

# Napredni algoritmi i strukture podataka

Otkaz i oporavak, Sekvencijalno i nasumično čitanje i pisanje

Strukture zasnovane na log-u, Write Ahead Log



Univerzitet u Novom Sadu  
Fakultet Tehničkih Nauka

# Otkaz i oporavak

- ▶ Mreža je vrlo **nepouzdana**
- ▶ Čvorovi otkazuju **nezavisno** jedan od drugog
- ▶ Njihovi diskovi **ne moraju nužno** da otkažu
- ▶ To možemo da iskoristimo da **rekonstruišemo stanje sistema**, u slučaju otkaza
- ▶ Cilj nam je da postignemo mogućnost **povratka stanja** sistema, nakon otkaza, tj. **nakon ponovnog pokretanja** sistema

Kako to da postignemo, ideje : ) ?

## Sekvencijalno i nasumično čitanje i pisanje

- ▶ Ulazno izlazne operacije (I/O) na računaru, **nisu jednake** po pitanju performansi i mogućnosti!
- ▶ Ovde se pod I/O operacijama misli na operacije koje se izvode nad **diskom** računara
- ▶ Da bismo razumeli razliku u performansama I/O operacija, zamislite kancelariju veterinara
- ▶ Svi podaci se skladište na papiru u ormarićima za datoteke
- ▶ Za jednu životinju, sve informacije se čuvaju u **različitim** fasciklama
- ▶ Fascikle su smeštene u **različite** ormare prema nekim kategorijama

## Pitanje

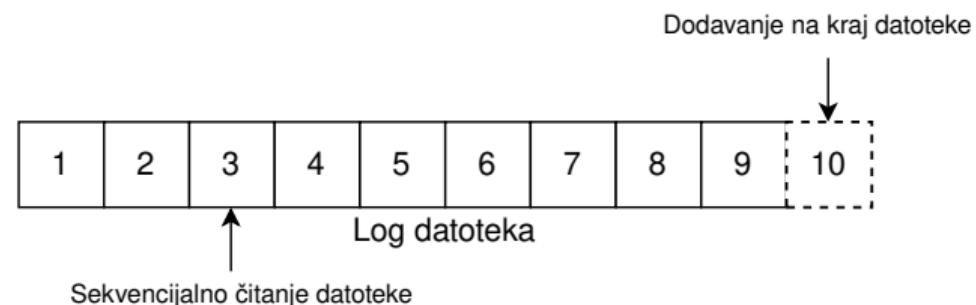
- ▶ Koliko je jednostavno pronaći potrebne informacije?
- ▶ Da li bi bilo lakše da se svi podaci nalaze u jednoj datoteci, tako da možemo da ih preuzmemo u jednom koraku?

- ▶ Ovo je u osnovi razlika dva pristupa: **(1)** nasumičnog (random) I/O-a i **(2)** sekvencijalnog I/O-a
- ▶ Nasumično pristupanje podacima je **mnogo sporije** i manje efikasno od sekvencijalnog (uzastopnog) pristupa
- ▶ Pogotovo kada su u ugri **velike količine** podataka
- ▶ Jednostavno gledano, brže je pisati/čitati podatke sa jednim **uzastopnim** I/O, nego više manjih nasumičnih I/O operacija
- ▶ Za ovo postoje **jednostavne strukture podataka** na koje se možemo osloniti
- ▶ Ovo naravno **ne znači da treba izbegavati nasumični pristup!!**
- ▶ Treba razmisliti o radu sistema, i pristupu podacima – identifikovati potrebe!

## Strukture zasnovane na log-u

- ▶ Osnovna organizacija podataka je **log** (dnevnik) — niz **append-only** zapisa
- ▶ Ideja je nastala 1980ih kao *Log Structured File System*
- ▶ Danas se ova ideja dosta koristi kod sistema koji rade sa velikim količinama podataka
- ▶ Zapisi u *log-u* su nepromenljivi, i dodaju se u strogo u sekvenčnom redosledu **na kraj datoteke – efikasne operacije**
- ▶ *Log* je struktura podataka sa **konstantnom**  $\mathcal{O}(1)$  brzinom **pisanja/čitanja**
- ▶ *Log* je efikasan na HDD i SSD diskovima
- ▶ Brzina se **ne smanjuje** čak i ako log ima terabajte podataka
- ▶ Uzmite to u obzir jer su u *cloud-u* HDD-ovi **jeftiniji** od SSD-ova

- ▶ Čitanje  $\mathcal{O}(1)$
- ▶ Pisanje  $\mathcal{O}(1)$
- ▶ Pretraga  $\mathcal{O}(n)$  — full scan



## Problem

Od vas se zahteva da implementirate sistem za skladištenje velike količine podatka (u npr. Facebook-u). Prvo je potrebno da rešimo problem trajnosti podataka, i pred vama su sledeći zahtevi:

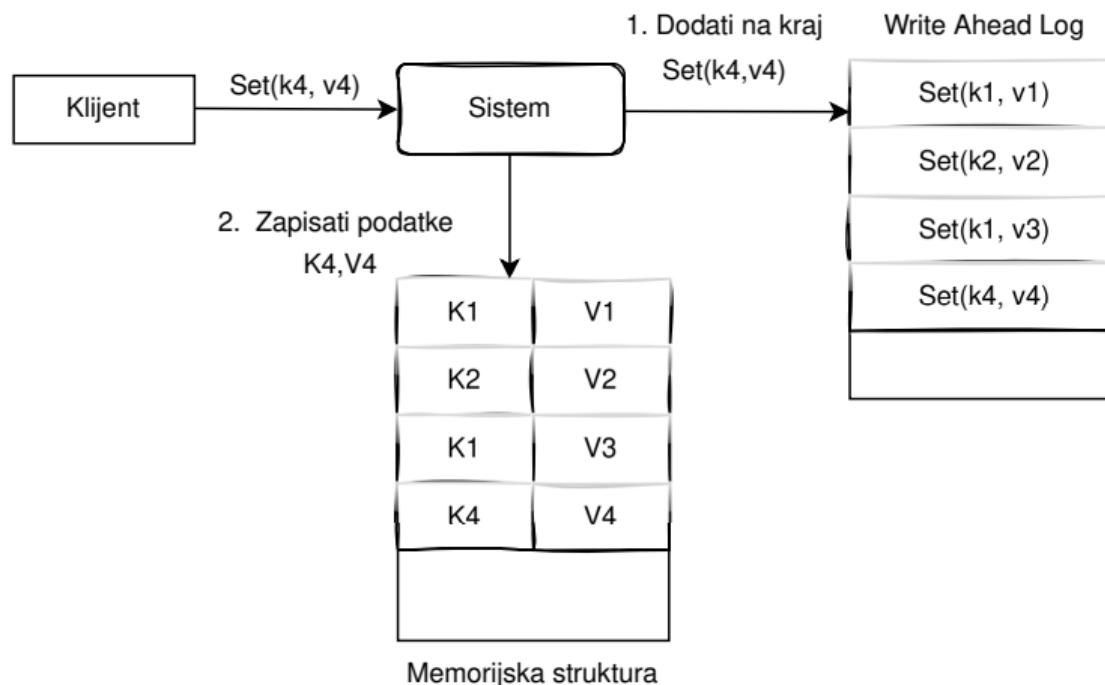
- ▶ Snažna garancija trajnosti podataka je potrebna, čak i u slučaju da mašine otkažu
- ▶ Kada mašina pristane da izvrši operaciju, trebalo bi da to uradi čak i ako ne uspe ili se restartuje gubeći prethodno stanje u memoriji
- ▶ U slučaju otkaza, moramo imati mogućnost da rekonstruišemo stanje pre otkaza

Predlozi :)?

## Write Ahead Log - Ideja

- ▶ Kada se zapis upiše u neko skladište podataka, on se čuva na **dva** mesta: **(1)** Memorjska struktura (više o tome kasnije) i **(2)** Write Ahead Log (WAL).
- ▶ WAL deluje kao **rezervna kopija** na disku, za memorjsku strukturu vodeći evidenciju o **svim operacijama** nad skladištem
- ▶ U slučaju **ponovnog pokretanja** sistema (restart), memoriska struktura se može u **potpunost** rekonstruisati ponavljanjem operacija iz WAL-a
- ▶ Kada memorjska strukutra dostigne **definisani kapacitet**, transformiše se u **novu permanentnu** strukturu na disku (više o tome kasnije)
- ▶ WAL se **briše** sa diska da bi se napravio prostor za **novi** WAL
- ▶ Vrlo **jednostavna**, vrlo **moćna** ideja – *Occam's razor*

# Koraci zapisa



## Write Ahead Log - Osobine

- ▶ Sekvencijalni I/O je **brži** od nasumičnih I/O operacija
- ▶ Sistem koji čuvaju/obradjuju velike količine podataka treba da **odgovare** ovoj realnosti
- ▶ WAL koristi **isključivo sekvencijalni I/O** za skladištenje (**privremenih**) podataka na disku
- ▶ WAL kao struktura se **direktno oslanja** na strukturu zasnovanu na log-u
- ▶ Prosto gledano, WAL je jedan **veliki log** na disku
- ▶ ALI, i dodaje neke svoje **specifičnosti**, da bi odgovorio raznim problemima
- ▶ Prilično **moćan i široko korišćen** mehanizam u modernom softveru

## Write Ahead Log - Osobine

- ▶ Ovaj pristup ima i svoje **nedostatke** — *Nema besplatnog ručka!*
- ▶ WAL **plaća** svoju poboljšanu brzinu pisanja, **dodatnim prostorom** na disku
- ▶ Svaki put kada se zapis **ažurira**, stare verzije zapisa se **čuvaju i zauzimaju dodatan** prostor na disku – *nepromenljivost podataka*
- ▶ Ovim postižemo da se podaci **neće menjati**, i u slučaju otkaza, možemo da **reskonstruišemo zapise** kako su se oni dešavali
- ▶ Ali zauzimajući **dodatne** resurse za te operacije
- ▶ Međutim, **dobrovoljno** se odričemo tih resursa, zarad benefiti koje nam ta žrtva donosi

## Write Ahead Log - Space Amplification

- ▶ Čuvanje **dodatnih** informacija, u teoriji dizajna baze podataka se zove **Amplifikacija prostora (Space Amplification)**
- ▶ To je odnos (faktor amplifikacije) **veličine datoteke** baze podataka na disku i **veličine podataka**.
- ▶ Ako uskladištimo **više** pokaziva v ca/metapodataka sa korisničkim podacima, **vaća** amplifikacija - proračuvanati unapred
  - ▶ Sa **većom** amplifikacijom prostora **brzo** nam ponestane prostora na disku
  - ▶ **Niska** vrednost je **važnija za fleš memoriju** nego za disk zbog cene po GB za kapacitet skladištenja.
- ▶ **Na primer, skup podataka od 1 GB sa faktorom amplifikacije od 2x bi rezultirao korišćenjem diska od 2 GB.**

## Write Ahead Log - Buffered i Unbuffered I/O

- ▶ Ovo je jedna od velikih **tema za debatu** u dizajnu baze podataka — baferovan nasuprot nebaferovan I/O
- ▶ Danas aplikacije zahtevaju **viš** se od baza podataka, dok diskovi **ne drže korak** sa ovim zahtevima
- ▶ Da bi se diskovi **učinili bržim**, OS mapira delove diska u memoriju i radi **sinhroniaciju** (tema za sledeći put)
- ▶ Ovaj mehanizam **amortizuje** razlike u brzinama diskova i memorije
- ▶ ALI donosi **dodatne probleme** koje nikako **ne smemo** ignorisati

## Ideja

- ▶ Promene **na disku** se dešavaju **samo u memoriji**, a periodično OS **upisuje** promene na fizički disk
- ▶ Ovo je poznato kao **baferovani I/O** – zapisujemo podatke u **bafer** koji se na kraju **isprazni** na disk
- ▶ Baferovani I/O se **može izbeći** korišćenjem I/O bez baferovanja — podatke upisujemo **direktно** na fizički disk **odmah** kako dolaze
- ▶ Ovo može rezultovati **prevelikim brojem operacija ka disku**
- ▶ Dodatno usporava sistem, **ALI** daje **strožije** garancije trajnosti podataka
- ▶ Opet imamo dva ekstrema – uzeti **najbolje** od dva sveta

## Write Ahead Log - Struktura

- ▶ Struktura može da se **razlikuje** od sistema do sistema kao i same upotrebe, ali neka **okvirna** struktura bi sadržala sledeće elemente:
  - ▶ Identifikator zapisa — id
  - ▶ Niz **bajtova** koji reprezentuje podatke koji se zapisuju
  - ▶ Informaciju da li je podatak obrisan (*Tombstone*) – **nema izmene niti brisanja sadržaja**
  - ▶ Vremensku **odrednicu** kada je zapis načinjen - fizički ili uglavnom logički sat
- ▶ Da li nam je ovo dosta da rekonstruišemo stanje?
- ▶ Da li vidite dodatne potencijalne probleme?
- ▶ Da li podatke čuvati u tekstualnoj datoteci?

## Primer velikana RockDB

Struktura **može da se razlikuje**, primer je RockDB, popularan engine za NoSQL engine:

|          |           |           |                 |         |          |
|----------|-----------|-----------|-----------------|---------|----------|
| +-----+  | +-----+   | +-----+   | +-----+         | +---    | ... ---+ |
| CRC (4B) | Size (2B) | Type (1B) | Log number (4B) | Payload |          |
| +-----+  | +-----+   | +-----+   | +-----+         | +---    | ... ---+ |

CRC = 32bit hash computed over the payload using CRC

Size = Length of the payload data

Type = Type of record

(kZeroType, kFullType, kFirstType, kLastType, kMiddleType )

The type is used to group a bunch of records together to represent blocks that are larger than kBlockSize

Payload = Byte stream as long as specified by the payload size

Log number = 32bit log file number, so that we can distinguish between records written by the most recent log writer vs a previous one.

(<https://github.com/facebook/rocksdb/wiki/Write-Ahead-Log-File-Format>)

## Uprošćena verzija WAL-a

Format koji ćemo mi koristiti **za sada** biće sličan RocksDB-u, ali malo uprošćen

| CRC (4B) | Timestamp (16B) | Tombstone(1B) | Key Size (8B) | Value Size (8B) | Key | Value |
|----------|-----------------|---------------|---------------|-----------------|-----|-------|
|          |                 |               |               |                 |     |       |

CRC = 32bit hash computed over the payload using CRC

Key Size = Length of the Key data

Tombstone = If this record was deleted and has a value

Value Size = Length of the Value data

Key = Key data

Value = Value data

Timestamp = Timestamp of the operation in seconds

- ▶ Podaci se čuvaju u **binarnom obliku** - čitanje, **ispravno** prolaziti kroz datoteku i čitati podatke sa pozicija
- ▶ Kako čitati podatke, ako znamo da je ovaj format za **pojedinačan zapis?**

## Log - Dodatni materijali

- ▶ Log data structure
- ▶ Log Structured File System for Dummies (nije uvredljivo :))
- ▶ Log Data Structure USENIX

## WAL - Dodatni materijali

- ▶ Write-Ahead Log for Dummies (nije uvreda :))
- ▶ Write Ahead Log Martin Fowler
- ▶ Database Internals: A Deep Dive into How Distributed Data Systems Work
- ▶ Read, write and space amplification
- ▶ ARIES/NT: A Recovery Method Based on Write-Ahead Logging for Nested Transactions

## Pročitati za narednu sedmicu

- ▶ ARIES/NT: A Recovery Method Based on Write-Ahead Logging for Nested Transactions
- ▶ Linux mmap OS call
- ▶ Are You Sure You Want to Use MMAP in Your Database Management System?