

Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

ОАС Софтверско инжењерство и информационе технологије

Организација података

Екстерни меморијски уређаји у раду над подацима

Садржај

- **Увод**
- Екстерни меморијски уређаји
- Комуникација с екстерним меморијским уређајима
- Ресурси

Увод

- Складиштење датотека и база података
 - физичка структура података датотеке или базе података (Mogin, 2008)
 - компоненте семантике, придружене чворовима и ивицама графа и информације о самим ивицама (односно подаци и везе логичке структуре података) смештене на медијум екстерног меморијског уређаја и проширене низом елемената својствених поступцима за меморисање података

Увод

- Складиштење датотека
 - датотеке бивају обрађиване у оперативној меморији (ОМ) а чуване на екстерном меморијском уређају (ЕМУ) (Mogin, 2008)
 - време извођења основних радњи над подацима битно је краће код ОМ него код ЕМУ
 - код ОМ време извођења радње практично не зависи од положаја коришћене локације, што не мора важити за ЕМУ
 - ЕМУ омогућава трајно меморисање података, а ОМ само док постоји напајање
 - цена меморисања података нижа је код ЕМУ него код ОМ
 - путем различитих технолошких механизма ЕМУ може бити повезан са ОМ и остатком система уопште, чиме је омогућена размена података

Увод

- Поређење перформанси меморијских уређаја
 - пример (Wang et al., 2023)

Врста уређаја	Кашњење, читање	Кашњење, писање	Проток, читање	Проток, писање	Цена
DRAM	60 ns	60 ns	20 GB/s	20 GB/s	4,49 USD/GB
NVMe SSD	120 μ s	30 μ s	2 GB/s	0,5 GB/s	0,21 USD/GB
магнетни диск	5 ms	5 ms	0,1 GB/s	0,1 GB/s	0,03 USD/GB

Садржај

- Увод
- **Екстерни меморијски уређаји**
- Комуникација с екстерним меморијским уређајима
- Ресурси

Екстерни меморијски уређаји

- Примери технолошких решења намењених складиштењу података (Mogin, 2008; Coughlin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - магнетни дискови
 - магнетне траке
 - оптички медијуми
 - полупроводнички меморијски уређаји

Екстерни меморијски уређаји

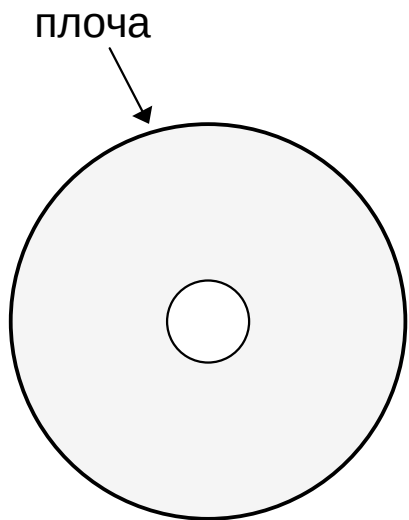
- Магнетни диск (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - меморијски уређај с директним приступом
 - почетку локације за податке бива приступљено директно путем механичког кретања
 - садржај локације за податке бива читан бит-серијски
 - меморијски медијум је магнетног типа
 - деценијама је основно решење за складиштење података

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - меморијски медијум (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023; Nordrum, 2019)

- **плоча**

- једна или више међусобно спрегнутих кружних плоча чине меморијски медијум
 - плоче су постављене на заједничку осовину а на једној плочи постоје две стране (две површине)
 - **површина**
 - једна страна плоче
 - на површинама плоча је танки слој феромагнетног материјала
 - пример
 - материјал у виду легуре гвожђа и платине
 - зрнаста структура материјала, где десетак зрна одговара једном биту а пречник једног зрна је реда nm
 - на основу два смера намагнетисања могу бити изведене две вредности (0 и 1)



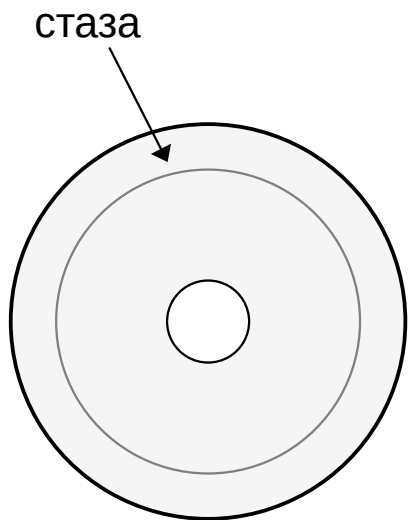
Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска

- меморијски медијум (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023; Zhu, 2003)

- **стаза**

- површина плоче је издељене на више концентричних кружних стаза
 - стаза је кружница дуж које подаци бивају серијски меморисани у бинарном облику
 - модел уздужног записивања
 - вредност 1 као наилазак на промену у оријентацији локалног магнетног момента
 - вредност 0 као задржавање оријентације локалног магнетног момента
 - стазе на истој плочи се разликују по свом полупречнику

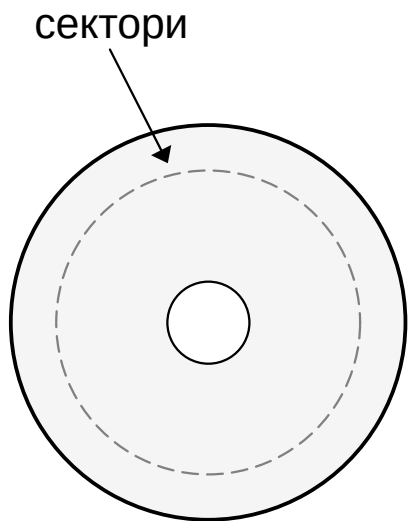


Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - меморијски медијум (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023; Coughlin, 2008)

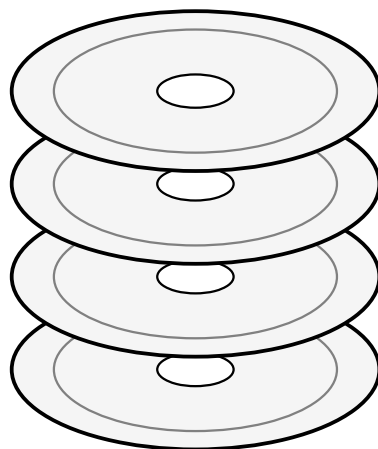
- **сектор**

- стаза је издељена на више сектора раздвојених међусекторским размацама
 - сектор је најмања адресибилна локација на диску
 - сектор садржи податке који су серијски меморисани у бинарном облику
 - корисни подаци налазе се у секторима
 - сектор на свом почетку садржи редни број, који је уписан у поступку преформатирања
 - величина сектора била је обично 512 бајтова
 - у новије време може бити и 4096 бајтова
 - међусекторски размак постоји између суседних сектора и у њему нема корисних података



Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - меморијски медијум (Mogin, 2008)
 - **цилиндар**
 - цилиндар је скуп свих стаза истог полупречника на површинама једног комплета плоча
 - цилиндри на истом комплету плоча се разликују по свом полупречнику



Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - меморијски медијум – пример израчунавања капацитета (Mogin, 2008)
 - капацитет сектора K_s
 - капацитет стазе K_t
 - $K_t = nK_s$
 - n – број сектора на стази
 - капацитет цилиндра K_c
 - $K_c = pK_t$
 - p – број површина диска
 - капацитет диска K_d
 - $K_d = CK_c$
 - C – број цилиндара диска

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - капацитет диска (Mogin, 2008)
 - могућност варирања капацитета стазе на диску
 - дискови с константним капацитетом стазе
 - стазе јесу истог капацитета
 - густина уписа није иста за све стазе
 - код стаза већег полупречника је мања густина уписа него код стаза мањег полупречника
 - дискови с променљивим капацитетом стазе
 - стазе нису истог капацитета
 - густина уписа јесте иста за све стазе

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - капацитет диска (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - могућност зонске организације диска
 - вишезонски дискови
 - диск је организован кроз више зона
 - зона је скуп узастопних стаза на једној површини таквих да им је број сектора по стази идентичан
 - спољашње зоне имају већи број сектора по стази од унутрашњих зона

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - блок (Mogin, 2008)
 - блок је организациона јединица података на диску
 - блок је такође јединица размене података између диска и оперативне меморије
 - цео блок бива преношен и приликом уписа на диск и приликом читања с диска
 - блок садржи податке једног или више сектора
 - блок очекивано обухвата физички суседне секторе
 - блок је најчешће у оквиру једне стазе на диску
 - величина блока бива одређена у оквиру оперативног система и не мења се током експлоатације
 - зависно од величине и карактера блока, неки сектори на стази могу остати ван блокова, те послужити као резервни сектори за замену неисправних сектора на стази

Екстерни меморијски уређаји

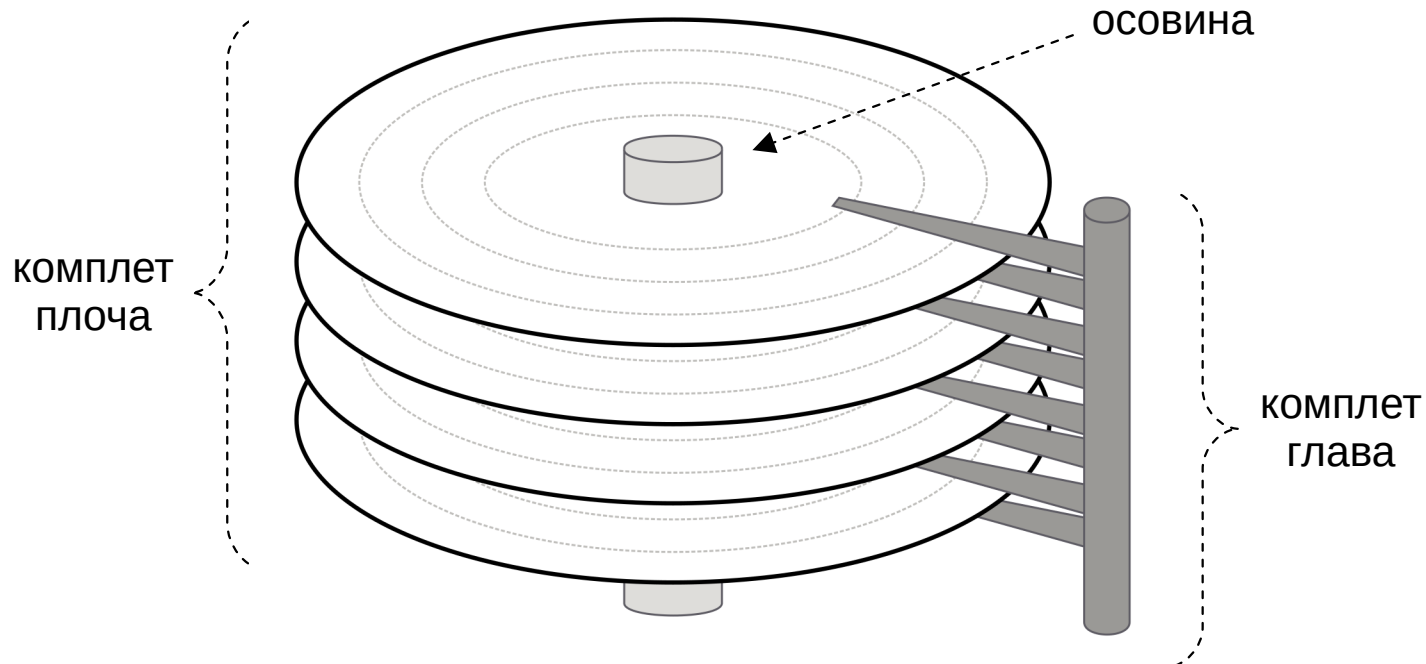
- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - блок (Mogin, 2008)
 - два значења појма блок
 - блок као меморијска локација на диску која садржи бар један сектор
 - блок као организациона јединица података, која је такође јединица размене података између диска и оперативне меморије
 - блок као организациона јединица бива смештан у блок као локацију

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - блок – капацитет (Mogin, 2008)
 - капацитет локације за смештај блока K_b
 - $K_b = mK_s$
 - $m = 2^i$ ($i = 0, 1, \dots$)
 - највећи могући број блокова на стази b_t
 - $b_t = \text{floor}(K_t / K_b)$

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - механизам за упис и читање (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - координисани рад комплета плоча и комплета глава



поједностављени приказ комплета плоча и комплета глава

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - механизам за упис и читање (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - координисани рад комплета плоча и комплета глава
 - комплет плоча
 - постављен на осовину, која током основног рада има константну угаону брзину ω
 - угаона брзина код савремених уређаја обично је у распону од 7200 min^{-1} до 15000 min^{-1}
 - време да плоча направи пун круг последично је у распону од 4 ms до $8,33 \text{ ms}$

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - механизам за упис и читање (Mogin, 2008; Nordrum, 2019; A*STAR Research, 2013)
 - координисани рад комплета плоча и комплета глава
 - комплет глава за упис и читање
 - свака површина комплета плоча има своју главу за упис и читање, а главе су међусобно спрегнуте
 - нпр. глава на 2 nm од површине плоче
 - сензор на глави служи за читање
 - електромагнет на глави служи за писање
 - корачни мотор изводи позиционирање глава у односу на осовину диска
 - главе могу бити у онолико положаја колико има цилиндара на диску

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - механизам за упис и читање (Mogin, 2008)
 - поступак читања/писања
 - комплет глава бива позициониран на одговарајућу стазу
 - када ротацијом плоча почетак одговарајућег сектора буде поравнат с комплетом глава, бива активирана глава за одговарајућу површину
 - рад активне главе
 - случај читања
 - активна глава детектује податке бит по бит
 - случај писања
 - активна глава поставља податке бит по бит

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - извођење улазно-излазне активности
 - задавање адресе блока у формату (c, t, s)
 - c – редни број цилиндра
 - почетни цилиндар је онај највећег полупречника
 - t – адреса стазе
 - редни број површине на којој је стаза
 - s – редни број сектора који представља почетак блока

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - извођење улазно-излазне активности
 - кораци
 - 1. позиционирање комплета глава на цилиндар c
 - 2. активирање главе за упис и читање која одговара површини t
 - 3. чекање на долазак сектора s до позиције главе за упис и читање
 - 4. извршење актуелног читања/писања (трансфер, пренос)
 - трајање корака
 - кораци 1, 3 и 4 подразумевају активности електромеханичких делова, што је битно спорије од корака 2, који подразумева електронску активност
 - трајање корака 2 може бити занемарено у поједностављеној анализи трајања

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - **време улазно-излазне активности (t_{ui})**
 - главне компоненте
 - **време позиционирања на цилиндар (t_p)**
 - **ротационо кашњење (t_r)**
 - **време трансфера (t_t)**

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - време позиционирања на цилиндар (t_p)
 - време потребно да комплет глава буде померен с текућег на адресирани цилиндар
 - време зависи од брзине померања комплета глава и растојања између текућег и адресираног цилиндра
 - померање комплета глава је механичко кретање
 - фазе позиционирања
 - убрзавање – покретање и кретање уз повећање брзине
 - крстарење – кретање пуном брзином
 - успоравање – кретање уз смањење брзине
 - примиривање/пристајање – фино постављање на циљну стазу
 - често незанемарљивог трајања, нпр. од 0,5 ms до 2 ms

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - време позиционирања на цилиндар (t_p)
 - карактеристични случајеви – примери перформанси
 - случај када се текући и адресирани цилиндар поклапају
 - $t_p^0 = 0 \text{ ms}$
 - случај када су текући и адресирани цилиндар суседи
 - $t_p^1 \approx 0,8 \text{ ms}$
 - случај када су текући и адресирани цилиндар на највећем растојању (један цилиндар је почетни а други крајњи)
 - $t_p^{max} \approx 24 \text{ ms}$
 - средњи случај
 - $\bar{t}_p \approx 8 \text{ ms}$
 - анализа пређеног растојања приликом позиционирања
 - средње растојање очекивано је трећина највећег растојања

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008)
 - време позиционирања на цилиндар (t_p)
 - мере за обезбеђење повољних перформанси
 - податке који ће очекивано бити читани један за другим треба смештати у блокове на истом цилиндру, како би било избегнуто померање комплета глава

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008)
 - ротационо кашњење (t_r)
 - време потребно да адресирани сектор дође до позиције главе за упис и читање
 - континуална случајна променљива с униформном расподелом
 - $0 \leq t_r \leq 1 / \omega$

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008)
 - ротационо кашњење (t_r)
 - карактеристични случај
 - средњи случај (време полуобрта)
 - $\bar{t}_r = 1 / (2 \omega)$
 - пример перформанси за $\omega = 7200 \text{ min}^{-1}$
 - $\bar{t}_r \approx 4,2 \text{ ms}$

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008)
 - ротационо кашњење (t_r)
 - мере за обезбеђење повољних перформанси
 - почеци стаза с истог цилиндра могу бити смицани тако да не буде ротационог кашњења при преласку с последњег блока једне стазе на први блок наредне стазе
 - могућност континуалног проласка кроз све блокове једног цилиндра
 - потребно урачунати време за деактивацију једне и активацију наредне главе за упис и читање

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - време трансфера (t_t)
 - време потребно да подаци буду прочитани с одговарајуће плоче или уписани на њу

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - време трансфера (t_t)
 - карактеристични случај
 - време читања/писања блока
 - $T_b = K_b / (\omega K_t)$
 - ωK_t је брзина трансфера
 - количина података која може бити прочитана/уписана у јединици времена
 - нпр. 105 MB/s

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска

- време улазно-излазне активности (Mogin, 2008; Gim & Won, 2011; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)

- пример

- карактеристике хипотетичког диска
 - капацитет стазе $K_t = 320 \text{ KB}$ ($n = 640$, $K_s = 512 \text{ B}$)
 - угаона брзина $\omega = 5400 \text{ min}^{-1}$
 - средње ротационо кашњење $\bar{t}_r = 1 / (2 \omega) = 5,56 \text{ ms}$
 - време читања блока $T_b = K_b / (\omega K_t) = 0,14 \text{ ms}$
 - средње време позиционирања на цилиндар $\bar{t}_p = 8 \text{ ms}$
 - капацитет блока $K_b = 4 \text{ KB}$

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - време улазно-излазне активности (Mogin, 2008; Gim & Won, 2011; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)
 - пример
 - груба процена времена активности
 - случај 1 – активност читања једног блока
 - блок се налази на једној стази
 - $t = \bar{t}_p + \bar{t}_r + T_b = 13,70 \text{ ms}$
 - случај 2 – активност читања $m = 64$ блока
 - подаци сукцесивно (секвенцијално) распоређени по диску и налазе се на истом цилиндру
 - $t_m^{sek} = \bar{t}_p + \bar{t}_r + m T_b = 22,52 \text{ ms}$
 - подаци разбацани (расути) по диску и налазе се на различитим цилиндрима
 - $t_m^{ras} = m (\bar{t}_p + \bar{t}_r + T_b) = 876,80 \text{ ms}$

средње време позиционирања
 $\bar{t}_p = 8 \text{ ms}$

средње ротационо кашњење
 $\bar{t}_r = 5,56 \text{ ms}$

време читања блока
 $T_b = 0,14 \text{ ms}$

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска

- време улазно-излазне активности

(Mogin, 2008; Gim & Won, 2011; Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)

- пример

- груба процена времена активности

- случај 1 – активност читања једног блока

- блок се налази на једној стази

- $t = \bar{t}_p + \bar{t}_r + T_b = 13,70 \text{ ms}$

- случај 2 – активност читања $m = 64$ блока

- подаци сукцесивно (секвенцијално) распоређени по диску и налазе се на истом цилиндру

- $t_m^{sek} = \bar{t}_p + \bar{t}_r + m T_b = 22,52 \text{ ms}$

- подаци разбацани (расути) по диску и налазе се на различитим цилиндрима

- $t_m^{ras} = m (\bar{t}_p + \bar{t}_r + T_b) = 876,80 \text{ ms}$

$$\frac{t_m^{sek}}{t} = 1,64$$

$$\frac{t_m^{ras}}{t} = 64$$

$$\frac{t_m^{ras}}{t_m^{sek}} = 38,93$$

средње време позиционирања
 $\bar{t}_p = 8 \text{ ms}$

средње ротационо кашњење
 $\bar{t}_r = 5,56 \text{ ms}$

време читања блока
 $T_b = 0,14 \text{ ms}$

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск

- перформансе (Mogin, 2008)

- магнетни диск је у односу на оперативну меморију много спорији уређај
 - организација датотека треба да буде прилагођена карактеристикама диска
 - треба што више смањити број приступа цилиндру и број ротационих чекања при обради датотеке
 - капацитет блока као јединице размене података треба да буде што већи али не и превелик
 - време читања блока чини скоро занемарљив део времена приступа
 - већи блок захтева и већи део оперативне меморије
 - већи блок може подразумевати и присуство веће количине непотребних података у блоку

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск
 - перформансе (Mogin, 2008)
 - примери техника за ублажавање проблема магнетног диска као уског грла у обради већих количина података
 - размештање блокова датотеке на више диск јединица
 - меморисање делова истог блока на више диск јединица
 - коришћење оперативне меморије у својству диска

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - контролер јединице диска (Mogin, 2008)
 - одмењивање централног процесора у управљању радом диска
 - врсте контролера диска – примери
 - једноставни контролери
 - контролери с директним приступом меморији
 - специјализовани улазно-излазни процесори

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - контролер јединице диска (Mogin, 2008)
 - једноставни контролер
 - основне операције управљања у надлежности контролера – примери
 - пријем наредбе од централног процесора
 - наредба уписа или читања
 - пријем адресе блока на диску
 - управљање померањем комплета глава за упис и читање
 - активирање адресиране главе за упис и читање
 - детектовање почетка адресираног сектора
 - пријем података у виду меморијских речи од централног процесора и њихова конверзија у бајт-серијски облик при упису
 - конверзија података из бајт-серијског облика у меморијске речи при читању и њихово слање централном процесору

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - контролер јединице диска (Mogin, 2008)
 - једноставни контролер
 - централни процесор је велики део времена посвећен управљању синхронизацијом рада јединице диска и осталих делова рачунарског система у извршавању улазног-излазног програма
 - највећи део времена одлази на тестирање спремности јединице диска за размену података

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - контролер јединице диска (Mogin, 2008)
 - контролер с директним приступом меморији (енгл. *direct memory access*)
 - контролер обавља задатке једноставног контролера
 - контролер размењује податке без посредовања централног процесора
 - оперативни систем преко централног процесора шаље контролеру наредбу за извршавање
 - врста операције, адреса блока на диску, адреса у оперативној меморији, број бајтова за размену
 - контролер ради на извршењу наредбе, што подразумева активности у вези с диском и оперативном меморијом, као и размену података
 - контролер извештава централни процесор о завршетку извршавања наредбе

Екстерни меморијски уређаји

- Магнетни диск – јединица магнетног диска
 - контролер јединице диска (Mogin, 2008)
 - улазно-излазни процесор
 - улазно-излазни процесор у спрези с једноставним контролером
 - улазно-излазни процесор обавља активности као и контролер с директним приступом меморији
 - улазно-излазни програм за извршавање је у локалној меморији улазно-излазног процесора или оперативној меморији централног процесора
 - припрема улазно-излазног програма је у надлежности оперативног система

Садржај

- Увод
- Екстерни меморијски уређаји
- **Комуникација с екстерним меморијским уређајима**
- Ресурси

Комуникација с екстерним меморијским уређајима

- Повезивање ЕМУ

- примери врста технологија у повезивању (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023)

- периферијска магистрала

- традиционална примена
 - дељени медијум
 - превасходно за релативно споре уређаје

- УИ чип

- савремена примена
 - везе за појединачне парове компоненти (енгл. *point-to-point interconnect*)
 - могућност повезивања разноврсних уређаја

Комуникација с екстерним меморијским уређајима

- Повезивање ЕМУ

- примери врста интерфејса у повезивању (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023; Coughlin, 2008)

- *ATA (AT Attachment)*
 - *SATA (Serial ATA)*
 - *eSATA (External ATA)*
 - *SCSI (Small Computer System Interface)*
 - *SAS (Serial Attached SCSI)*
 - *PCIe (Peripheral Component Interconnect Express)*
 - *USB (Universal Serial Bus)*

Комуникација с екстерним меморијским уређајима

- Интеракција са ЕМУ

- главне методе интеракције (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2023; Mogin, 2008)

- примена посебних УИ инструкција

- углавном су инструкције привилегованог нивоа
 - у надлежности оперативног система

- примена УИ заснованог на меморијском пресликавању

- регистри уређаја представљени као меморијске локације
 - радње бивају преусмерене с меморије на уређај

- једнообразност рада над различитим типовима уређаја

- оперативни систем интерно користи различите улазно-излазне програме за рад над различитим типовима уређаја

- драјвери уређаја у контексту оперативних система фамилије *Unix* и *Linux*

Садржај

- Увод
- Екстерни меморијски уређаји
- Комуникација с екстерним меморијским уређајима
- **Ресурси**

Ресурси

- Извори и литература
 - Pavle Mogin. Strukture podataka i organizacija datoteka. 3. izdanje. Računarski fakultet (Beograd, Srbija), CET (Beograd, Srbija). 2008.
 - Glava 3. Uloga operativnog sistema u upravljanju podacima
 - Glava 5. Fizičke strukture datoteka i postupci razmene podataka
 - Remzi H. Arpaci-Dusseau, Andrea C. Arpaci-Dusseau. Operating Systems: Three Easy Pieces. Version 1.10. Arpaci-Dusseau Books. 2023.
 - 36. I/O Devices
 - 37. Hard Disk Drives
 - 44. Flash-Based SSDs

Ресурси

- Извори и литература
 - Thomas M. Coughlin. Digital Storage in Consumer Electronics: The Essential Guide. Elsevier/Newnes (Amsterdam, Netherlands; Boston, MA, USA). 2008.
 - Chapter 2 - Fundamentals of Hard Disk Drives
 - Ying Wang, Wen-Qing Jia, De-Jun Jiang, Jin Xiong. A Survey of Non-Volatile Main Memory File Systems. Journal of Computer Science and Technology. 2023; 38; 348–372.
 - Jian-Gang (Jimmy) Zhu. New Heights for Hard Disk Drives. Materials Today. 2003; 6(7–8); 22–31.
 - Jongmin Gim, Youjip Won. Relieving the Burden of Track Switch in Modern Hard Disk Drives. Multimedia Systems. 2011; 17; 219–235.

Ресурси

- Извори и литература
 - Amy Nordrum. Lasers vs. Microwaves: The Billion-Dollar Bet on the Future of Magnetic Storage - IEEE Spectrum. [Internet]. 2019. URL: <https://spectrum.ieee.org/lasers-vs-microwaves-the-billiondollar-bet-on-the-future-of-magnetic-storage>
 - A*STAR Research. Making the Switch. [Internet]. 2013. URL: <https://research.a-star.edu.sg/articles/highlights/making-the-switch/>

Ресурси

- Додатни ресурси
 - A*STAR Research. Hard Drive Boost Comes in Layers of Iron and Cobalt. [Internet]. 2017. URL: <https://research.a-star.edu.sg/articles/highlights/hard-drive-boost-comes-in-layers-of-iron-and-cobalt/>