteči nek čas (mrtvi čas  $t_m$ ), preden se lahko prične naslednji dostop.
- **Hitrost dostopa** (access rate)  $b_a$  pa je največje možno število prenesenih besed na sekundo.
- Pri DRAM pomnilnikih je zato: 
$$b_a = \frac{1}{t_c} = \frac{1}{t_a + t_m}$$
- Čas  $t_c$  je čas cikla, to je čas med dvema zaporednima dostopoma.

## Način dostopa

- Glede na način izbire pomnilniške besede, do katere se želi dostop, se današnji pomnilniki delijo v dve skupini:
  - **Navadni pomnilniki** – vsaka pomnilniška beseda ima svoj fiksen naslov, dostop do želene besede je z naslovom
  - **Asociativni pomnilniki** – pomnilniške besede nimajo naslova, dostop do želene besede je preko vsebine ali dela vsebine te besede

- Asociativni pomnilniki se zato imenujejo tudi vsebinsko naslovljivi.
  
- Pri navadnih (z naslovom naslovljivih) pomnilnikih glede na odvisnost časa dostopa od vrstnega reda naslovov do katerih se dostopa, razlikujemo štiri načine dostopa:
  - Naključni dostop
  - Zaporedni dostop
  - Krožni dostop
  - Direktni dostop



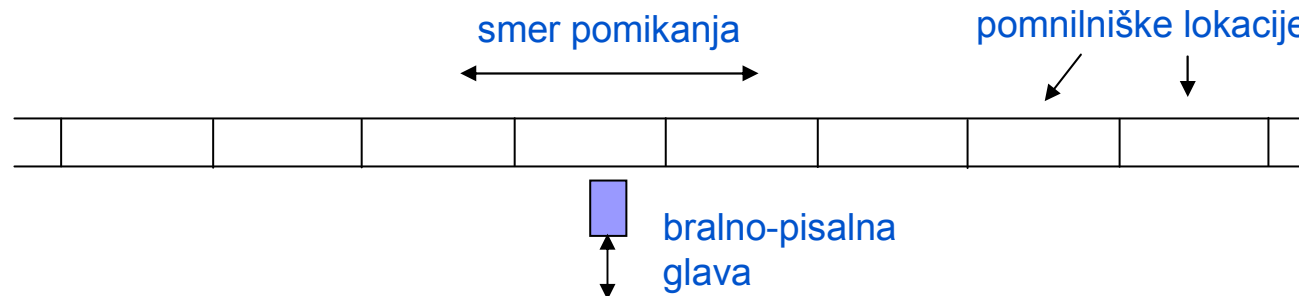
## ■ Naključni dostop (random access)

- Čas dostopa do poljubne pomnilniške besede je neodvisen od naslova in od vrstnega reda naslovov pred tem naslovljenih besed
- To pomeni, da je čas dostopa  $t_a$  konstanten pri naključnem zaporedju naslovov besed do katerih se dostopa
- Polprevodniški pomnilniki so pomnilniki z naključnim dostopom

- DRAM pomnilniki, ki se uporabljajo v glavnih pomnilnikih pa imajo tudi page mode način dostopa, ki ni naključni
- **Page mode način dostopa** je dostop do bitov v isti vrstici in je veliko hitrejši od naključnega
- Pomnilniški naslovi do katerih se dostopa v page mode načinu ne morejo biti poljubni, zato tak način dostopa ni naključen

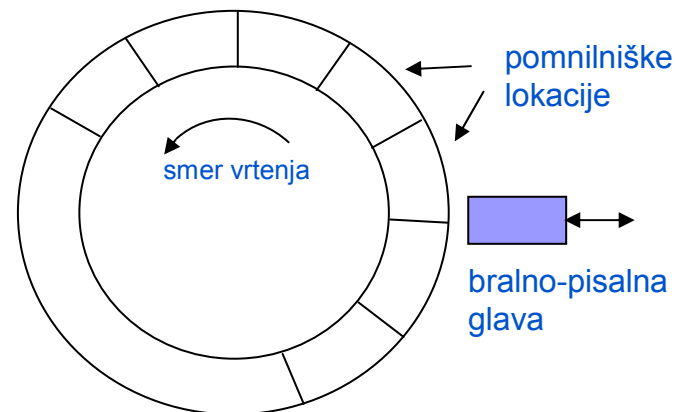
## ■ Zaporedni dostop (serial access)

- Čas dostopa do določene besede je odvisen od naslova besede, do katere je bil narejen dostop pred tem
- To pomeni, da je čas dostopa  $t_a$  močno odvisen od zaporedja naslovov
- Magnetni trak je pomožni pomnilnik z zaporednim dostopom



## ■ Krožni dostop (rotational access)

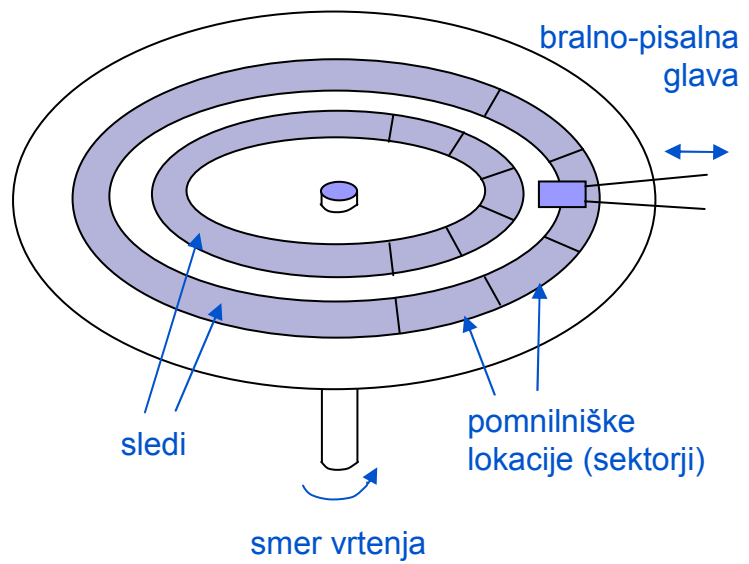
- Posebna vrsta zaporednega dostopa, kjer so pomnilniške lokacije razporejene po krožnici
- Povprečni čas dostopa  $t_a$  je enak polovici časa enega obrata
- Pomnilnik s krožnim dostopom je magnetni boben ali magnetni disk s fiksnimi bralno-pisalnimi glavami



## ■ **Direktni dostop (direct access)**

- Kombinacija zaporednega in krožnega dostopa, ki se uporablja pri magnetnih in optičnih diskih s premičnimi glavami
- Zapis na magnetnem disku je v obliki koncentričnih krogov (sledi), pomnilniške lokacije (sektorji) pa so razporejene vzdolž sledi
- Bralno pisalna glava se najprej premakne na ustrezno sled (zaporedni dostop) nato pa je na vrsti krožni dostop do želene lokacije na sledi

## Pomnilniška tehnologija – način dostopa



© mmi

## Asociativni pomnilnik

- Asociativni pomnilnik nima naslovov, zato ta delitev načinov naslavljanja zanje ne velja.
- Pri dostopu podamo del vsebine pomnilniške besede in pomnilnik poišče besedo v kateri se del besede ujema s podanimi biti.
- To je naslovljena beseda, v katero se nato piše ali iz nje bere.

- Če besede s podano vsebino ni v pomnilniku, dostop ni možen in pomnilnik to sporoči s posebnim signalom.
- Primerjava bitov (iskanje vsebine) je v asociativnem pomnilniku realizirana elektronsko in je zelo hitra.
- Podani biti vsebine se paralelno (hkrati) primerjajo z vsebino vseh besed pomnilnika, zato za iskanje ni potrebno zaporedoma brati vsebin besed.



- Realizacija asociativnih pomnilnikov zahteva zelo veliko elementov, zato so majhni, redko večji od 128 pomnilniških besed.
- Čas dostopa  $t_a$  do asociativnega pomnilnika ni krajši kot do običajnih pomnilnikov, zaradi časa, ki je potreben za primerjavo, še nekoliko daljši.
- Zelo hiter pa je asociativni pomnilnik pri iskanju ali je določena vsebina v pomnilniku ali ne, kar izkoriščamo pri predpomnilnikih.

# Spremenljivost

- Pri nekaterih vrstah pomnilnikov lahko pisanje izvršimo samo enkrat, pri normalni uporabi pomnilnika vsebine ni mogoče več spreminjati.
- Pomnilniki, ki jim vsebino pri normalni uporabi ne moremo več spreminjati, so bralni pomnilniki (ROM - Read Only Memory).
- Za pomnilnike, v katere pri normalni uporabi lahko pišemo in iz njih beremo, se uporablja oznaka bralno-pisalni pomnilniki (RAM Random Access Memory).

- Današnji računalniki imajo majhen del glavnega pomnilnika narejen z bralnimi pomnilniki (ROM).
- V njih so shranjeni zagonski programi, ki se izvedejo ob vsakem vklopu računalnika.
- Večji del glavnega pomnilnika pa je narejen z bralno pisalnimi pomnilniki (RAM), da lahko izvaja poljubne programe.
- Računalniki za posebne namene, ki izvajajo fiksni program, pa imajo večji del glavnega pomnilnika samo za branje.

# Obstojnost

- Za shranjevanje informacije se pogosto uporablja fizikalni pojav, ki ni stabilen.
- Če tega ne preprečimo, se informacija s časom lahko izgubi.
- Najpomembnejši vzroki zaradi katerih se shranjena informacija izgubi so:
  - Destruktivno branje (DRAM)
  - Dinamično shranjevanje (DRAM)
  - Odklop vira energije (DRAM in SRAM)

- Pri DRAM pomnilnikih se pri branju kondenzatorji v celi vrstici spraznijo, zato bi se informacija izgubila - **destruktivno branje.**
- Vsakemu branju zato pri DRAM-ih sledi avtomatsko pisanje, ki vzpostavi stanje pred branjem.
- To je vzrok za mrtvi čas pri DRAM pomnilnikih.

- Pri DRAM-ih se informacija v obliki električnega naboja na kondenzatorju s časom hitro izgublja - **dinamično shranjevanje**.
- Zato je pri DRAM-ih potrebno informacijo periodično obnavljati - **osveževanje** (refresh).
- Osveževanje je realizirano tako, da se vrstica, ki se osvežuje, prebere in nato zapiše nazaj.
- Med osveževanjem dostop do DRAM-a ni možen.

- Odklop vira električne energije ali odklop napajanja je tretji vzrok za izgubo shranjene informacije pri nekaterih vrstah pomnilnikov.
- Pomnilnikom, ki ohranijo informacijo tudi po odklopu napajanja, pravimo da so **obstojni**. To so ROM pomnilniki in različne vrste pomožnih pomnilnikov.
- Polprevodniški DRAM in SRAM pomnilniki so **neobstojni**.

# Zanesljivost

- Zanesljivost pomnilnika merimo z verjetnostjo za pojav napake, z BER (Bit Error Rate) ali MTBF (Mean Time Between Failures).
- Napake pri polprevodniških pomnilnikih lahko razdelimo na:
  - Mehke napake, kjer naključni dogodek spremeni vsebino ene ali več pomnilniških celic
  - Trde napake, to so trajne okvare pomnilniških celic



- Pomnilniki z gibljivimi deli imajo običajno manjšo zanesljivost kot polprevodniški pomnilniki.
- Zanesljivost pomnilnikov lahko povečamo z uporabo kod za **detekcijo in korekcijo napak - ECC** (Error Correcting Codes), ki se uporabljajo v glavnem in pomožnih pomnilnikih.
- Magnetni disk HITACHI Deskstar 7K1000 (750 GB marec 2007):
  - BER  $10^{-15}$  ( 1 napačen bit na  $10^{15}$  prenešenih bitov)
  - MTBF 1.200.000 (povprečno število ur med napakama)

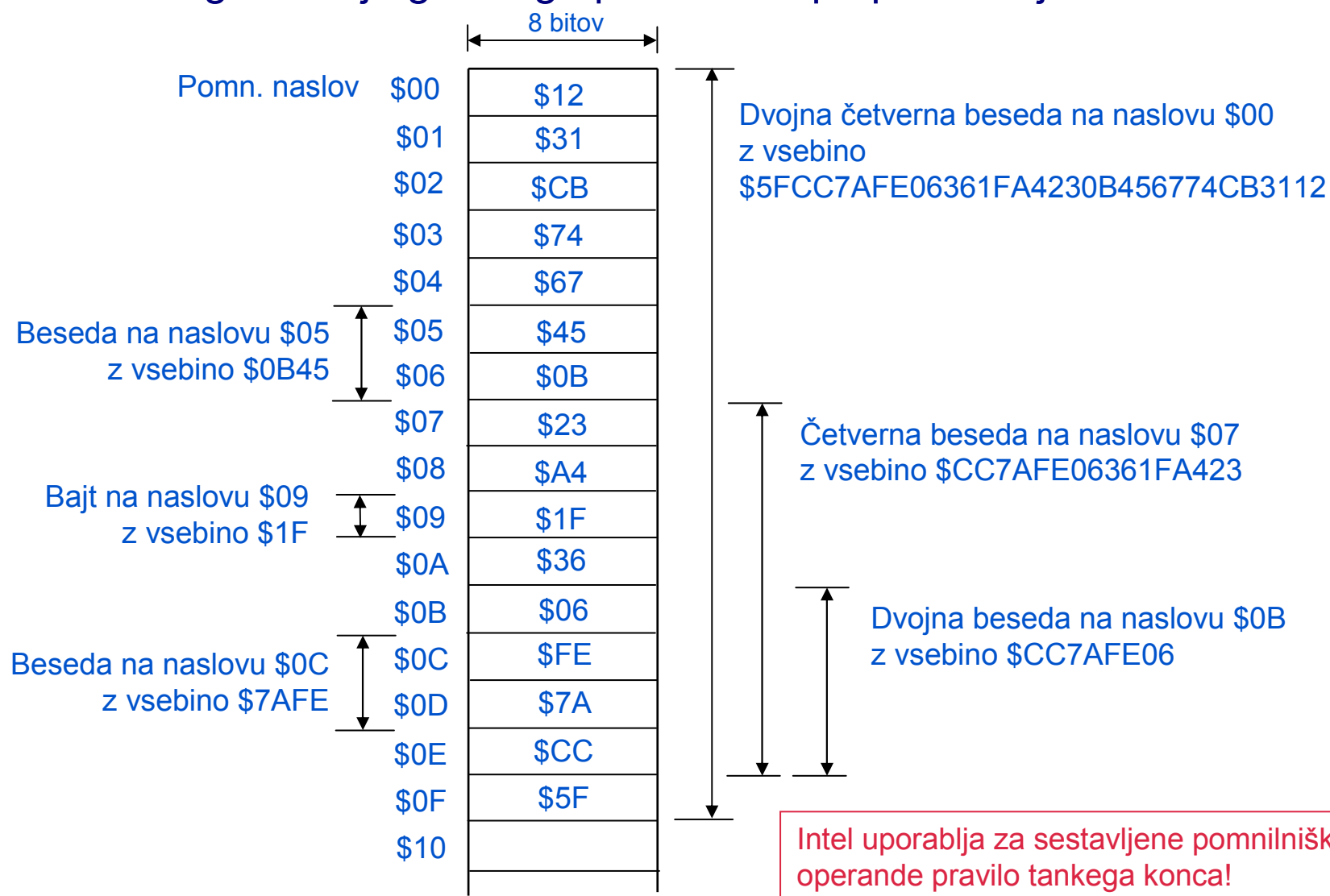
## 9.3 Organizacija glavnega pomnilnika

- Določa kako so biti sestavljeni v pomnilniške besede in kakšen je dostop do njih.
  
- Osnovna parametra pomnilnika sta:
  - Pomnilniška beseda
    - Dolžina pomnilniške besede v bitih
    - n-bitov dolga pomn. beseda  $\Rightarrow 2^n$  različnih vsebin
  
  - Pomnilniški naslov
    - Dolžina pomnilniškega naslova v bitih
    - m-bitni pomn. naslov  $\Rightarrow$  naslovimo lahko  $2^m$  pomn. besed

- Z izbiro dolžine pomnilniške besede in dolžine pomnilniškega naslova so določene osnovne lastnosti glavnega pomnilnika.
  
- Ločljivost pomnilnika - pri enako velikem pomnilniku:
  - Daljša pomnilniška beseda  $\Rightarrow$  krajši naslov
  - Krajša pomnilniška beseda  $\Rightarrow$  daljši naslov
  
- Število bitov, ki se pri enem dostopu prenesejo med CPE in glavnim pomnilnikom ne more biti manjše od ene pomnilniške besede, lahko pa se prenese več sosednjih besed hkrati.

- Sestavljeni pomnilniški operandi (ORA 1-5/80) so lahko shranjeni:
  - Po pravilu tankega konca
  - Po pravilu debelega konca
  
- Sestavljeni pomnilniški operandi so lahko v pomnilniku:
  - Poravnani
  - Neporavnani

## Organizacija glavnega pomnilnika pri procesorjih Intel



## 9.4 Metabiti

- Metabiti so dodatni biti v pomnilniški besedi, ki opisujejo pomen ostalih bitov.
- Večina današnjih računalnikov uporablja metabite samo za detekcijo in korekcijo napak - to so **paritetni biti**.
- Verjetnost za pojav mehke ali trde napake pri današnjih pomnilnikih zaradi velikosti pomnilnikov ni zanemarljiva.
- Skupno ime za razne vrste detekcije in popraviljanja napak z dodatnimi paritetnimi biti je ECC (Error Correcting Codes)

- Pravi metabiti povedo kaj vsebuje pomnilniška beseda:
  - Ukaz
  - Število v fiksni vejici
  - Znak
  - Število v plavajoči vejici
  -
  
- Za računalnike z metabiti torej ne velja, da iz vsebine pomnilniške besede ni moč razbrati kaj vsebuje (ukaz ali podatek).
  
- Metabiti zato predstavljajo pomembno izboljšavo von Neumannovega računalnika, čeprav se zelo redko uporabljajo.

- Prednosti uporabe metabitov:

- Manjše število ukazov
- Avtomatska pretvorba operandov
- Avtomatsko računanje in preverjanje indeksov
- Avtomatsko vzpostavljanje klicnih parametrov
- Ugotavljanje nesmiselnih operacij
- Ugotavljanje nedefiniranih operandov

- Prednosti metabitov so predvsem lažje programiranje v zbirnem jeziku, ki pa ga je zaradi razvoja programskih jezikov vedno manj, zato tudi uporaba metabitov ni razširjena.



## 9.5 Zaščita glavnega pomnilnika

- Zaščita glavnega pomnilnika je mehanizem, ki omogoča zaščito enega programa pred neželjenimi posegi drugega programa.
- Če uporabnik zaradi napake v programu spremeni vsebino pomnilniških lokacij, v katerih je shranjen operacijski sistem, lahko pride do razpada sistema.
- Pri multiprogramskem načinu dela si vsi programi delijo isti pomnilniški prostor, zato je nujno zagotoviti, da en program ne posega v prostor, ki je dodeljen drugim.

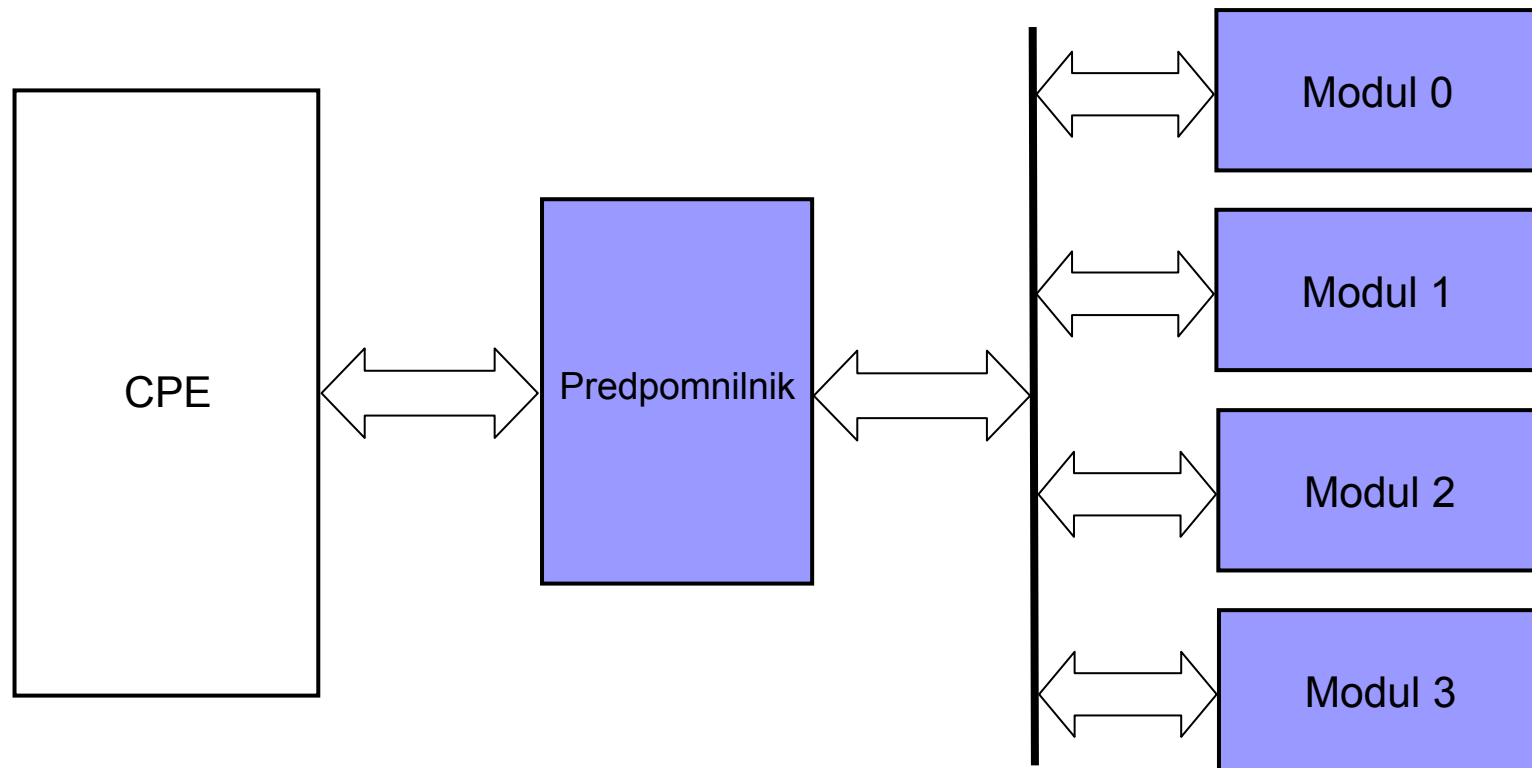
- Danes se ne uporablja več zaščita posameznih pomnilniških besed.
- Glavni pomnilnik je razdeljen na **bloke** ali **strani** velikosti npr. 2048, 4096 ali 8192 besed, ki so zaščitene vsaka zase kot celota.
- Vsaka stran zase ima svoje zaščitne metabite - **zaščitni ključ** (protection key).
- Zaščitni ključi so shranjeni v posebnem pomnilniku, ki ni del glavnega pomnilnika in do njih ni možen dostop z običajnimi ukazi.

- Na računalnikih z navideznim pomnilnikom (danes skoraj vsi računalniki) je zaščita glavnega pomnilnika realizirana kot del navideznega pomnilnika.
- Zaščitni ključi so shranjeni v tabelah strani ali segmentov in ne v posebnem pomnilniku.
- Spreminjanje zaščitnih ključev je možno samo v privilegiranem načinu delovanja.

## 9.6 Pomnilniško prepletanje

- Hitrost glavnega pomnilnika lahko povečamo na dva načina:
  - S širšimi podatkovnimi potmi do glavnega pomnilnika
    - To je dostop do sestavljenih pomnilniških besed
    - Zgradba pomnilnika lahko omogoča dostop do 8, 16, 32, 64, ali več **sosednjih** pomnilniških besed
    - To imenujemo širina pomnilnika
  - S pomnilniškim prepletanjem (memory interleaving)
    - Pri pomnilniškem prepletanju lahko prav tako dostopamo do več pomnilniških besed, ki pa **niso nujno sosednje**

- Pri pomnilniškem prepletanju je glavni pomnilnik razdeljen na  $m$  samostojnih delov, ki jih imenujemo **moduli** (tudi pomnilniške banke).
- Pri  $m$  modulih  $M_0, M_1, \dots, M_{m-1}$  imamo  **$m$ -kratno prepletanje**.
- Vsak modul je samostojen pomnilnik, ki deluje neodvisno od drugih, to pa pomeni, da lahko pri  $m$  modulih poteka največ  $m$  dostopov hkrati.



Glavni pomnilnik s  
4-kratnim prepletanjem

- Pomnilniško prepletanje omogoča:
  - Pri zaporednih dostopih se dostop lahko prične preden se je predhodni dostop končal
  - Možni so istočasni dostopi (če ne padejo v isti modul), če ima računalnik več procesorjev (CPE ali V/I procesorjev)
- Istočasni dostopi do istih modulov so **konfliktni dostopi**, ker se jim v celoti ne da izogniti, *m*-kratno prepletanje vedno ne omogoča *m* istočasnih dostopov.
- Pravilo za prepletanje določa v katerega od modulov spada nek naslov in naj bi omogočalo čim bolj enakomerno porazdelitev dostopov na module.

- Najpogosteje se uporablja **spodnje prepletanje**, kjer je modul določen s spodnjimi biti pomnilniškega naslova.
- Spodnje prepletanje omogoča izkoristiti prostorsko lokalnost.
- Verjetnost, da se bodo zaporedni dostopi nanašali na različne module, je precejšnja, to pa zmanjšuje število konfliktnih dostopov.
- Pri  $m$ -kratnem spodnjem prepletanju je v povprečju možnih  $\sqrt{m}$  istočasnih dostopov.



## Glavni pomnilnik z $m$ - kratnim spodnjim prepletanjem

