VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Key-value databázové systémy

Key-value database systems

Bc. Jan Jedlička

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Michal Krátký, Ph.D.

Ostrava, 2024

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Č.j.VSB/23/083450
vsboee2302B326

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Jedlička**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612T025 Informatika a výpočetní technika

Téma: Key-value databázové systémy
Key-Value Database Management Systems

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Ačkoli relační SŘBD po mnoha letech vývoje poskytují dostatečný výkon pro velkou část aplikací, existují aplikace pro které jsou některé vlastnosti relačních SŘBD nevhodné. Key-value databázové systémy se snaží reagovat na specifické požadavky především v distribuovaných prostředích.

1. Nastudujte problematiku key-value databázových systémů.
2. Navrhněte a naimplementujte testovací prostředí pro porovnání těchto databázových systémů s ostatními SŘBD.
3. Vybrané databázové systémy otestujte a vyhodnoťte výsledky experimentů.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] predictiveanalyticstoday.com: Top NoSQL Key-value Databases. March 18 2022. https://www.predictiveanalyticstoday.com/top-sql-key-value-store-databases/

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Michal Krátký, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2022

Datum odevzdání: 30.04.2024

Garant studijního oboru: prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.

V IS EDISON zadáno: 09.08.2023 10:43:21

Abstrakt

Cílem diplomové práce je popsat Key-value DBS, ukázat výhody a nevýhody těchto systémů a představit některé významné zástupce. První část práce je zaměřena nejen na obecný popis Key-value DBS, ale i na podrobnější specifikace vybraných DBS a jejich vzájemné porovnání. Součástí práce je zmapování existujících testů DBS a následný výběr a zprovoznění testovacího prostředí pro testování těchto systémů a porovnání s ostatními DBS. Práce popisuje dva významné představitele testovacích prostředí DBS, YCSB a TPC. S prostředím YCSB se v práci následně pracuje a testují se v něm čtyři vybrané Key-value DBS: Redis, Aerospike, Riak KV a Memcached. Veškeré testy jsou spouštěny pomocí skriptů, které spustí a nastaví DBS v prostředí Docker. Připravené DBS jsou následně naplněny daty a otestovány za pomoci prostředí YCSB. Práce je zakončena reprezentací hodnot naměřených při testování, vzájemným porovnáním pomocí grafů a vyhodnocením výsledků těchto testů.

Klíčová slova

DBS; NoSQL; Key-value DBS; Benchmarking; YCSB; TPC; Redis; Riak KV; Aerospike; Memcached

Abstract

The aim of this thesis is to describe Key-value DBS, to show the advantages and disadvantages of these systems and to introduce some important representatives. The first part of the thesis focuses not only on a general description of Key-value DBSs, but also on more detailed specifications of selected DBSs and their comparison with each other. The work includes a mapping of existing DBSs and then the selection and operationalization of a testbed for testing these systems and comparing them with other DBSs. The thesis describes two prominent representatives of DBS test environments, YCSB and TPC. The YCSB environment is then used in the thesis to test four selected key-value DBSs: Redis, Aerospike, Riak KV and Memcached. All tests are run using scripts that start and set up the DBS in the Docker environment. The prepared DBSs are then populated with data and tested using the YCSB environment. The paper concludes by representing the values measured during testing, comparing them with each other using graphs and evaluating the results of these tests.

Keywords

DBS; NoSQL; Key-value DBS; Benchmarking; YCSB; TPC; Redis; Riak KV; Aerospike; Memcached

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu této práce prof. Ing. Michalovi Krátkému, Ph.D., za poskytnutí užitečných rad a pomoci vedením práce.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů

DBS	–	Databáze
NoSQL	–	Not only Structured Query Language
Key-value DBS	–	Klíč-hodnota DBS
KDBS	–	Key-value DBS
RDBS	–	Relační DBS
JSON	–	JavaScript Object Notation
TTL	–	Time to live
TPC	–	Transaction Processing Performance Council
YCSB	–	Yahoo! Cloud Serving Benchmark
Kiloops	–	Tisíce operací

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Kapitola 1

Úvod

Key-value (neboli Klíč-hodnota) databázové systémy [1, 2], dále jen zkráceně KDBS, jsou jedním z paradigmat pro úložiště dat. Databáze je navržena pro rychlý přístup k datům a uživatelsky snadnou práci. Pro manipulaci s daty se zpravidla používá několik příkazů pro vložení, získání, aktualizaci a odstranění hodnot na základě klíčů. V KDBS se hodnota ukládá k danému klíči, přičemž klíč může být například "jmeno_uzivatele", a hodnota může být "Jan Novák".

KDBS fungují odlišně oproti tradičním relačním databázovým systémům. Datový model RDBS je relační [3], což znamená, že data jsou organizována do tabulek, kde každá tabulka představuje jednu relaci [4] a každý záznam v tabulce odpovídá jednomu řádku. Každá tabulka obsahuje sloupce, které předem pevně definují datové typy záznamů. Jedním ze sloupců je primární klíč, který jednoznačně identifikuje každý záznam. Tento relační model poskytuje strukturovaný a systematický přístup k ukládání a manipulaci s daty, což usnadňuje organizaci a vyhledávání informací. Díky definované struktuře záznamů může RDBS provádět řadu optimalizací, jako je například přidávání vlastních indexů nebo plánování a optimalizace dotazů [5]. Například pokud chceme do RDBS ukládat záznamy obsahující uživatele, musí mít každý záznam stejnou strukturu. Takže uživatel musí obsahovat všechny povinné atributy, jako jsou jméno a příjmení, a dodržet jejich předem stanovený datový typ a velikost, například počet číslic v telefonním čísle. Pokud by záznam obsahoval nějaké atributy navíc, například informaci o tom, zda je uživatel nemocný, nebo by jejich datový typ neodpovídal očekávanému, je zapotřebí upravit i tabulku, do které záznam vkládáme, a také záznamy, které se již v této tabulce nachází.

Na druhou stranu KDBS mohou mít pro každý klíč různě definované hodnoty, které mohou zahrnovat kolekce dat s odlišnými velikostmi. Tato vlastnost nabízí KDBS flexibilitu a možnost přiblížení se k objektově orientovanému programování. Například do KDBS s klíči jako ID uživatele a hodnotami reprezentujícími záznamy různých uživatelů můžeme ukládat JSON objekty. Tyto objekty reprezentují uživatele, kteří jsou definováni odlišnými, na sobě nezávislými třídami s různým počtem a datovým typem atributů, bez společného rodiče. Dále tyto databáze dosahují horizontální až lineární škálovatelnosti (viz kapitola 2). Protože KDBS nevyžaduje pevně nastavené datové typy

hodnot, jako je tomu u relační databáze, tak KDBS může vyžadovat méně paměti k uložení stejných dat [6], což vede k nárůstu výkonu v určitých případech.

Databáze se schématem [7] (schema-on-write) vyžadují definici datového schématu před tím, než jsou data uložena. To znamená, že musíte předem definovat strukturu dat včetně typů dat, a poté můžete data vložit do DBS. Na druhou stranu databáze bez schématu (schema-on-read, schemaless) umožňují ukládat data bez předchozí definice datového schématu. Schéma je definováno až v okamžiku, kdy data čtete z DBS. To umožňuje pružnější přístup k ukládání a zpracování dat, ale může vést k menší kontrole nad strukturou dat a k možným problémům s konzistencí dat.

Výkon a nedostatečná standardizace omezovaly KDBS pouze na specializovaná využití, ale díky rychlému přechodu na cloud computing, dochází v posledních letech k nárůstu popularity NoSQL databázových systémů, zatímco popularita RDBS je víceméně stejná [8]. Dle výzkumu z roku 2019 [9] byly RDBS využívány v 60,48 % případů napříč všemi databázovými systémy, zatímco NoSQL DBS pak zastávaly zbylých 39,52 %. Často se však pro využití výhod různých druhů DBS využívá kombinace RDBS a NoSQL DBS. Tato kombinace je proto využívána v 75,6 % případů. Čistě využívané RDBS poté zabírají 16,6 % a NoSQL DBS 9,8 %.

Webová stránka DB-Engines [10] porovnává DBS na základě popularity. Bodové skóre popularity je spočítáno na základě počtu zmínek na webových stránkách, frekvenci diskuzí na technických fórech, pracovních nabídek a poptávek, relevance DBS na sociálních sítích, počtu profilů na profesních sociálních sítích zmiňujících danou DBS a obecného zájmu o DBS [11]. Při sledování trendu DBS od roku 2013 do současnosti [12] (viz graf 1.1) dochází k výraznému nárůstu hodnocení popularity NoSQL DBS, konkrétně KDBS Redis [13] stoupla od roku 2013 z 25,973 bodů na 156,441 bodů, došlo tedy k nárůstu popularity o 502,68 %. Pro RDBS Oracle [14] došlo naopak k poklesu popularity z 1559,332 bodů na 1234,269 bodů, pokles činí 20,85 %. Trend změny hodnot popularity [8] (viz graf 1.2) pro RDBS obecně od roku 2013 se příliš nemění a dochází k poklesu v maximálně jednotkách bodů každý měníc, KDBS naopak znatelně stoupaly se svým hodnocením do konce roku 2022 a aktuálně dochází k poklesu popularity v řádu několika jednotek bodů každý měsíc.

Například databázový systém Redis je v současnosti jedním z deseti nejlépe hodnocených [15] databázových systémů napříč relačními i NoSQL databázovými systémy. V žebříčku porovnání téměř 70 čistě KDBS [16], je Redis na prvním místě, za ním následují Amazon DynamoDB [17], společně s Microsoft Azure Cosmos DB [18] a Memcached [19].

Cílem práce je prostudovat a podrobně popsat problematiku KDBS. Práce se zaměří na vysvětlení tohoto konceptu a identifikaci klíčových rozdílů mezi jednotlivými KDBS. Jednou z hlavních úloh práce je zmínit a detailně popsat některé z nejznámějších a nejčastěji využívaných databázových systémů v tomto odvětví. Tyto DBS budou vzájemně porovnány s důrazem na jejich vlastnosti, výhody a nevýhody. Dalším úkolem práce je příprava a zprovoznění testovacího prostředí, které umožní měření propustnosti a odezvy na dotazy těchto vybraných KDBS. Návrh a implementace testovacího prostředí zahrnuje konfiguraci prostředí a zprovoznění instancí databázových systémů, ať už lokálně nebo v cloudovém prostředí. Následně budou vybrané DBS podrobeny testování a budou

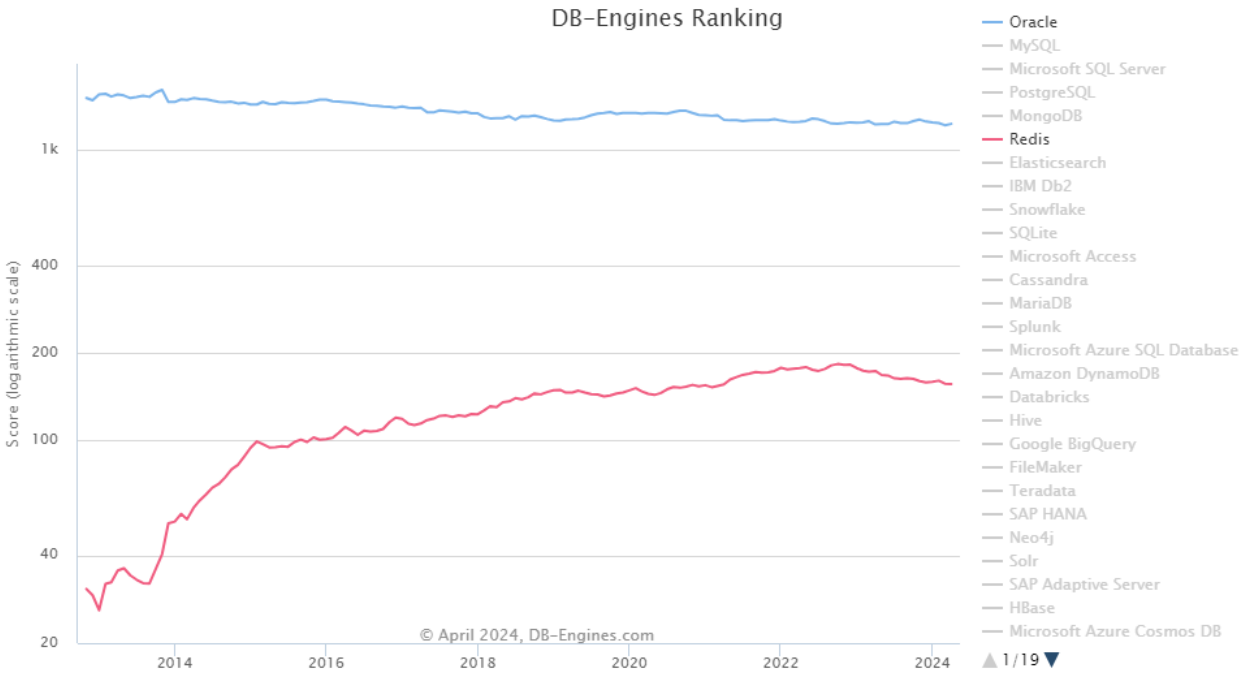
měřeny jejich propustnosti a latence v reálném provozu. Naměřené hodnoty budou prezentovány a analyzovány s cílem porovnat chování jednotlivých DBS v různých scénářích. Konečné výsledky budou porovnány, což umožní vyvodit závěry o tom, jak se jednotlivé DBS osvědčily v praxi při manipulaci s daty.

Struktura práce je následující. První část práce (viz kapitola 2) se zaměřuje na detailní představení několika klíčových KDBS (např. Redis, Riak KV, Aerospike). Každá z těchto DBS je popsána, a to včetně analýzy jejich charakteristických vlastností. V závěru této části je provedeno srovnání jednotlivých databází na základě jejich vlastností, například škálovatelnost, dotazovací jazyk a odezva.

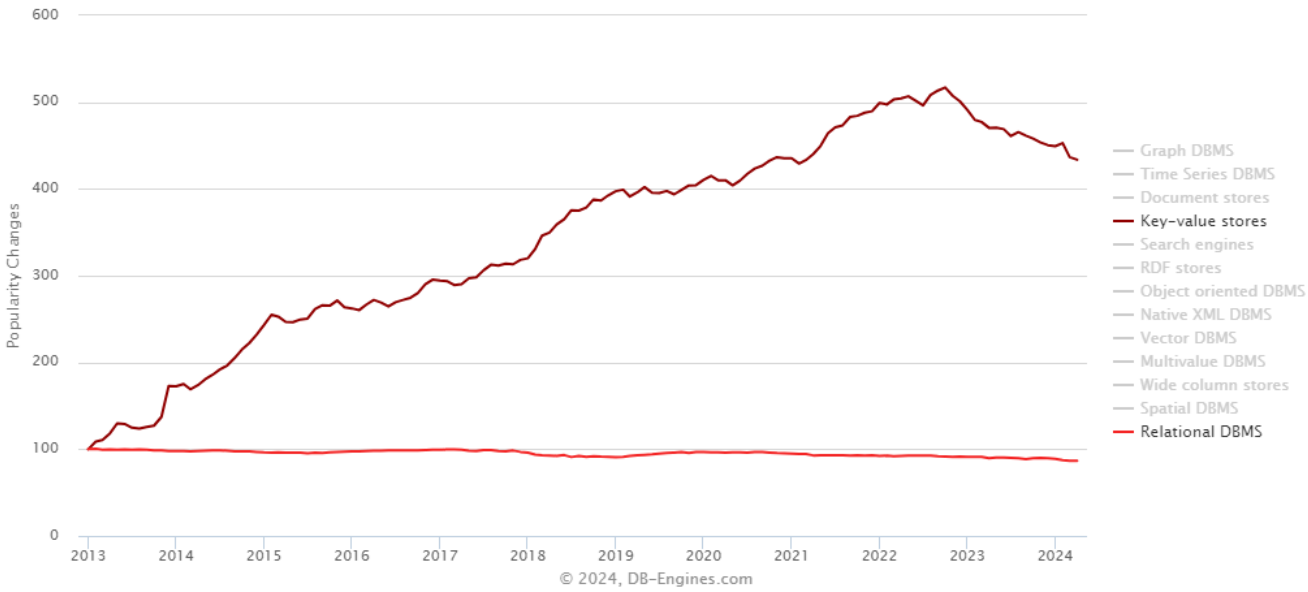
Kapitola 3 (viz kapitola 3) obsahuje popis a využitelnost testovacích prostředí databázových systémů. V kapitole jsou uvedena dvě existující testovací prostředí TPC [20] a YCSB [21]. Testovací prostředí TPC je využíváno především pro relační databázové systémy, zatímco prostředí YCSB je připraveno a vyvíjeno zejména pro NoSQL DBS.

Kapitola 4 (viz kapitola 4) je věnována testování a vyhodnocení výsledků čtyř vybraných KDBS (Redis [13], Riak KV [22], Aerospike [23] a Memcached [19]). Tyto DBS byly vybrány pro analýzu z důvodu své relevance podle internetových žebříčků [15, 24]. Kapitola popisuje stroj, na kterém se KDBS testovaly, a potřebnou přípravu zvoleného testovacího prostředí YCSB a databází v Dockeru [25]. Konkrétně se zde popisují konfigurace jednotlivých testů, kroky pro úspěšné spuštění testů a samotné otestování. Kapitola je zakončena prezentací výsledků naměřených hodnot při testování a vzájemným porovnáním výsledků jednotlivých KDBS.

V závěru práce, kapitole 5 (viz kapitola 5), jsou vyhodnoceny výsledky srovnání KDBS. Součástí kapitoly je zhodnocení samotné práce.



Obrázek 1.1: Graf hodnot popularity RDBS Oracle a KDBS Redis [12]



Obrázek 1.2: Graf změn hodnot popularity RDBS a KDBS [8]

Kapitola 2

Key-value databázové systémy

KDBS [1, 2, 26, 27] jsou typem databázového systému, který se specializuje na ukládání dat ve formě jednoduchých párování klíč-hodnota. Každá hodnota v této databázi je spojena s unikátním klíčem, který slouží k identifikaci daného záznamu (hodnoty). Tyto databáze jsou často preferované pro svou schopnost rychle a efektivně ukládat a získávat data, což je zvláště důležité pro aplikace, které potřebují vysoký výkon a škálovatelnost.

Jedna z hlavních vlastností KDBS spočívá v tom, že ukládají data v jednoduchém formátu klíč-hodnota. Klíč slouží jako identifikátor, který umožňuje rychlé vyhledávání a přístup k datům. Data jsou obvykle indexována podle klíče, což zajišťuje rychlý přístup k nim i při velkém objemu dat.

Důležitým rysem těchto databází je také jejich škálovatelnost. Mohou zpracovávat velké objemy dat a udržovat vysoký výkon i při zvyšujícím se počtu uživatelů nebo objemu dat. Některé systémy KDBS nabízejí distribuované ukládání dat, což umožňuje rozložení dat mezi různé servery a zvýšení odolnosti a výkonu celého systému.

Pro uživatele bývá klíčovým faktorem také jednoduchost použití. KDBS poskytují jednoduché rozhraní pro práci s daty, které zahrnuje základní operace jako vložení, aktualizaci a vyhledávání dat pomocí klíče. Tato jednoduchost usnadňuje integraci DBS do různých aplikací a snižuje nároky na vývojáře.

Vzhledem k těmto vlastnostem jsou KDBS vhodné pro širokou škálu aplikací, včetně webových aplikací, analytických systémů, cache pamětí a dalších. Jsou ideální pro situace, kde je potřeba rychle a efektivně ukládat a získávat data a zároveň udržovat vysoký výkon a škálovatelnost systému.

Jelikož KDBS jsou primárně určeny pro distribuované nasazení, nyní popíšeme tento pojem. Distribuovaný databázový systém [28] je typ databázového systému, který ukládá data na několik počítačů (neboli uzlů) v rámci sítě. Tento přístup umožňuje přizpůsobitelnější zpracování velkých objemů dat a zlepšuje odolnost systému vůči výpadkům jednotlivých uzlů. Pokud je konkrétní uzel nedostupný kvůli výpadku nebo zvýšené odezvě způsobené přetížením, můžeme jednoduše pokračovat v komunikaci s jiným uzlem, i když je možná vzdálenější. Distribuovaná architektura umožňuje systému růst s rostoucím objemem dat a zároveň snižuje riziko selhání komunikace, což

zvyšuje celkovou spolehlivost a dostupnost systému. Dostupnost systému je možné zvýšit například pokrytím rozsáhlejších geografických oblastí vhodným rozmístěním uzlů a přidáním nových uzlů do systému. Tím dosáhneme i kratší odezvy díky možnosti komunikace s uzly blíže uživatelům.

Škálovatelnost [29] je schopnost systému přizpůsobit se zvýšené zátěži nebo rostoucímu objemu dat a zachovat požadovanou úroveň výkonu a dostupnosti. Existují různé druhy škálovatelnosti. Horizontální škálovatelnost zahrnuje rozložení zátěže a zvýšení celkové kapacity přidáním dalších uzlů nebo serverů k distribuovanému systému. Vertikální škálovatelnost zlepšuje výkon jednotlivých uzlů nebo serverů zvětšením jejich výpočetní nebo paměťové kapacity. Lineární škálovatelnost je ideální situace, kdy se se zvýšením zdrojů (buď horizontálně nebo vertikálně) zvyšuje výkon systému lineárně.

V současné době existuje celá řada KDBS, od malých open-source projektů po velké komerční cloudové služby. Různé systémy disponují odlišnými vlastnostmi, jako je rychlost zpracování dat, škálovatelnost, uživatelská přívětivost skrze jednoduchou konfiguraci DBS a rozhraní pro práci s daty atd. Dle průzkumu [24, 30, 15] bylo vybráno 9 významných KDBS. Cílem je představit tyto KDBS, popsat jejich klíčové vlastnosti a provést jejich teoretické porovnání (viz tabulka 2.1). Z uvedených KDBS se následně provede konečný výběr databází pro testování a porovnání v praxi.

2.1 Amazon DynamoDB

Amazon DynamoDB [17] je v současné době druhá nejpopulárnější KDBS [31]. Jedná se o cloudový systém bez lokálních serverů (známý též jako serverless cloud systém), který nabízí nízkou odezvu a automatickou škálovatelnost [32]. Toho je dosaženo díky správě cloudu ze strany provozovatele a monitoringu běhu databáze. Tento pojem označující databáze v cloudu se používá pro popis architektury, kde se vývojáři především soustředí na vývoj softwaru (aplikace) a provozovatelé cloudu se starají o provoz, škálování a správu infrastruktury bez nutnosti spravovat samostatné servery. Tato KDBS se využitím v oblastech jako je web, technologie IoT, mobilní aplikace a herní průmysl. DynamoDB je plně a automaticky spravovatelná, multi-master databáze zaměřená na vysoké využití horizontální škálovatelnosti. Multi-master databáze [80] je typ distribuované databáze umožňující zápis dat na více uzlů současně. Každý uzel má stejná oprávnění k provádění zápisů, které jsou synchronizovány mezi všemi uzly. Tímto způsobem může být zajištěna vyšší dostupnost a odolnost systému proti výpadkům. Pokud jeden uzel selže, ostatní uzly mohou stále zpracovávat zápisy. DynamoDB podporuje různé režimy konzistence dat a umožňuje zápis na více replik v rámci své infrastruktury. Tak jako každá běžná DBS má unikátní primární klíče, které umožňují identifikaci jednotlivých záznamů v tabulkách, tak DynamoDB má i sekundární indexy [33] pro zlepšení odezvy dotazů a flexibility, což nebývá běžné pro všechny KDBS. Primární klíč slouží jako vstup do hashovací funkce a výsledná hashovací hodnota určuje fyzickou pozici uloženého záznamu. DynamoDB poskytuje silnou konzistenci při čtení hodnot od poslední aktualizace. Atomické čítače umožňují automatické změny hodnot číselných atributů. Pro expirované záznamy v tabulkách využívá tzv.

TTL (Time To Live) [34] k označení doby, po kterou má záznam zůstat platný v databázi. Archivace dat je umožněna díky full backupu. Amazon DynamoDB rovněž nabízí VPC [35] pro soukromou komunikaci za využití vlastní privátní síťové prostředí v rámci AWS cloudu.

Databázový systém disponuje konzolovým API pro správu DBS a práci s daty, ale nabízí také možnost využití jazyka PartiQL [36], který je vhodný pro kompatibilní SQL dotazy na databázích bez schématu. DynamoDB API je rozděleno do čtyř hlavních částí. Kontrolní plán zahrnuje funkce spojené s vytvářením, úpravami, mazáním a získáním jmen všech tabulek. Dále umožňuje výpis podrobných specifikací dané tabulky, jako jsou primární klíče, indexy a nastavení propustnosti. Následuje datový plán, který poskytuje CRUD operace pro data v dané tabulce. S daty lze pracovat buď jednotlivě po záznamech, nebo pomocí Batch funkcí, které umožňují provést stejnou operaci nad desítkami záznamů najednou a dosáhnout tak vyšší propustnosti, než při volání stejných funkcí pro jednotlivé záznamy opakovaně. Následně je možné provést Scan pro získání všech záznamů dané tabulky nebo indexu, případně Query pro získání hledané části dat. Třetí částí je DynamoDB Streams pro práci s časovými sekvencemi a práci s logy za posledních 24 hodin. Stream API poskytuje funkce pro výpis všech streamů, konkrétní popis daného streamu, získání iterátoru pro daný stream a nakonec získání jednoho záznamu z daného streamu. Poslední částí API jsou ACID transakce, které jsou rozděleny do dvou částí. První část je určena pro batch vkládání, úpravu a mazání záznamů a druhá část slouží k batch získání záznamů.

2.2 Oracle NoSQL Database

Oracle NoSQL Database [37] je databázová cloud služba vhodná pro práci s velkými objemy dat a nízkou odezvou v řádu jednotek milisekund. Služba je postavena na Oracle Berkeley DB [41]. Databáze je plně spravovatelná, flexibilní, škáluje horizontálně, dynamicky a dosahuje vysokých výkonů. Tato KDBS složí i jako spolehlivé úložiště pro dokumenty a data s pevně daným schématem. Vzhledem k tomu, že databázový systém je plně spravovaný společností Oracle, tak je pro vývojáře rychlé a snadné začít tuto službu využívat a soustředit se pouze na vývoj aplikací, neboť není potřeba se obtěžovat se správou základní infrastruktury databáze, softwaru, zabezpečení atp. Jedná se o Single Master, Multi Replica grafový systém. Pokud dojde k chybě na masteru, je master automaticky nahrazen jednou z replik. Pro Key-value ukládání s kapacitu jednotek terabytů využívá systém velký počet Storage uzlů, které je možno skupinově konfigurovat. Pro udržení konzistence jsou Storage uzly replikovány. Uzly a hrany v grafu reprezentují entity které vytvářejí vztahy a propojení. Sdílený systém, uniformně alokuje data okolo ostatních částí skupin. Databáze obsahuje i SQL Query s jazykem pro import, export a přenos dat mezi různými Oracle NoSQL databázemi. Mimo jiné je zde podpora i pro Failover, SwitchOver, Bulk Get API, Off Heap Cache a podpora Big Data SQL.

Restové API je rozděleno do pěti částí. Správa indexů, která dovoluje vytvářet a mazat indexy pro danou tabulku. Tato část API také umožňuje zobrazit všechny indexy, které jsou pro danou tabulku

vytvořeny a společně s detailním popisem každého indexu. Druhá část API se věnuje dotazům, umožňuje tedy syntaktickou kontrolu daného SQL dotazu, před připravení a spuštění dotazu. Třetí část je zaměřena na správu záznamů, obsahuje tedy CRUD funkce pro jednotlivé záznamy. Tato část ale neobsahuje funkci pro úpravu existujícího záznamu a ani neumožňuje správu mnoha záznamů najednou, pro úpravu je tedy nutno provést funkci odstranění záznamu a vložení nového a všechny záznamy je tedy také potřeba spravovat jednotlivě a postupně. Čtvrtá část je zaměřena správě tabulek, obsahuje možnost vytvoření, upravování, a mazání tabulek. Tato část také umožňuje výpis všech tabulek, informace o dané tabulce a využívání dané tabulky. Poslední část API se věnuje správě pracovních požadavků, lze zde zobrazit stav jednotlivých požadavků, mazat požadavky, získat chyby či log daného požadavku a list všech požadavků.

2.3 Redis

Redis [13] je in-memory úložiště pro datové struktury, využívané jako KDBS, cache, streaming engine nebo zprostředkovatel zpráv. Toto datové úložiště má skvělé využití pro klíče v podobě hashe a hodnoty jako velký JSON objekt. Pro persistenci dat můžeme ukládání dat na disk provádět po nastavitelných pravidelných intervalech, nebo je možné data logovat vždy při vykonávání operací. Pokud nemáme zájem o trvanlivost dat, je možné ukládání dat úplně vypnout a datové úložiště využít čistě jako cache. Úložiště škáluje horizontálně. Redis podporuje datové struktury jako řetězce, hashe, listy, množiny, bitmapy, hyperloglog a geospatial indexy. Nad datovými typy Redis umožňuje rychlé atomické operace, jako je rozšíření řetězců, přidání prvků na začátek a konec listů, atd. Datové úložiště také poskytuje seřazené množiny pro vytváření indexů dle ID nebo jiného číselného atributu. Redis hashing ukládá data jako klíč a mapu. Keyspace notifikace dovoluje klientům odebírat Publisher-Subscriber kanály. Pro práci s dotazy na souřadnice a geometrii je možné využívat Geo API. Redis umožňuje provádět transakce, volat Lua skripty a nastavovat různé úrovně TTL pro záznamy. Redis podporuje Trivial-to-setup Master-Slave asynchronního replikování, společně s rychlou neblokující se prvotní synchronizací. Struktura pro ukládání dat je single-rooted replikovaný strom. Redis má vlastní API pro práci s daty pro populární programovací jazyky jako C, Python, Java a JavaScript.

S Redis databází lze pracovat například pomocí konzolového rozhraní, toto CLI [38] poskytuje řadu jednoduše čitelných, ale netradičních příkazů pro práci s daty. Vždy potřebujeme specifikovat klíč, se kterým chceme v databázi pracovat. Pomocí příkazu SET a DEL vkládáme do DBS nebo mažeme jednotlivé hodnoty pro zvolený klíč. Příkazem GET získáme hodnoty pro daný klíč, případně můžeme zjistit, zda již existuje záznam pro daný klíč příkazem EXISTS. Pokud vyžadujeme práci s poli, tak můžeme pro daný klíč zleva i zprava vkládat hodnoty zřetězené v poli díky příkazům LPUSH a RPUSH. Obdobně odebíráme hodnoty z pole pomocí LPOP a RPOP, příkazem LRANGE vypíšeme hodnoty z pole a příkazem LLEN zjistíme počet jeho záznamů. Místo jednoduchých polí je možno pracovat i s množinami pomocí příkazů SADD, SREM, SISMEMBER a obdobně. Množiny

mohou být i seřazené a pro ně se využívají příkazy jako ZADD. Pro práci se záznamy strukturovanými jako kolekce párů atribut-hodnota se využívá datový typ Hash, umožňuje nám pro daný klíč uložit záznam obsahující názvy atributů a jednotlivé hodnoty pro ně. Opět se zde využívají příkazy jako HSET a HGETALL pro nastavení a získání daného záznamu, případně HGET pro získání hodnoty daného atributu pro záznam na zadaném klíči. API obsahuje také příkazy pro ostatní datové typy, jako jsou bitmapy, geografické prostory, HyperLogLog a další.

2.4 Aerospike

Aerospike [23] je KDBS využívající Hybrid Memory architekturu [39], která umožňuje odezvu v jednotkách milisekund a vysokou propustnost v řádech stovek tisíc až milionů operací za sekundu. Hybrid Memory architektura od Aerospike je implementována tak, že index je čistě In-Memory, tím pádem není index perzistentní (vhodné například pro uživatelské cache sessions), a data jsou uložena čistě perzistentně na SSD disku a čtou se přímo z něj. Díky tomu, že je Aerospike jako KDBS naprosto schena-less, je možné definovat Sets a Bins za běhu pro maximální flexibilitu aplikací. Databáze škáluje lineárně a poskytuje silnou konzistenci, nízkou cenu a korektnost. Umožňuje real-time analýzu pro rychlé rozhodování a dynamickou optimalizaci pro vhodné využívání zdrojů dat, proto je databáze vhodná pro velké a stále aktualizované DBS. Poskytuje server-side clustering a bezpečnost na transportní vrstvě. Databáze také umožňuje customer deployment s nulovým downtime. V praxi se Aerospike díky svým vlastnostem využívá například pro banking, telekomunikace, adtech a gaming. Aerospike poskytuje vlastní silný dotazovací jazyk AQL [40], který má prakticky shodnou syntaxi jako SQL (i když se o SQL nejedná). Vlastní vytvořitelné agregační funkce pomocí Lua jazyka jsou flexibilní pro agregační algoritmy.

Dotazovací jazyk AQL se snaží zachovat standardní SQL syntaxi, obvyklé příkazy SELECT, INSERT, DELETE jsou tedy zachovány. Je možné vytvářet vlastní indexy nad tabulkami pomocí CREATE INDEX a provádět agregace pomocí AGGREGATE. Pro dotazy nad konkrétním záznamem specifikovaným pomocí hexadecimálního řetězce či Base64 lze v podmínce dotazu použít porovnání hodnoty s DIGEST nebo EDIGEST. Dotazování můžeme provádět i standardně nad primárním klíčem a ostatními atributy. Při vkládání záznamů lze specifikovat speciální datové typy atributů, jako je LIST, MAP, GEOJSON a další.

2.5 Oracle Berkeley DB

Oracle Berkeley DB [41] je rodina vestavěných Key-value databázových knihoven. Jedná se o čistě In-memory databázi, díky čemuž dosahuje vysokého výkonu a odezvy v jednotkách mikrosekund. Databáze škáluje horizontálně. Data jsou replikována pro vysokou dostupnost z více zdrojů a dobrou toleranci chybovosti. Oracle Berkeley DB využívá vhodné datové struktury pro práci s daty, jako jsou B-strom, hash table indexy nebo fronta. Databáze využívá obnovitelné ACID transakce a po-

skytuje několik různých úrovní izolace (včetně MVCC [42]). Data jsou dělena do oddílů dle key ranges. Umožňuje komprimaci dat. Databáze je Single-master, Multi-replica, tedy je vysoce dostupná a umožňuje dobrou konfigurovatelnost. Repliky umožňují čtecí škálovatelnost, rychlý failover, hot-standby a další distribuované konfigurace, dodávající podnikové prostředky v malém, vestavěném balíčku. Pro přístup k datům a nastavení databáze se využívá jednoduché volání funkcí API. Mnoho moderních programovacích jazyků, jako například C++, C#, Java, Python atd., podporuje tyto knihovny. Data mohou být ukládána v nativním formátu aplikace, XML, SQL nebo jako Java objekty. Oracle Berkeley DB je vhodný nástroj pro vše od lokálního úložiště po world-wide distribuovanou databáze (od kilobytů po petabyty).

Interakce s Berkeley DB SQL API je prakticky identická jako s SQLite [43]. Pro práci s databází vytvořenou rozhraním BDB SQL [44] používáte stejná rozhraní API, stejné Shell prostředí, stejné příkazy SQL a stejné PRAGMA, jako se využívá u SQLite. BDB SQL rozšiřuje standardní SQLite PRAGMA o možnosti nastavení velikosti alokované paměti sdílených zdrojů, nastavení počtu bucketů v hashovací tabulce objektů zámků, zvolení soukromého prostředí místo sdíleného, přesměrování logování chyb do vlastního souboru, nastavení příznaku, který způsobí, že sdílené prostředky databáze budou vytvořeny ve sdílené paměti systému a další. Dalším drobným rozdílem je, že BDB SQL rozhraní nepodporuje klíčové slovo IMMEDIATE.

2.6 Riak KV

Riak KV [22] je distribuovaná KDBS s pokročilou lokální a multi-cluster replikací, která garantuje čtení a zápis i v případě selhání hardwaru nebo síťových oddílů. Riak využívá bezkonfliktní replikované datové typy (CRDT [45]), které umožňují nezávisle a souběžně aktualizovat jakoukoliv repliku v distribuované databázi se zajištěním sjednocení hodnot pomocí algoritmu, který je součástí samotného datového typu (flagy, registry, čítače, množiny a mapy). Poskytuje konfiguraci aktivního clusteru a dosahuje nízké latence v řádech jednotek milisekund díky dodávání dat z nejbližšího datacentra. Databáze rozděluje data z clusterů pro své dostupné zóny, má multi-cluster repliky a využívá redundance dat v geografickém regionu. Riak tedy automaticky distribuuje data skrz cluster pro robustnost a vysoký výkon. KDBS poskytuje flexibilní datový model bez předem definovaného schématu. Databáze má vylepšené logování chyb a reporty. Data jsou automaticky komprimována pomocí Snappy kompresní knihovny [46]. Databáze využívá master-less architekturu, je vysoce dostupná a má design horizontální škálovatelnosti. Škálovatelnost je téměř lineární při využití snadného přidání hardwarové kapacity bez nutnosti mnoha operací. Riak KV dovoluje zpracování dat pro analýzu a vyvození závěrů pro zlepšení chodu DBS. Riak KV je navržen pro nulové restrikce na hodnoty, takže session data mohou být enkódována mnoha způsoby a nevyžadují změnu schématu. Během nejvyšší zátěže nezhoršuje databáze zápis a horizontální škálovatelnost, uživatelé jsou stále obsluhováni bez problémů. Databáze je vhodná pro ukládání velkého množství nestrukturovaných dat, také pro big-data aplikace, ukládání dat z připojených zařízení a replikaci

dat do okolí. Díky nízké latenci je DBS vhodná i pro chat/messaging aplikace. Riak KV exceluje v soukromém, veřejném či hybridním cloud nasazení.

Riak KV API obsahuje všechny potřebné CRUD operace pro správu objektů. Při vytváření nových objektů je potřeba nastavit typ a název bucketu, který skladuje klíče a data do něj vložená. Bucket má také vlastní indexy pro vyhledávání dat uvnitř něj. Dva různé buckety mohou uchovávat stejnou hodnotu klíče, ale jeden bucket obsahuje pouze unikátní klíče. Klíč pro data lze specifikovat explicitně vlastní při vytváření objektu pomocí parametru nebo při jeho absenci je datům přiřazen náhodný klíč. Při vkládání dat do DBS můžeme jednoduše nastavit parametr TTL daného objektu a také počet jeho replik. Při čtení dat můžeme před získáním výsledku zadat minimální počet replik, které se musí shodnout na stejných datech pro zvolený klíč. Pro efektivnější dotazy lze vytvořit vlastní indexy pro výchozí nebo námi zvolená datová schémata. Lze se dotazovat na data pro zvolený klíč nebo provádět fulltextové vyhledávání. Databáze poskytuje i funkce pro tvorbu sekundárních indexů a následné dotazy nad nimi. Riak API také umožňuje hlubší nastavení autorizace a bezpečnosti, práci s replikami a řešení konfliktů.

2.7 Voldemort

Project Voldemort [47] je distribuovaná KDBS založena na Amazon DynamoDB. Škáluje horizontálně pro čtení i zápis. Umožňuje zapojení storage-enginu (MySQL, Read-Only). Databáze automaticky replikuje data napříč servery pro dostupnost a bezpečnost jednotlivých oddílů při vysoké propustnosti, nicméně každý server obsahuje pouze část z celkových dat. Databáze je decentralizovaná z pohledu uzlů, každý uzel je samostatný a nezávislý, nenachází se zde žádný centrální řídící uzel nebo uzel řídící řešení chyb. Voldemort má výkonost desítek tisíc operací za sekundu na jeden uzel (1 op. za 50 mikrosekund), samozřejmě závisí na hardwaru, síti, systému disku atp. Konzistence dat je nastavitelná (přísné kvórum nebo případná konzistence). Selhání serverů jsou ošetřována transparentně, pro lepší viditelnost, interní monitorování a validaci dat lze využívat JMX [48]. Data jsou verzována pro maximální integritu i během poruch. In-Memory caching pro eliminaci oddělených částí cache, jednoduché a rychlé in-memory testování (např. pro unit testy). Databáze umožňuje jednoduchou distribuci dat skrz stroje, data mohou být rozdělována například dle primárních klíčů. Databáze má hashovatelné schéma, vyhledávání dle primárního klíče a možnost modifikace jednotlivých hodnot. Voldemort poskytuje široké možnosti pro klíče i hodnoty díky serializaci včetně listů a tuplů s pojmenovanými poli. Pro serializaci (Java Serialization, Thrift, Avro) se využívá JSON datový model v kompaktním bytovém formátu, probíhá zde typová kontrola dat dle očekávaného schématu. Pomocí API je možné rozhodovat o replikování a místech ukládání dat, nastavení různé strategie pro specifické aplikace a možnost distribuce dat skrz data centra která jsou mezi sebou geologicky velice vzdálená. Databáze neposkytuje triggery, cizí klíče ani komplexní filtry pro dotazy.

Práce s Voldemort databází z pohledu klienta je přímočará, API se skládá pouze z pár základních funkcí pro správu dat. Tyto funkce jsou Put, Get a Del pro nastavení, získání a odstranění hodnot pro explicitně specifikovaný klíč. Funkce GetAll umožňuje obdržet více hodnot pro více specifikovaných klíčů pomocí volání pouze jedné funkce, GetAll dosahuje vyšší propustnosti než zřetězené volání samostatné funkce Get. Pro připojení k Voldemort databázi a nastavení výchozího uzlu úložiště se využívá funkce Bootstrap, bez nastavení výchozího uzlu je potřeba specifikovat uzel explicitně před každým voláním funkce Get a dalších. Pro funkci Bootstrap je také možné nastavovat serializer pro klíče i hodnoty, čas spojení klienta se serverem a interval automatické změny uzlu v rámci clusteru na ten nejvhodnější. Pro ukončení komunikace se využívá jednoduše funkce Close.

2.8 InfinityDB

InfinityDB [49] je NoSQL hierarchicky tříděná KDBS implementovaná v jazyce Java. Databáze má možnost využít čistě In-Memory ukládání dat, která je vhodné pro cache, nebo naopak se mohou data ukládat i perzistentně na disk do souboru, přičemž je možné měnit nastavení bez zasahování do kódu. Přístup k datům v cache je plně vícevláknový, využívá se většina jader, a data, která nejsou často využívaná, jsou stránkována na disk. Databáze dosahuje výkonu v jednotkách milionů operací za sekundu pro více vláknové operace v cache. Veškerá data a informace o databázi jsou uložena na disku v jednom souboru, což zajišťuje jejich aktuálnost a zároveň maximalizuje bezpečnost a korektnost. Databáze je designována právě pro použití jednoho kompletního souboru s okamžitým zotavením a nevyžaduje proto administraci. Databáze neobsahuje dodatečné konfigurační nebo dočasné soubory, upgrade skripty ani logy. Zotavení je bez logů o transakcích okamžité ihned po restartu. V databázi není potřeba dělat čištění junk souborů po operacích, když zde nejsou žádné zanechány. InfinityDB podporuje ACID pro vlákna a ACD pro bulk operace. Databáze poskytuje prostor pro ukládání strukturovaných, polostrukturovaných a nestrukturovaných dat. Tento jednoduchý model umožňuje ukládání vnořených Multi-values a je možné reprezentovat různé datové struktury, jako jsou stromy, grafy, key/value mapy, dokumenty, velká řídká pole a tabulky. Schema je možné měnit za běhu pro zpětnou i následující kompatibilitu. Data dotazů lze dynamicky sledovat pomocí set logic views, delta views a ranges. Databáze se využívá pro servery, pracovní stanice a příruční zařízení.

InfinityDB poskytuje základní jednoduché API o deseti hlavních voláních. Funkcionalitu pro vkládání, úpravu a mazání hodnot zajišťují funkce Insert, Update a Delete. Funkce Delete je rozšířena o funkci Delete-suffixes, která umožňuje odstranit více hodnot v jednom volání. Pro získávání hodnot se využívá kurzoru, jehož pohyb v obou směrech zajišťují funkce First, Next, Last a Previous. Nakonec jsou k dispozici také potřebné funkce Commit a Rollback pro možnost využívání transakcí.

2.9 Memcached

Memcached [19] je open-source, distribuované, in-memory key-value úložiště, navržené pro rychlý a efektivní caching. Primárním účelem Memcached je uchovávání často používaných dat v paměti, aby se snížila latence a zvýšila rychlost přístupu k nim. Jeho jednoduchý a efektivní přístup k ukládání a získávání dat ho činí populární volbou pro webové servery, kde je potřeba rychle cachovat často používané informace jako například HTML stránky, databázové dotazy nebo výpočty. Memcached funguje jako distribuovaná cache, díky čemuž může být nasazen na více serverech, a data jsou mezi nimi rovnoměrně distribuována. Tento přístup umožňuje horizontální škálování, takže kapacitu a výkon Memcached lze jednoduše rozšiřovat přidáním dalších serverů.

Jednou z klíčových vlastností této KDBS je jeho jednoduché API, které podporuje základní operace s key-value páry, jako je ukládání, získávání a mazání dat. Tato funkcionalita je dostupná pomocí funkcí SET, GET, ADD, REPLACE a DELETE. Díky tomu je integrace Memcached do existujících aplikací relativně snadná a není vyžadována žádná složitá konfigurace. Memcached také poskytuje možnost nastavení expirace dat, což umožňuje automatické odstranění zastaralých dat z cache a uvolnění paměťových prostředků. Tato funkce je užitečná zejména pro udržování čerstvých a aktuálních dat v cache. Další významnou vlastností Memcachedu je jeho podpora distribuovaných transakcí, která umožňuje atomické operace nad více key-value páry. Pro práci s touto KDBS jsou k dispozici knihovny pro různé programovací jazyky, což usnadňuje jeho integraci do široké škály aplikací a systémů. Díky své jednoduchosti, efektivitě a škálovatelnosti je Memcached oblíbenou volbou pro mnoho webových aplikací a služeb.

2.10 Nezmíněné významné NoSQL databáze

Do práce nebyly záměrně zahrnuty databázové systémy MongoDB a Couchbase [50, 51]. I když se jedná o známé a hojně využívané NoSQL databáze, byly obě záměrně vynechány z práce, protože mají Key-value model až jako sekundární datový model. Primárně jsou určeny pro ukládání dokumentově orientovaných informací [52]. Další často využívanou a nezmíněnou NoSQL databází je Cassandra [53], která udává jako datový model wide-column store [54]. Z tohoto důvodu byla i tato DBS vyřazena z testování.

Tabulka 2.1: Porovnání Key-value databází

Databáze	Amazon DynamoDB	Oracle NoSQL DB	Redis	Aerospike	Oracle Berkeley DB	Riak KV	Voldemort	InfinityDB
Čistě cloud	ano	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne
Schéma dat	ne	ano i ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano
Licence	komerční	open source	open source	open source	open source	open source	open source	komerční
Server OS	hostovaná	Linux, Solaris	Linux, Windows, OS X, BSD	Linux	Linux, Windows, OS X, Android ad.	Linux, OS X	Linux, Windows	Linux, Windows, OS X, Solaris
Napsáno v	-	Java	C	C	C, C++, Java	Erlang	Java	Java
Sekundární indexy	ano	ano	ano	ano	ano	omezené	ne	ne
Koncept transakcí	ACID	ACID v rámci uzlu	atomické, izolované	atomické	ACID	ne	ne	ACID
Triggery	ano	ne	pub/sub	ne	ano	ano	ne	ne
Dělící metody	sdílení	sdílení	sdílení	sdílení	ne	sdílení	ne	ne
Replikační metody	ano	source-replica multi-region	source-replica, multi-source	volitelná faktor repl.	source-replica	volitelný faktor repl.	ne	ne
Administrace	vysoká	nízká	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	ne
Škálovatelnost	horizontální	horizontální	horizontální	lineární	horizontální	lineární	horizontální	horizontální
Odezva	mikrosekundy	milisekundy	milisekundy	milisekundy	mikrosekundy	milisekundy	milisekundy	milisekundy
Dotazovací jazyk	PartiQL	Omezený SQL	Redis query	AQL	SQL	Riak query	Voldemort query	InfinityDB query

Kapitola 3

Prostředí pro testování databázových systémů

Různé databázové systémy mohou přistupovat k řešení jednotlivých problémů odlišně. Pokud chceme rozhodnout, který z těchto systémů je nejvhodnější pro určité úkoly, musíme provést řadu testů a porovnání. Je prakticky nemožné nalézt ideální databázový systém, který by exceloval ve všech aspektech pro všechna data a případy využití. Testování nám umožní odhalit, který systém vyniká a naopak zaostává pro konkrétní operace nad konkrétními daty. Proto je důležité najít ideální prostředí pro měření a porovnání vlastností vybraných KDBS z kapitoly 2.

Aktuálně existuje celá řada nástrojů pro měření výkonu databázových systémů. Mezi dva využitelné a bezplatné nástroje se řadí například TPC [20] a YCSB [21]. TPC od organizace Transaction Processing Performance Council se dělí do mnoha kategorií. Například TPC-H je považován spíše za benchmark pro systémy pro podporu rozhodování [55], zatímco TPCx-BB je benchmark pro Big Data. Obecně se TPC benchmarky využívají spíše pro typické relační databázové systémy. Na druhou stranu Yahoo! Cloud Serving Benchmark (dále jen YCSB) od společnosti Yahoo! je open-source specifikace a sada programů pro vyhodnocování možností vyhledávání a údržby počítačových programů. Často se ale právě YCSB používá k porovnání výkonu NoSQL databázových systémů, což je pro tuto práci zaměřenou na KDBS ideální. Proto byla tato technologie zvolena pro měření výkonu jednotlivých databázových systémů [56, 57].

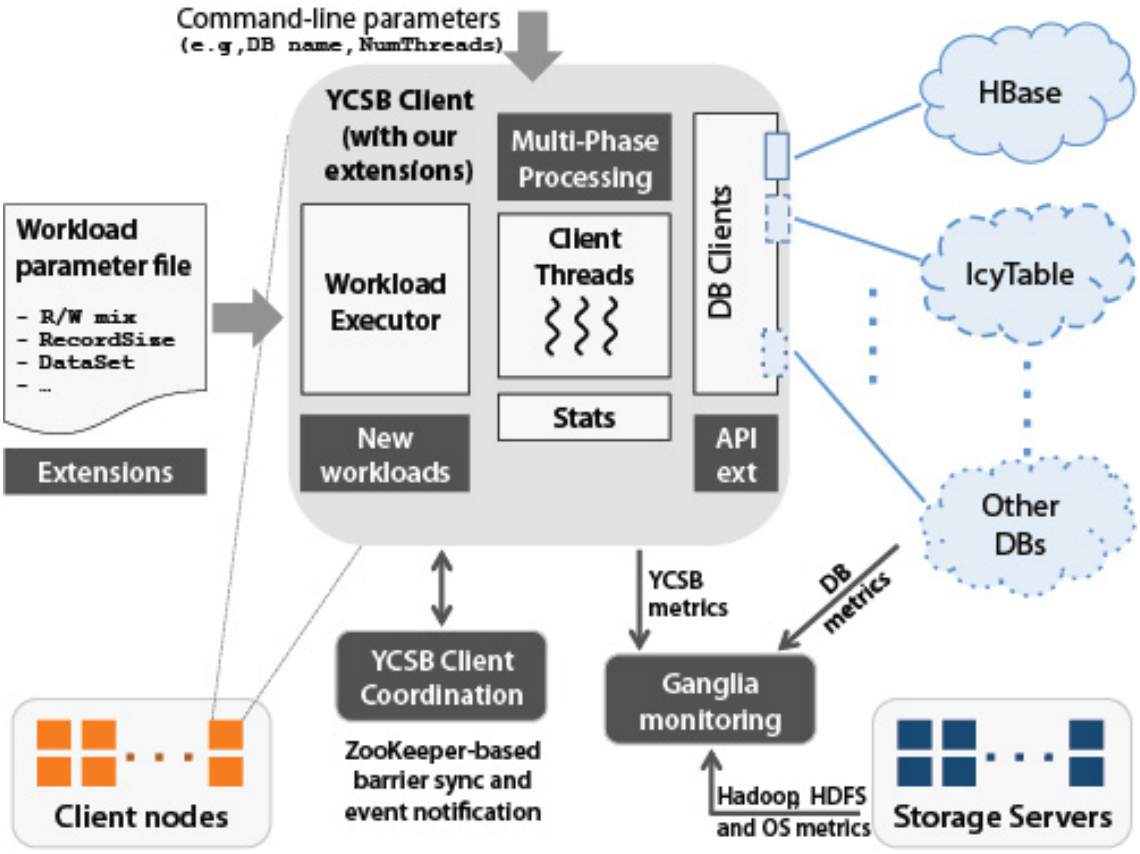
3.1 YCSB

Architektura YCSB [21, 58] je založena na pluginech a poskytuje snadnou rozšiřitelnost pomocí skriptů. Pro značnou část významných databázových systémů existuje podpora v podobě bindingů. Samotný benchmark se skládá ze dvou fází. První z nich je Loading fáze zaměřená na vložení dat do DBS a následně druhá je Running fáze, ve které se spouští daný test (viz schéma 3.1).

Při spouštění každého testu je možné nastavit určité parametry pro lepší konkretizaci měřeného scénáře [59]. První a druhý parametr slouží pro specifikaci loading nebo running fáze a výběr testovaného databázového systému. Následně se vybírá testovaný scénář (Workload), počet záznamů v databázi, počet atributů daného záznamu, bytovou velikost každého atributu v záznamu, počet vláken, umístění serveru databáze a nakonec distribuci dotazů (uniformní, exponenciální, sekvenční, nejnovější, hotspot, definované).

YCSB poskytuje 5 různých scénářů označených A až F pro testování propustnosti, latence a škálovatelnosti jednotlivých databázových systémů. Tyto pracovní scénáře, neboli Workloads [56, 60], napodobují různé chování požadavků webových aplikací, jako jsou scénáře zaměřené výhradně na čtení, zápis nebo kombinace obojího. Konkrétní počet zvolených operací dle procentuální definice je vypočítán na základě parametru určujícího celkový počet operací daného scénáře. Při sekvenčním skenování ve Workloadu E je maximální počet skenovaných záznamů v jedné operaci definován jako 5% z celkového počtu záznamů. Takže při počtu záznamů 1000 bude každá operace skenování číst právě 1 až 50 záznamů.

- Workload A (Update heavy)
  - 50% operací zaměřených na čtení a 50% operací zaměřených na úpravu
- Workload B (Read mostly)
  - 95% operací zaměřených na čtení a 5% operací zaměřených na úpravu
- Workload C (Read only)
  - 100% operací zaměřených na čtení
- Workload D (Read latest)
  - 95% operací zaměřených na čtení, 5% operací zaměřených na vkládání a poslední vložené záznamy jsou čteny přednostně
- Workload E (Short ranges)
  - 95% operací zaměřených na sekvenční skenování nízkého počtu záznamů a 5% operací zaměřených na vkládání
- Workload F (Read-modify-write)
  - každá operace se skládá z čtení daného záznamu, úpravy záznamu a následného vložení změněného záznamu zpět



Obrázek 3.1: YCSB rámec testování funkčnosti [61]

TPC benchmark	využití
TPC-C, TPC-E	zpracovávání transakcí
TPC-H, TPC-DS, TPC-DI	podpora rozhodování
TPCx-V, TPCx-HCI	virtualizace
TPCx-HS, TPCx-BB	velká data
TPCx-IoT	IoT
TPCx-AI	umělá inteligence
TPC-Energy, TPC-Pricing	běžné specifikace
TPC-A, TPC-B, TPC-APP, TPC-D	zastaralé benchmarky
TPC-R, TPC-W, TPC-VMS	

Tabulka 3.1: TPC benchmarky

3.2 TPC

Transaction Processing Performance Council [20], dále jen TPC, je společnost spravující software pro vytváření benchmarků výkonnosti systémů pro online zpracování transakcí (OLTP) [62] a možnosti jejich následného monitoringu a porovnávání. TPC benchmarky využívají firmy s velkými data a přiměřenou zátěží, výsledkem benchmarků je počet transakcí za minutu (tpm).

TPC benchmarky jsou rozděleny do více modelů pro různě specifikované testy. Prvním z modelů pro OLTP byl TPC Benchmark A (TPC-A), který následně nahradil benchmark TPC-B a aktuálně se v tomto odvětví využívá poslední generace OLTP benchmarků TPC-C a TPC-E. Například modely TPC-DS/DI a TPC-H jsou uzpůsobeny pro testování systémů pro podporu rozhodování [55]. TPC benchmarky jsou přizpůsobeny i pro virtualizaci, IoT [63] a další (viz tabulka TPC benchmarků 3.1).

Model TPC-C [64] simuluje velkoobchodní provoz s více sklady, známý jednoduše jako "společnost". V minimálním testu má společnost deset skladů, každý s deseti uživatelskými terminály. Každý sklad obsluhuje deset definovaných prodejních okrsků, každý s 3000 zákazníky, kteří objednávají podle katalogu výrobků o 100 000 položkách. Nejčastějšími transakcemi jsou objednávky zákazníků, přičemž každá objednávka obsahuje v průměru 10 položek, a platby zákazníků. Méně časté požadavky se dotazují na stav objednávek a skladových zásob, expedují objednávky a doplňují zásoby, které se sníží. Pro testování výkonnosti daného systému se počet skladů zvyšuje tak, aby splňoval požadované minimum potřebné k měření cílové úrovně výkonnosti.

Výsledky srovnávacího testu se měří v transakcích za minutu, známých jako tpmC. První výsledek tpmC byl zveřejněn v září 1992 pro IBM AS/400 a přinesl výsledek 54 tpmC. V roce 2000 byl průměrný výsledek pro špičkové stroje 2,4 milionu tpmC a společnosti ve snaze získat rekord stavěly systémy velkých rozměrů. Současný rekord byl stanoven v roce 2020 pomocí cloud computingu, který poskytl 707,3 milionu tpmC [65]. Nedávné výsledky pro menší lokální systémy se zaměřily na snížení nákladů na tpmC.

3.3 Relevance TPC a YCSB pro měření KDBS

Pokud jde o relevanci TPC pro KDBS, je potřeba brát v úvahu, že KDBS se liší od tradičních relačních databází. Zatímco TPC benchmarky se zaměřují na transakční zpracování a operace typické pro RDBS, KDBS se často používají pro rychlý přístup k datům pomocí jednoduchého klíč-hodnota rozhraní a jsou často součástí aplikací s vysokým objemem operací typu čtení a zápisu.

Z tohoto důvodu by benchmarky navržené specificky pro KDBS byly relevantnější pro měření jejich výkonnosti a charakteristik. Nicméně některé aspekty TPC benchmarků, jako je schopnost zpracovávat vysoký objem transakcí nebo zátěžové testování, mohou poskytnout užitečné informace i pro KDBS, i když nejsou primárně určeny pro tuto kategorii databází.

Pokud jde o relevanci YCSB pro KDBS, můžeme říci, že je velmi relevantní. To je způsobeno tím, že YCSB je zaměřen na testování databází pomocí jednoduchého klíč-hodnota rozhraní, což je přesně ten způsob, jakým komunikují KDBS.

YCSB poskytuje sadu připravených scénářů a operací, které simuluji reálné aplikace a zátěžové podmínky. To umožňuje uživatelům testovat výkonnost KDBS v různých situacích a porovnávat je s jinými NoSQL DBS. Celkově lze říci, že YCSB je relevantní nástroj pro testování KDBS a poskytuje užitečné informace o jejich výkonu a škálovatelnosti v scénářích podobných reálnému použití.

Kapitola 4

Vyhodnocení výsledků testů

4.1 Testovací stroj

Veškeré testy byly spouštěny na vlastním stroji, domácím počítači. Stroj disponoval procesorem Intel Core i5 4590 s taktem 3,3 GHz a 8 GB operační pamětí RAM. Všechny aplikace byly nainstalovány a spouštěny na SSD disku Samsung 870 EVO. Konkrétní specifikace tohoto stroje jsou uvedeny v tabulce 4.1. Testovalo se na operačním systému Windows, avšak s úpravou lomítek ve skriptech jsou skripty a prostředí YCSB i Docker kompatibilní i pro OS Linux.

4.2 Zprovoznění testů

Pro rozsáhlé otestování byly vybrány čtyři vhodné KDBS. A to konkrétně Redis (2.3), Riak KV (2.6), Aerospike (2.4) a Memcached. Všechny tyto zvolené databáze jsou v aktuálním roce 2024 hodnoceny jako jedny z nejlepších podle žebříčku na webu DB-Engines Ranking [15] právě pro testovaný model Key-value. Tento web přiřazuje databázím bodové hodnocení na základě četnosti nových článků o dané databázi na internetu, obecného zájmu, četnosti diskuzí na fórech, množství pracovních nabídek a poptávek a relevanci na sociálních sítích.

Tabulka 4.1: Specifikace stroje na kterém se spouštěly testy

komponent	název	podrobnosti
OS	Microsoft Windows 10 PRO	x64
CPU	Intel Core i5 4590	3,3GHz (Boost 3,7GHz), core/thread 4, Haswell
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1660 SUPER	6GB, 1530MHz (Boost 1785MHz)
RAM	Crucial Ballistix Sport	8GB (2x4GB), 1600MHz, DDR3
SSD	Samsung 870 EVO	R/W 560/530MB/s, 1TB, TLC, SATA 6Gb/s
Základní deska	GIGABYTE GA-H81M-H - Intel H81	1150 socket, DDR3 DIMM

Ve snaze o možnost replikace testů byly všechny databáze instalovány a spouštěny pomocí open-source platformy Docker [25]. Bylo tedy nutné najít vhodný a kompatibilní Docker Image pro každou z testovaných databází. V kontextu této práce Docker pomáhá zrychlit zdlouhavou fázi instalování a nastavení počátečního stavu databází, udržení funkčnosti vybrané verze instalovaného softwaru a odstínění od stavu stroje, na kterém DBS spouštíme.

Veškeré testy byly vytvářeny a spouštěny pomocí frameworku YCSB (3.1). YCSB framework v první části, Load, do databáze vložil data, a následně v druhé části, Run, spustil testy a vrátil hodnoty výsledků. Pomocí přidání volitelných parametrů [66] bylo možné testy upravit podle vlastních potřeb.

Po spuštění databáze v prostředí Docker se k ní připojil YCSB framework, který následně prováděl testování nad zvolenou připojenou databází. Pro možnost komunikace bylo zapotřebí zprovoznit YCSB binding pro každou z databází, aby YCSB framework mohl úspěšně komunikovat se zvolenou databází, vložit data, spustit testy a vrátit patřičné výsledky.

4.3 Popis parametrů testů

Veškeré testy pro každou z testovaných databází byly spuštěny třikrát, a finální výsledek byl tedy průměrem ze všech tří testů pro každou databázi v dané testovací kategorii. Každý test byl spouštěn paralelně na čtyřech vláknech.

Do databáze bylo vždy vloženo 100 000 záznamů a následující test prováděl 1 000 000 dotazů nad danou naplněnou databází. Následně byla DBS vyprázdněna a celý proces se opakoval ještě dvakrát.

Testy byly prováděny ve třech YCSB kategoriích (tzv. YCSB Workload [60]). Workload A (Update-heavy: 50% read, 50% update), Workload B (Read-mostly: 95% read, 5% update) a Workload C (Read-only) (viz YCSB Workloads 3.1).

Pro každý Workload a jednotlivé databáze byla vytvořena tabulka výsledků jednotlivých testů a výsledný průměr těchto testů. Mezi nejdůležitější výsledky testů patří celková doba trvání testu, propustnost a percentily latence operací, konkrétně 95. a 99. percentil. V tabulce jsou také data o počtu provedených operací, průměrné latenci operací, a také minimální, průměrná a maximální latence operací.

Určité databáze vyžadují i další parametry pro spuštění testování, nejčastěji to jsou host IP adresy nebo porty dané DBS pro možné spojení. Dále je například možné specifikovat cestu k souborům, se kterými pracuje testovací prostředí, nebo stanovit TTL [34] testovaných dat, aby bylo možné vyhnout se expiraci dat při dlouhotrvajících nebo vzájemně opožděných testech.

4.4 Spouštění testů

Pro spuštění testů je nejprve zapotřebí nainstalovat, nastavit a spustit vybranou databázi. Poté se musíme k DBS připojit pomocí testovacího prostředí YCSB pro možnou komunikaci s databází a naplnit ji daty. Nakonec spustíme požadované testy a po dokončení testování nám prostředí YCSB vrátí tabulku výsledků v textové podobě.

Nainstalujeme platformu Docker [67] pro snadnou práci s instalovanými databázemi. Pokud chceme využívat grafického rozhraní pro prostředí Docker, je možnost také instalace platformy Docker Desktop [68, 69] (případně si samozřejmě můžeme DBS instalovat i jiným pro nás vhodnějším způsobem). Docker Desktop bych doporučil pro práci s databázemi, u kterých se plánuje větší úprava konfiguračních souborů nebo sledování chování DBS za běhu prostřednictvím logování.

Práce s Docker Desktop je velice intuitivní, proto se zaměříme na práci s Docker CLI [69]. Po zvolení vhodné databáze si musíme stáhnout Docker Image [70] této DBS [71] pomocí příkazu "docker image pull [OPTIONS] NAME[:TAG|@DIGEST]" [72]. Druhým krokem je nastavení a spuštění DBS. Vytvoříme tedy pomocí Docker Image náš Docker Container [70] který spustíme příkazem "docker container run [OPTIONS] IMAGE [COMMAND] [ARG...]" [73]. Nesmíme zapomenout nastavit správné čísla portů pro Docker Container, jinak nebude testovací prostředí YCSB schopno komunikovat s Docker Image.

Testovací prostředí YCSB je možné získat z oficiálního GitHub repozitáře Yahoo! Cloud Serving Benchmark [21]. Pokud nechcete manuálně překládat zdrojové kódy projektu pro možnost nasazení vlastních změn, je vhodné stáhnout funkční verzi, která je k dispozici na odkazu uvedeném v README souboru [74]. Pro úspěšné sestavení projektu ze zdrojových kódů je zapotřebí mít nainstalovaný Apache Maven [75] ve verzi 3. Pokud je na stroji nainstalována verze Maven 2, může docházet k chybám (aktuální verzi Mavenu můžete zkontrolovat pomocí příkazu "mvn -version"). Dále je zapotřebí mít nainstalované Java JDK ve verzi 8 (1.8) [76] a vyšší. Na operačním systému Windows doporučuji zkontrolovat hodnotu systémové proměnné "%JAVA_HOME%", abyste se ujistili, že je nastavena správně. To můžete udělat pomocí příkazu "echo %JAVA_HOME%". Pokud tato systémová proměnná není nastavena správně, musíte ji manuálně změnit (správně nastavená proměnná by měla obsahovat cestu k nainstalovanému Java JDK s verzí minimálně 1.8, například "C:\Program Files\Java\jdk1.8.0_231").

Po úspěšném zprovoznění testovacího prostředí YCSB a nastavení DBS, můžeme přejít na poslední fázi testování. Nejprve musíme DBS naplnit daty a následně spustit testy. Veškeré testy byly spouštěny prostřednictvím skriptů vložených do příkazového prostředí Windows PowerShell [77]. Nicméně není problém tyto skripty spouštět i v obyčejném příkazovém řádku. Jen zde může nastat problém s čitelností příliš dlouhých výpisů kvůli omezení pohybu ve výpisech. Všechny příkazy byly spouštěny v adresáři "bin", uvnitř kořenového adresáře projektu "ycsb-0.17.0".

V první části testování spustíme příkaz "ycsb load"pro připojení k databázi a vložení dat do DBS. Nejprve musíme specifikovat název testované DBS a následně zvolený Workload [60] (viz

popis YCSB Workloads 3.1). Pomocí volitelných parametrů [66] na konci každého příkazu specifikujeme naše požadavky. Například počet záznamů, které chceme do DBS vložit, je určen parametrem "-p recordcount=NUM", počet vláken parametrem "-p threadcount=NUM", a nejčastěji IP adresa nebo port DBS příkazy "-p DBS_NAME.host=IP_ADR -p DBS_NAME.port=NUM"pro spojení s DBS. Pomocí zadání vlastnosti "-s"po názvu DBS dosáhneme podrobnějšího výstupu při testování včetně chybových hlášek a logů. Celý příkaz pro vložení dat do DBS pak vypadá takto: "ycsb load DBS_NAME -s -P WORKLOAD [-p PARAMETERS]". Po dokončení vkládání dat získáme kromě dat v DBS také textový výstup popisující průběh zápisu dat do DBS, kde je zahrnuta propustnost vkládání a čas latence operací rozdělený do sekcí minimum, průměr, maximum a percentily, konkrétně 95. a 99. percentil.

Druhá část testování se věnuje spuštění operací pro čtení a úpravu vložených dat z předchozího kroku pomocí příkazu "ycsb run". Opět musíme zadat název testované DBS a Workload [60], který nám určuje poměr operací pro čtení a úpravy dat. Pomocí volitelných parametrů [66] určíme počet prováděných operací "-p operationcount=NUM". Kombinace celkového počtu operací a Workloadu nám určí konkrétní počet operací čtení a úprav, které se během testu vykonají. Pokud pracujeme s Workloady D nebo E (viz popis YCSB Workloads 3.1), dochází navíc k zápisu nových hodnot do DBS a počet klíčů v DBS stoupá. Ostatní Workloady provádějí pouze úpravy již existujících hodnot, a počet klíčů v DBS zůstává během testu stále stejný. Stejným způsobem jako v první fázi testování, i nyní můžeme specifikovat IP adresu a port DBS, případně počet vláken, podrobnější výstup testu atd. Celý příkaz pro spuštění testu DBS pak vypadá takto: "ycsb run DBS_NAME -s -P WORKLOAD [-p PARAMETERS]". Po dokončení testu získáme opět textový výstup v podobě tabulky popisující průběh testu, kde je zahrnuta propustnost operací a čas latence operací rozdělený do sekcí minimum, průměr, maximum a percentily, konkrétně 95. a 99. percentil.

Před reálným testováním můžeme ověřit, zda je všechno správně nastavené, pomocí rychlého dema (viz příkazy 4.4). Demo se skládá ze dvou příkazů, naplnění databáze tisíci záznamy a následného otestování, provedení přibližně 500 operací čtení a 500 úprav v databázi BasicDB [78]. Po spuštění obou příkazů by nám měly testy na konci vrátit status "Return=OK".

- .\ycsb load basic -P ..\workloads\workloada
- .\ycsb run basic -P ..\workloads\workloada

Pro názorný příklad si popíšeme a ukážeme příkazy pro testování databáze Redis [13] (viz příkazy 4.4 a obrázky 4.1, 4.2, 4.3). Testovaným scénářem bude Workload A [60] (50% Read, 50% Update), který poběží na 4 vláknech. Do databáze se vloží 10 000 záznamů, a provede se 10 000 operací během testování (přibližně 5 000 čtení a 5 000 aktualizací dat). Nejprve si stáhneme Docker Image pro KDBS Redis příkazem "docker pull"a následně spustíme kontejner příkazem "docker run"a nastavíme porty. Nyní máme KDBS Redis připravenou a můžeme začít s testováním. Nejprve spustíme příkaz "ycsb load"k vložení dat do databáze. Po dokončení vkládání dat můžeme v příkazovém

```
PS E:\ycsb-0.17.0\bin> docker pull redis:latest
latest: Pulling from library/redis
Digest: sha256:f14f42fabc123example456c7e824b9
Status: Image is up to date for redis:latest
docker.io/library/redis:latest

PS E:\ycsb-0.17.0\bin> docker run --name my-redis -p 6379:6379 -d redis:latest
aba5fabc123example4568aa97

PS E:\ycsb-0.17.0\bin> docker stop aba5fabc123example4568aa97
aba5fabc123example4568aa97

PS E:\ycsb-0.17.0\bin> docker rm aba5fabc123example4568aa97
aba5fabc123example4568aa97
```

Obrázek 4.1: Docker Redis, příkazy pro stažení, spuštění, zastavení a odstranění DBS

řádku vidět tabulku popisující informace o vkládání dat do databáze. Následně zahájíme testy spuštěním příkazu "ycsb run", a opět uvidíme ve výstupní tabulce výpis informací o našem testu. Pokud na konci tabulky uvidíme status "Return=OK", vše proběhlo podle očekávání.

- docker pull redis:latest
- docker run –name my-redis -p 6379:6379 -d redis:latest
- .\ycsb load redis -P ..\workloads\workloada -p redis.host=127.0.0.1 -p redis.port=6379 -p recordcount=10000 -p threadcount=4
- .\ycsb run redis -P ..\workloads\workloada -p redis.host=127.0.0.1 -p redis.port=6379 -p operationcount=10000 -p threadcount=4
- docker stop aba5fabc123example4568aa97
- docker rm aba5fabc123example4568aa97

4.5 Vyhodnocení výsledků testů

Po opětovném spuštění stejných testů a následném zprůměrování naměřených hodnot jsme dospěli k finálním výsledkům. Hlavními měřenými parametry byly propustnost (počet operací za sekundu), celkový čas testu (v milisekundách) a minimální, průměrná a maximální latence operací (v mikrosekundách), spolu s percentily latence (v mikrosekundách), konkrétně 95. a 99. percentil.

Jednotlivé testy byly rozděleny do čtyř scénářů: Workload A, Workload B, Workload C a Insert only (viz 3.1). Pro každý scénář byly všechny čtyři vybrané KDBS testovány třikrát, a jejich výsledky byly následně zprůměrovány. U scénářů Workload A a Workload B byla měřena latence čtení a aktualizace dat zvlášť, a jejich výsledná latence byla počítána jako průměr latence pro čtení a úpravu dat. Workload C provádí pouze čtení dat, a proto nebylo zapotřebí průměrovat výsledné

```
PS E:\ycsb-0.17.0\bin> .\ycsb load redis -P ..\workloads\workloada
        -p redis.host=127.0.0.1 -p redis.port=6379 -p recordcount=10000
        -p threadcount=4
YCSB Client 0.17.0
Loading workload...
Starting test.
[OVERALL], RunTime(ms), 4211
[OVERALL], Throughput(ops/sec), 2374.7328425552128
[TOTAL_GCS_PS_Scavenge], Count, 4
[TOTAL_GC_TIME_PS_Scavenge], Time(ms), 6
[TOTAL_GC_TIME_%_PS_Scavenge], Time(%), 0.14248397055331277
[TOTAL_GCS_PS_MarkSweep], Count, 0
[TOTAL_GC_TIME_PS_MarkSweep], Time(ms), 0
[TOTAL_GC_TIME_%_PS_MarkSweep], Time(%), 0.0
[TOTAL_GCs], Count, 4
[TOTAL_GC_TIME], Time(ms), 6
[TOTAL_GC_TIME_%], Time(%), 0.14248397055331277
[CLEANUP], Operations, 4
[CLEANUP], AverageLatency(us), 333.25
[CLEANUP], MinLatency(us), 80
[CLEANUP], MaxLatency(us), 1060
[CLEANUP], 95thPercentileLatency(us), 1060
[CLEANUP], 99thPercentileLatency(us), 1060
[INSERT], Operations, 10000
[INSERT], AverageLatency(us), 1647.61
[INSERT], MinLatency(us), 904
[INSERT], MaxLatency(us), 13895
[INSERT], 95thPercentileLatency(us), 2481
[INSERT], 99thPercentileLatency(us), 3389
[INSERT], Return=OK, 10000
```

Obrázek 4.2: YCSB Redis, příkaz pro vložení dat (load)

```
PS E:\ycsb-0.17.0\bin> .\ycsb run redis -P ..\workloads\workloada
        -p redis.host=127.0.0.1 -p redis.port=6379 -p operationcount=10000
        -p threadcount=4
YCSB Client 0.17.0
Loading workload...
Starting test.
[OVERALL], RunTime(ms), 2560
[OVERALL], Throughput(ops/sec), 3906.25
[TOTAL_GCS_PS_Scavenge], Count, 1
[TOTAL_GC_TIME_PS_Scavenge], Time(ms), 1
[TOTAL_GC_TIME_%_PS_Scavenge], Time(%), 0.0390625
[TOTAL_GCS_PS_MarkSweep], Count, 0
[TOTAL_GC_TIME_PS_MarkSweep], Time(ms), 0
[TOTAL_GC_TIME_%_PS_MarkSweep], Time(%), 0.0
[TOTAL_GCs], Count, 1
[TOTAL_GC_TIME], Time(ms), 1
[TOTAL_GC_TIME_%], Time(%), 0.0390625
[READ], Operations, 5157
[READ], AverageLatency(us), 998.8885010665116
[READ], MinLatency(us), 389
[READ], MaxLatency(us), 17695
[READ], 95thPercentileLatency(us), 1692
[READ], 99thPercentileLatency(us), 3479
[READ], Return=OK, 5157
[CLEANUP], Operations, 4
[CLEANUP], AverageLatency(us), 221.75
[CLEANUP], MinLatency(us), 60
[CLEANUP], MaxLatency(us), 638
[CLEANUP], 95thPercentileLatency(us), 638
[CLEANUP], 99thPercentileLatency(us), 638
[UPDATE], Operations, 4843
[UPDATE], AverageLatency(us), 985.7646087136072
[UPDATE], MinLatency(us), 364
[UPDATE], MaxLatency(us), 17567
[UPDATE], 95thPercentileLatency(us), 1744
[UPDATE], 99thPercentileLatency(us), 3675
[UPDATE], Return=OK, 4843
```

Obrázek 4.3: YCSB Redis, příkaz pro spuštění testů (run)

latence. Stejně tak tomu bylo u scénáře Insert only, kde dochází pouze k vkládání dat do KDBS. U grafů a tabulek latence je minimum označeno zkratkou "min", maximum "max"a průměr "avg".

V grafech porovnávajících propustnosti KDBS jsem zavedl jednotku "kiloops/sec", která reprezentuje tisíce provedených operací za sekundu. Všechny měřené propustnosti se pohybují v řádech jednotek tisíců operací za sekundu, a proto je tato jednotka vhodná a zlepšuje čitelnost grafů. Nejvyšší naměřené hodnoty latence jsem zařadil do jednoho společného grafu napříč všemi testovými scénáři (viz graf 4.6), protože při porovnání maximální latence v jednom grafu daného scénáře s minimální a průměrnou latencí (viz graf 4.7) docházelo k velkému nepoměru vykreslených hodnot, což způsobovalo zanedbatelné vizuální rozdíly pro hodnoty nejnižší a průměrné. Při použití logaritmické stupnice nebyly grafy stále čitelné, proto jsem maximální latence dal do jednoho společného grafu. Pokud na sloupcovém grafu dochází k několikanásobnému převýšení jedné maximální hodnoty některého sloupce vůči sloupcům ostatním v rámci dané kategorie či celého grafu, využívám vizuální indikátor přetrhnutého sloupce (viz graf 4.10), který znázorňuje, že daný sloupec má několikanásobně vyšší hodnotu oproti ostatním, a zároveň nedochází k vykreslení celé výšky sloupce, aby bylo možné zachovat vizuální poměry ostatních několikanásobně nižších hodnot.

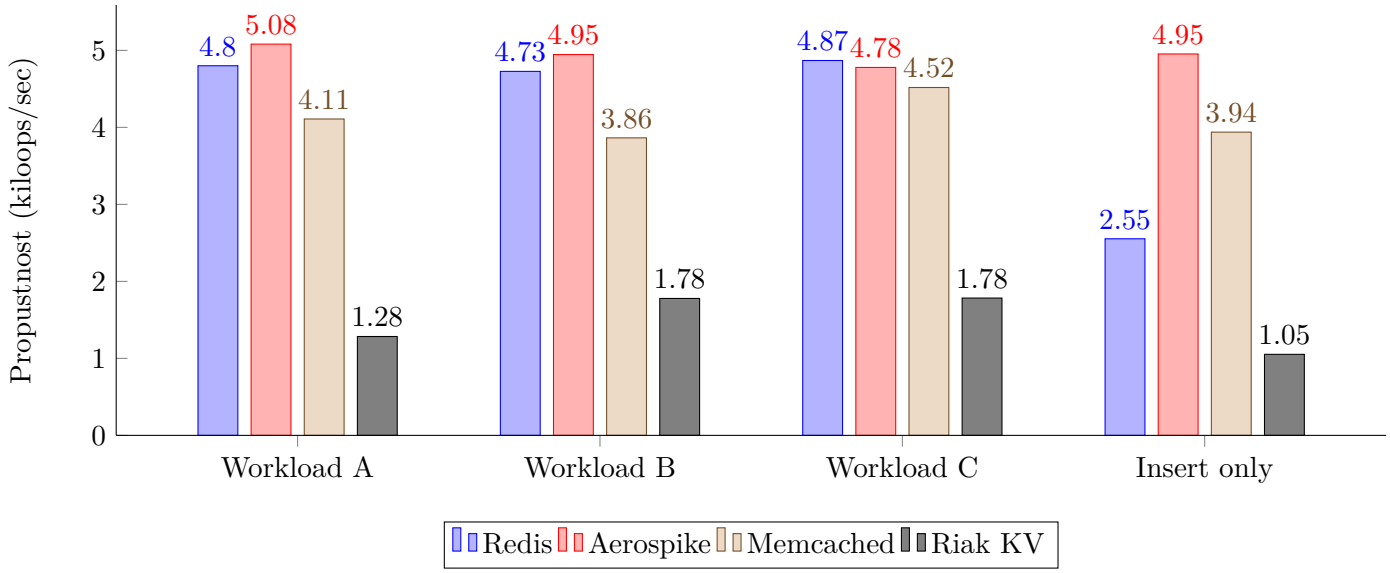
Obecně se dá říci, že v rámci těchto testů si průměrně vedla nejlépe KDBS Aerospike, následně za ní pak KDBS Redis a KDBS Memcached. Každopádně výsledky těchto tří KDBS jsou velice vyrovnané a liší se od konkrétních scénářů.

Databáze Aerospike měla kromě scénáře Workload C zaměřeného na čisté čtení vždy nejvyšší propustnost. Dosahovala nejlepších výsledků jak pro operace aktualizací, tak i zápisu. Za ní následovala KDBS Redis s nejrychlejším čtením záznamů a druhou nejrychlejší aktualizací. Tato KDBS zaostávala pouze při operaci vkládání nových záznamů. Databáze Memcached byla sice pomalejší pro čtení i aktualizace, ale při vkládání záznamů byla druhá nejrychlejší hned po KDBS Aerospike a podstatně rychlejší než KDBS Redis.

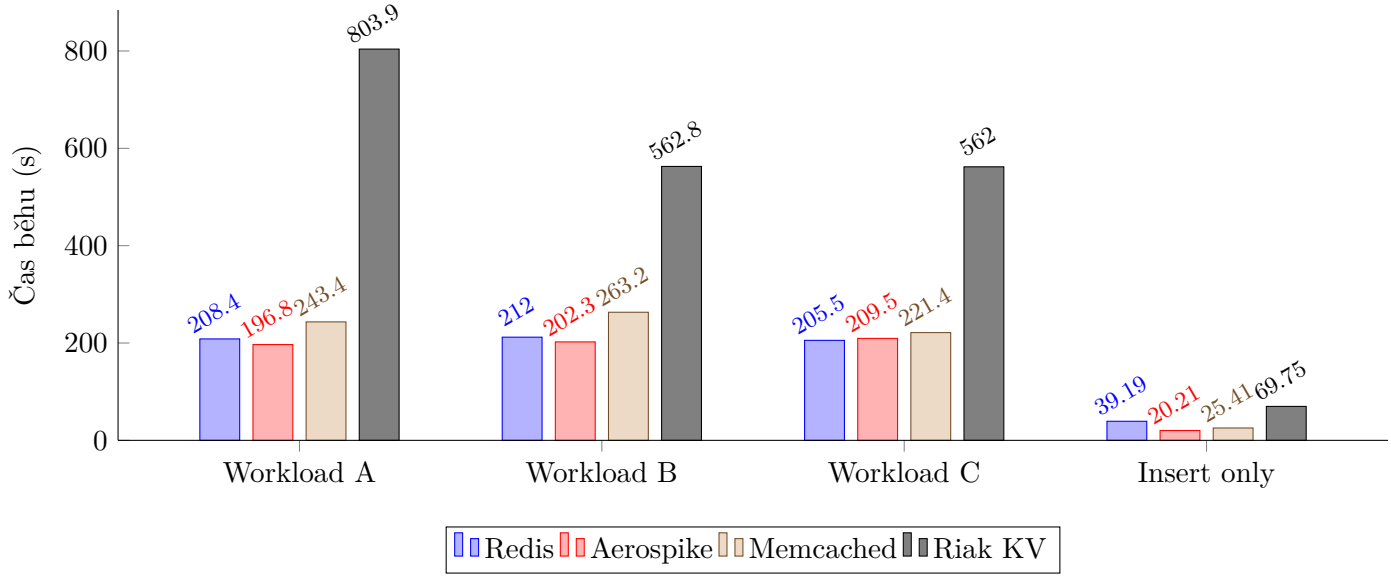
V rámci všech testů KDBS Riak KV několikanásobně zaostávala vůči zbylým třem databázím. Při testování docházelo i k pádům samotné KDBS spouštěné v Dockeru [25] a obecně k chybám a přetékání paměti, způsobené nejspíše špatným nastavením konfiguračních souborů. Obecně nastavení této KDBS bylo nejtěžší v porovnání s ostatními. Ve výsledcích testů (viz tabulka 4.2) můžeme vidět, že KDBS Riak KV má hodnotu nejnižší latence stále vyšší než jsou průměrné latence zbylých tří databází a dokonce je i vyšší než 95. percentil latence zbylých KDBS.

4.5.1 Testový scénář 1 - Workload A

Prvním testovaným scénářem byl Workload A [60], který se skládá z 50 % operací pro čtení a 50 % pro aktualizaci dat. Tento scénář byl vybrán pro demonstraci chování databází při vysokém počtu operací zaměřených na úpravu dat. Do každé KDBS bylo předem vloženo 100 000 záznamů a provádělo se 1 000 000 testovacích operací, tedy přibližně 500 000 čtení a 500 000 úprav. Konkrétní počet operací se vždy liší v řádu nízkých stovek, ale v součtu je vždy roven milionu.



Obrázek 4.4: Workload A, B, C + Insert only - Propustnost (kiloops/sec)



Obrázek 4.5: Workload A, B, C + Insert only - Čas běhu (s)

Z naměřených hodnot (viz tabulka 4.2 a grafy 4.4, 4.5) je patrné, že databáze Aerospike dosáhla nejvyšší propustnosti ze všech měřených KDBS s 5081,13 operacemi za sekundu a průměrnou dobou testu 196,8 sekund. Databáze Redis se umístila hned jako druhá s propustností 4801,04 operací za sekundu. Propustnost KDBS Redis je průměrně menší o 5,51 % oproti KDBS Aerospike pro scénář Workload A. Následuje KDBS Memcached s propustností 4108,70 operací za sekundu, která zaostává o 19,13 % oproti KDBS Aerospike a o 14,42 % oproti KDBS Redis. Nakonec KDBS Riak KV dosáhla nejnižší propustnosti 1283,98 operací za sekundu, což je zhoršení o 74,73 % oproti KDBS Aerospike. Riak KV je pro tento scénář téměř čtyřnásobně pomalejší ve srovnání s nejrychlejší měřenou databází Aerospike.

Při porovnání latence operací na první pohled je patrné, že trend rychlostí latence operací kopíruje propustnosti. Pokud se zaměříme na minimální a průměrnou latenci (viz graf 4.7), tak vidíme, že KDBS Aerospike zpracovala operaci nejrychleji za 317 μs a KDBS Redis za 315,17 μs. Rozdíl v minimální latenci pro tyto dvě KDBS je zanedbatelný. Databáze Memcached má poté minimální latenci operace 401,5 μs, což je přibližně o 27 % více než KDBS Aerospike a Redis. Databáze Riak KV má nejnižší latenci 1694 μs, což je pětinásobně více než nejnižší latence v tomto měření. Minimální latence KDBS Riak KV převyšuje i průměrné latence a 95. percentily tří zbylých databází ve všech testech pro tento scénář. Z toho měření vyplývá, že pro tento scénář a konfiguraci má KDBS Riak KV několikanásobně vyšší latenci operací. U průměrné latence vidíme, že KDBS Aerospike a Redis dosahují podobných hodnot přibližně 800 μs. KDBS Memcached dosahuje průměrné latence 967,9 μs, což je opět o 23,31 % pomalejší ve srovnání s KDBS Aerospike.

Z největších naměřených latencí (viz graf 4.6) lze vidět, že KDBS Aerospike provedla nejpomalejší operaci za 28,53 ms. V nejhorším možném případě pro tento scénář z hlediska latence operací byla KDBS Aerospike rychlejší přibližně o 67,94 % oproti KDBS Redis, u které maximální latence činí 47,92 ms, a přibližně o 190 % při porovnání s KDBS Memcached, kde byla maximální latence 82,71 %. KDBS Riak KV dosáhla nejvyšší latence 163,02 ms a je skoro dvojnásobně pomalejší při porovnání v rámci tohoto měření s druhou nejpomalejší KDBS Memcached.

Pokud se zaměříme na 95. a 99. percentil latence (viz graf 4.8), je zřejmé, že KDBS Aerospike dominuje svou nízkou latencí i v této kategorii pro scénář Workload A. KDBS Aerospike má 95. percentil s latencí 1121,8 μs, což je o 11,81 % méně než 95. percentil KDBS Redis, který činí 1273 μs, a o 19,42 % méně než KDBS Memcached, kde 95. percentil latence dosahuje hodnoty 1386,33 μs. Nakonec KDBS Riak KV dosáhla 95. percentilu latence 6757 μs. Hodnota pro 99. percentil latence KDBS Aerospike byla 1539,33 μs, což je opět nejnižší 99. percentil latence napříč všemi KDBS v rámci tohoto scénáře. Databáze Memcached má druhý nejnižší 99. percentil latence s hodnotou 1848,33 μs, a těsně za ní následuje KDBS Redis s 99. percentilem latence 1904,5 μs. KDBS Aerospike má 99. percentil nižší o 16,76 % při srovnání s KDBS Memcached a o 18,95 % menší při srovnání s KDBS Redis. KDBS Riak KV má opět nejhorší výsledky, a to latenci 11865,67 μs pro 99. percentil.

Z naměřených hodnot testového scénáře Workload A lze vidět, že KDBS Aerospike zvládá nejlépe

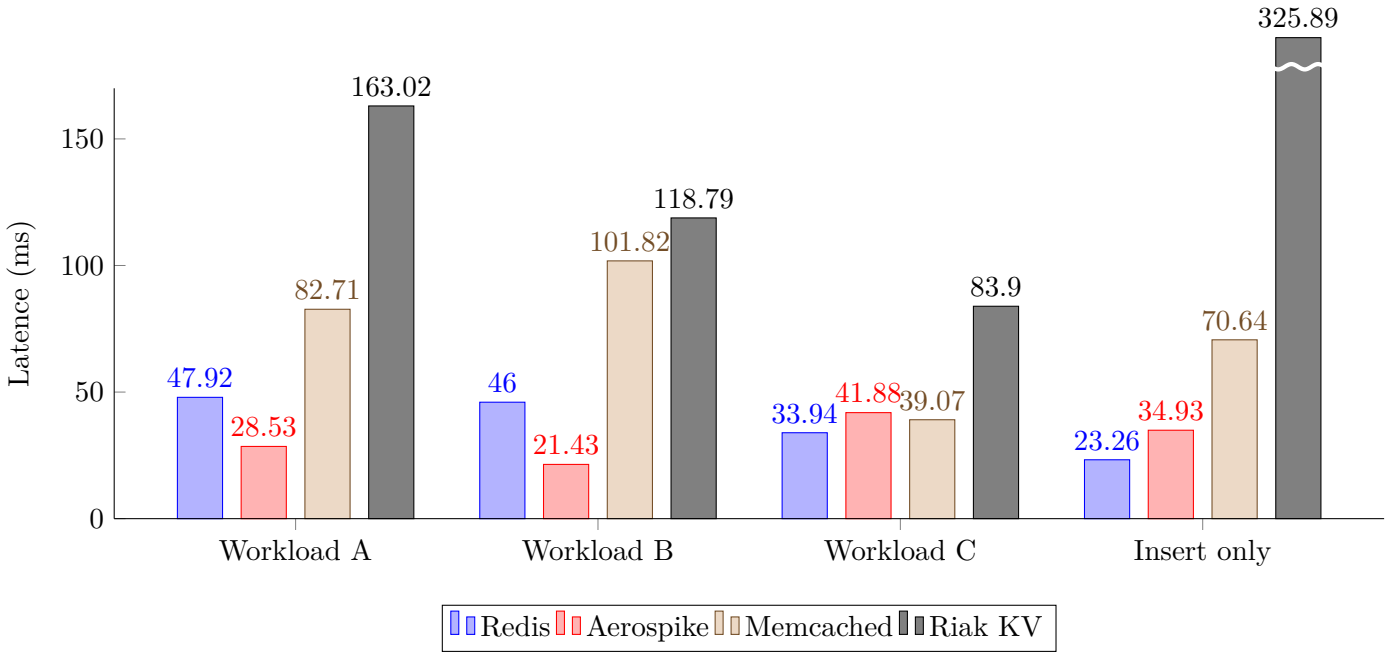
KDBS	Redis	Riak KV	Aerospike	Memcached
Čas běhu (ms)	208419	803880,33	196849,33	243409,33
Propustnost (op/sec)	4801,04	1283,98	5081,13	4108,70
Čtení				
Počet operací	500157	500382	499106	500683
Avg letence (μs)	836,77	2175,86	785,86	967,90
Min letence (μs)	325,33	861,33	319,67	395,33
Max letence (μs)	50473,67	158271	27311	83177,67
Letence 95. percentil (μs)	1281,33	3695	1122,67	1385
Letence 99. percentil (μs)	1917,33	7399	1540,33	1846
Aktualizace				
Počet operací	499843	499618	500894	499317
Avg letence (μs)	824,13	5941,33	782,68	967,90
Min letence (μs)	305	2526,67	314,33	407,67
Max letence (μs)	45375	167764,33	29753,67	82249,67
Letence 95. percentil (μs)	1264,67	9819	1121	1387,67
Letencezva 99. percentil (μs)	1891,67	16332,33	1538,33	1850,67
Čtení + aktualizace				
Počet operací	1000000	1000000	1000000	1000000
Avg letence (μs)	830,45	4058,59	784,27	967,90
Min letence (μs)	315,17	1694	317	401,5
Max letence (μs)	47924,3	163017,67	28532,33	82713,67
Letence 95. percentil (μs)	1273	6757	1121,83	1386,33
Latence 99. percentil (μs)	1904,5	11865,67	1539,33	1848,33

Tabulka 4.2: Naměřené výsledky testů pro Workload A

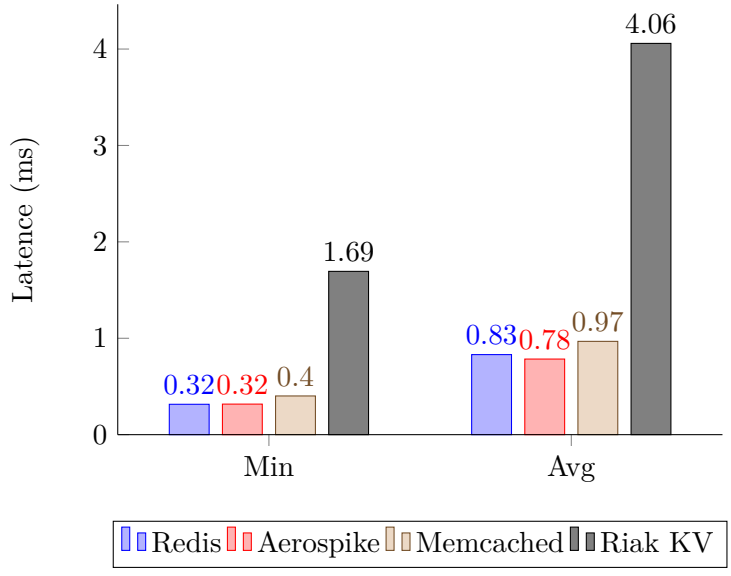
velký počet aktualizací ve srovnání s ostatními testovanými KDBS. Databáze Aerospike dosahovala výsledků přibližně o 15 % lepších při srovnání s ostatními KDBS. Za ní následovaly KDBS Redis a Memcached, které měly vzájemně podobné výsledky. Databáze Redis byla v řádu jednotek procent lepší oproti Memcached ve všech měřeních s výjimkou 99. percentilu latence, kde byla KDBS Memcached lepší o 3,04 % (viz graf 4.8). Jediná databáze Riak KV několikanásobně zaostávala vůči všem ostatním testovaným KDBS v rámci všech naměřených hodnot. Pokud bychom se zaměřili zvlášť na operace čtení a aktualizací u KDBS Riak KV (viz tabulka 4.2), uvidíme, že latence aktualizací je minimálně dvojnásobně horší než latence čtení pro tuto KDBS. Oproti tomu ostatní testované KDBS v rámci tohoto scénáře dosahovaly téměř identické latence jak pro čtení, tak zápis.

4.5.2 Testový scénář 2 - Workload B

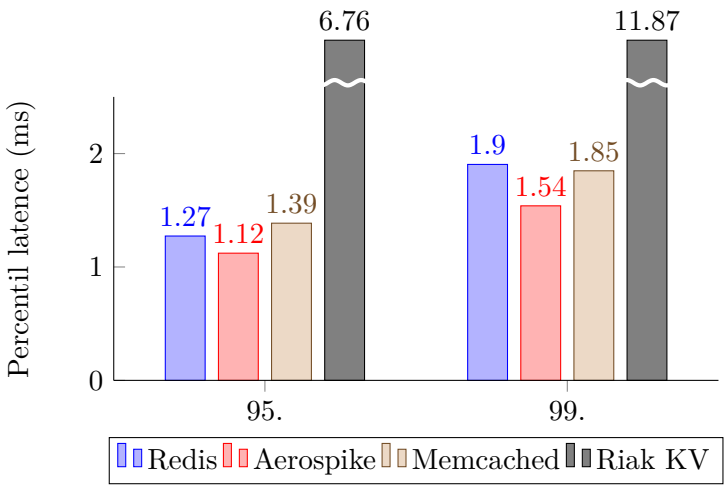
Druhým testovaným scénářem byl Workload B [60]. Tento scénář se snaží více realisticky simulovat reálný provoz databázového systému, kde převažuje čtení záznamů a aktualizace jsou méně časté.



Obrázek 4.6: Workload A, B, C + Insert only - Max Latence (ms)



Obrázek 4.7: Workload A - Min Avg Latence (ms)



Obrázek 4.8: Workload A - Percentil latence (ms)

Tento scénář se skládá z 95 % operací zaměřených na čtení a 5 % aktualizací. Na rozdíl od prvního scénáře, kde byl poměr těchto dvou operací vyvážený (50 % čtení, 50 % aktualizace), je tento scénář více přizpůsobený databázím, které mají rychlé čtení, a pomalé aktualizace zde nejsou tak zásadní. Do každé KDBS bylo předem vloženo 100 000 záznamů a provádělo se 1 000 000 testovacích operací, tedy přibližně 950 000 čtení a 50 000 úprav, přičemž konkrétní počet operací se vždy lišil v řádu nízkých stovek, ale součet byl vždy roven milionu.

Z naměřených hodnot (viz tabulka 4.3) opět vyplývá, že se opakuje stejný trend propustnosti KDBS jako u prvního scénáře. Pokud se podíváme na grafy propustnosti a celkového času běhu testu (viz grafy 4.4, 4.5), zjistíme, že KDBS Aerospike opět dosáhla nejlepší propustnosti napříč všemi testovanými KDBS, která se rovná 4945,37 operací za sekundu, s průměrným časem běhu celého testu 202,3 sekund. KDBS Aerospike má o 4,62 % lepší propustnost při porovnání s KDBS Redis, o 27,99 % oproti KDBS Memcached a o 178,18 % oproti KDBS Riak KV. Na druhém místě co se týče propustnosti je stejně jako v předešlém scénáři KDBS Redis s propustností 4726,96 operací za sekundu. Dále následuje KDBS Memcached s hodnotou propustnosti 3863,59 operací za sekundu a nakonec stejně jako v předešlém scénáři KDBS Riak KV s propustností 1778,16 operací za sekundu.

Z grafu minimální a průměrné latence operace (viz graf 4.9) vyplývá, že KDBS Aerospike a Redis mají prakticky identické časy minimální latence operace, a to 327 μs, liší se pouze v desetinných hodnotách, což je zanedbatelný rozdíl. Následuje KDBS Memcached s nejmenší latencí 397,83 μs, zaostávající o 17,71 %. Poslední je KDBS Riak KV s nejvyšší hodnotou minimální latence operace 1795,33 μs, což je pomalejší o 81,78 %. Průměrné časy latence operací jsou pro KDBS Aerospike a Redis opět téměř identické, s hodnotou 807,98 μs pro Aerospike a 843,29 μs pro Redis. Následuje KDBS Memcached s hodnotou 1055,21 μs, která je o 30,60 % větší než u KDBS Aerospike. Nakonec KDBS Riak KV dosáhla nejvyšší latence 3950,21 μs, což je o 388,95 % více než u KDBS Aerospike.

Nejvyšší hodnoty latence (viz graf 4.6) ukazují v tomto případě výrazný nárůst pro KDBS

Memcached (101,82 ms) a naopak pokles pro KDBS Riak KV (118,79 ms) ve srovnání se scénářem Workload A. Databáze Aerospike a Redis si udržují hodnoty velmi blízké předchozímu scénáři. To znamená, že KDBS Aerospike dosahuje maximální latence 21,43 ms, což je o 53,41 % méně než u KDBS Redis, kde je maximální latence 46 ms.

Pokud se zaměříme na porovnání percentilů latencí (viz graf 4.10), vidíme, že i 95. a 99. percentil latence následuje trend ostatních výsledků tohoto testovaného scénáře. KDBS Aerospike má 95. percentil latence roven 1192,83 μs. Tento percentil je nižší o 9,87 % než u KDBS Redis, která má 95. percentil latence roven 1323,67 μs. Oproti KDBS Memcached, která má 95. percentil latence roven 1744 μs je KDBS Aerospike rychlejší o 31,61 %. Při porovnání s KDBS Riak KV vidíme obrovský rozdíl, kdy 95. percentil latence činí 6067,67 μs, což je přibližně o 409 % více než u KDBS Aerospike a o 247,98 % více než u KDBS Memcached, která je v rámci tohoto scénáře druhá nejpomalejší. Při sledování 99. percentilu vidíme opět stejné poměry hodnot. Nejnižší hodnota u KDBS Aerospike činí 1767,83 μs, následuje Redis s 2237,83 μs a zhoršením o 26,60 % oproti Aerospike. Poté Memcached s hodnotou 2838 μs. Nakonec Riak KV dosahuje nejvyššího 99. percentilu latence 10650,33 μs.

Z tohoto měření vyplývá, že KDBS Memcached ve scénáři Workload B zaostává oproti databázím Aerospike a Redis. Ty si udržují podobné výsledky jako v předchozím scénáři, naměřené hodnoty jsou taktéž vzájemně srovnatelné ve všech testovaných kategoriích. Přestože Aerospike dosahuje lepších výsledků, rozdíl mezi nimi je zanedbatelný. Databáze Riak KV stále dosahuje řádově horších hodnot než ostatní testované KDBS, ale propustnost se v tomto scénáři zlepšila o 38,43 % oproti předchozímu scénáři. Zbylé tři KDBS si vedly srovnatelně s předchozím scénářem. To naznačuje, že KDBS Riak KV zaostává zejména při aktualizacích, což vede k zvýšení propustnosti při sníženém počtu aktualizací. Na druhou stranu KDBS Memcached zaostává o 6,08 % oproti předchozímu scénáři, protože nemá dostatečně rychlé čtení ve srovnání s KDBS Aerospike a Redis.

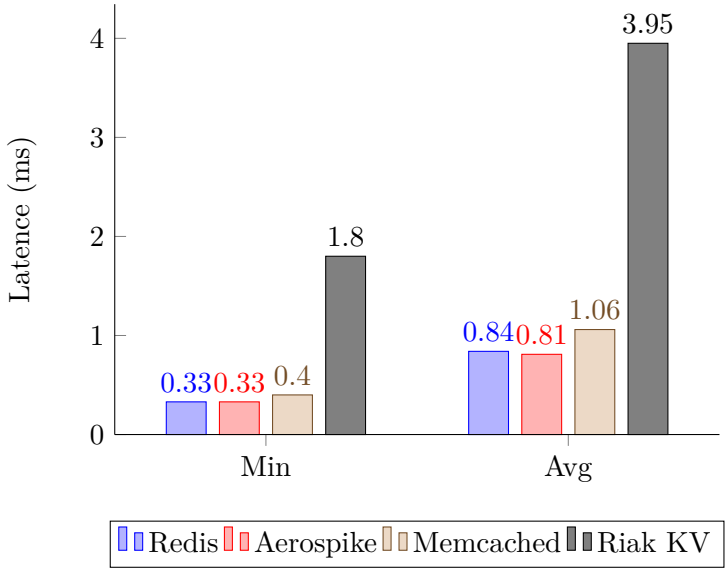
4.5.3 Testový scénář 3 - Workload C

Třetím testovým scénářem je Workload C [60]. Tento scénář se věnuje čistě čtení záznamů. Výsledky tohoto scénáře nám pomohou porovnat propustnost testovaných KDBS čistě na základě načítání hodnot. Pokud má databáze velice rychlé čtení ale pomalé zápisy, aktualizace nebo mazání hodnot, tak v tomto scénáři bude excelovat. Do každé KDBS bylo předem vloženo 100 000 záznamů a testovalo se 1 000 000 operací čtení hodnot.

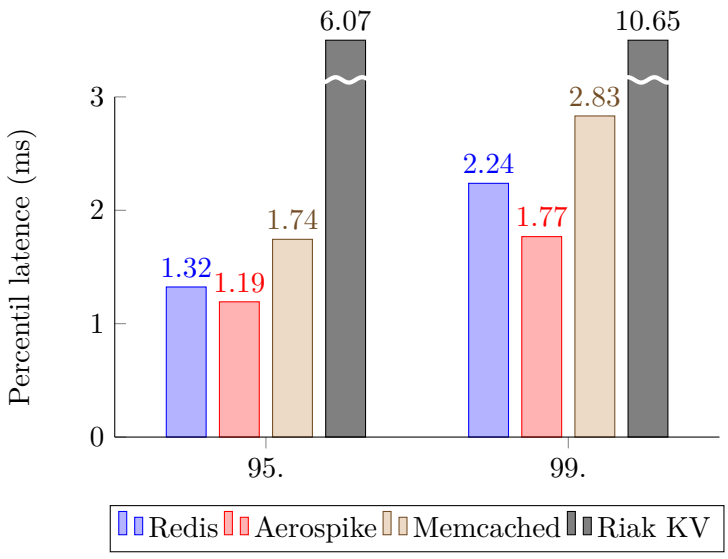
Naměřené hodnoty (viz tabulka 4.4) nám ukazují navýšení propustnosti KDBS Redis oproti předešlým scénářům. Propustnost pro tuto KDBS stoupla na 4868,3 operací za sekundu, což je nejvyšší propustnost napříč ostatními testovanými databázemi (viz graf 4.4), testy na KDBS Redis pro tento scénář trvaly průměrně 205,5 sekund (viz graf 4.5). Na druhém místě je KDBS Aerospike s propustností 4778,13 operací za sekundu, což je o 86,87 operací za sekundu méně a přibližně o 1,85 % v porovnání s KDBS Redis. Následuje KDBS Memcached s propustností 4517,67 operací za sekundu

KDBS	Redis	Riak KV	Aerospike	Memcached
Čas běhu (ms)	212026,33	562799,67	202264	263195,67
Propustnost (op/sec)	4726,96	1778,16	4945,38	3863,59
Čtení				
Počet operací	949836	949728	949706	950435
Avg letence (μs)	845,22	2072,91	805,97	1046,18
Min letence (μs)	313,67	825,33	313,33	389
Max letence (μs)	50559	110356,33	25732,33	112020,33
Letence 95. percentil	1325	3232,33	1188	1735,33
Letence 99. percentil (μs)	2232,33	6805,67	1756	2813
Aktualizace				
Počet operací	50164	50272	50294	49565
Avg letence (μs)	841,3802758	5827,51	809,98	1064,24
Min letence (μs)	342	2765,33	341,33	406,67
Max letence (μs)	41449,67	127231	17132,33	91625,67
Letence 95. percentil	1322,33	8903	1197,67	1752,67
Letence 99. percentil (μs)	2243,33	14495	1779,67	2851
Čtení + aktualizace				
Počet operací	1000000	1000000	1000000	1000000
Avg letence (μs)	843,30	3950,21	807,97	1055,21
Min letence (μs)	327,83	1795,33	327,33	397,83
Max letence (μs)	46004,33	118793,67	21432,33	101823
Letence 95. percentil	1323,67	6067,67	1192,83	1744
Letence 99. percentil (μs)	2237,83	10650,33	1767,83	2832

Tabulka 4.3: Naměřené výsledky testů pro Workload B



Obrázek 4.9: Workload B - Min Avg Latence (ms)



Obrázek 4.10: Workload B - Percentil latence (ms)

a poklesem o 350,63 operací za sekundu, což je 7,2 % oproti KDBS Aerospike. Nakonec KDBS Riak KV zde dosáhla stejné propustnosti jako v předešlém scénáři Workload B a to 1783,39 operací za sekundu. Propustnost KDBS Riak KV je při porovnání s KDBS Aerospike menší o 3084,91 operací za sekundu a 63,39 %.

Pokud se podíváme na graf minimální a průměrné latence (viz graf 4.11), můžeme vidět, že KDBS Redis měla nejmenší minimální latenci napříč ostatními testovanými KDBS a to 308,67 μs. Hned za ní následuje KDBS Aerospike s latencí 319,33 μs a nárůstem o 3,45 %. Následuje KDBS Memcached s minimální latencí 376 μs a nárůstem přibližně o 21,8 % v porovnání s KDBS Redis. Na posledním místě je opět KDBS Riak KV s minimální latencí 804,67 μs, což je tentokrát menší než jsou průměrné latence ostatních testovaných KDBS. Toto měření nám dokazuje dobré výsledky pro čtení dat u KDBS Riak KV oproti aktualizacím prováděným touto databází. Oproti KDBS Redis je zde ale stále nárůst o 160,73 %, což je ale stále méně než u předchozích scénářů. U průměrné latence odezvy pozorujeme stejný trend jako u minimálních hodnot. Databáze Redis vede s nejmenší průměrnou latencí 819,32 μs. Hned za ní následují KDBS Aerospike s latencí 835,17 μs a nárůstem o 1,93 % a Memcached s latencí 880,17 μs a nárůstem o 7,43 %. Nakonec je zde opět KDBS Riak KV s průměrnou latencí 2241,01 μs a nárůstem o 173,54 % oproti KDBS Redis, nicméně stále je tento nárůst menší než u předchozích scénářů, kde byl i čtyřnásobný.

Maximální latence (viz graf 4.6) nám ukazují, že KDBS Redis je nejvíce stabilní při všech dotazech s maximální latencí nejpomalejší operace 33,94 ms. Následují databáze Memcached s latencí 39,07 ms a nárůstem o 15,11 % a Aerospike s maximální latencí 41,88 ms a nárůstem o 23,39 %. Na posledním místě je zde KDBS Riak KV s maximální latencí 83,9 ms, což je nárůst o 147,27 % při porovnání s KDBS Redis, každopádně při porovnání s prvním scénářem došlo k poklesu o 48,51 % z maximální latence 163,02 ms a při porovnání s druhým scénářem k poklesu

KDBS	Redis	Riak KV	Aerospike	Memcached
Čas běhu (ms)	205492,67	562029,33	209528	221353,33
Propustnost (op/sec)	4868,30	1783,39	4778,13	4517,67
Čtení				
Počet operací	1000000	1000000	1000000	1000000
Avg letence (μs)	819,32	2241,01	835,17	880,17
Min letence (μs)	308,69	804,67	319,33	376
Max letence (μs)	33935	83903	41881,67	39071
Letence 95. percentil (μs)	1213,33	3714,33	1242,33	1233,33
Letence 99. percentil (μs)	1856	7885,67	1861,67	1615,33

Tabulka 4.4: Naměřené výsledky testů pro Workload C

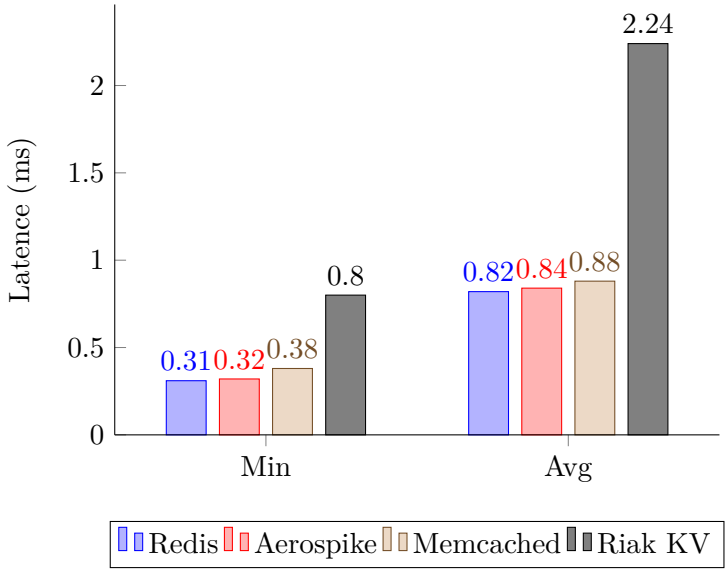
o 29,35 % z latence 118,79 ms.

Hodnoty percentilů (viz graf 4.12) nám pro 95. percentil opět ukazují nejnižší latenci pro KDBS Redis a to 1213,33 μs. Následuje KDBS Memcached s latencí 1233,33 μs a nárůstem pouze o 1,65 % ve srovnání s KDBS Redis. Další je KDBS Aerospike s latencí 1242,33 μs a nárůstem o 2,39 %. Na konci je poslední KDBS Riak s latencí 3717,33 μs a nárůstem o 206,15 % při porovnání s KDBS Redis. Tento 95. percentil nám ukazuje zanedbatelný rozdíl latence mezi databázemi Redis, Memcached a Riak. Jediná KDBS Riak KV zde měla několikanásobně vyšší latenci. U 99. percentilu můžeme poprvé vidět nejlepší výsledky u KDBS Memcached, její letence je 1615,33 μs, což je znatelně menší oproti ostatním KDBS v této kategorii. Následují databáze Redis s latencí 1856 μs a nárůstem o 14,91 % a Aerospike s latencí 1861,67 μs a nárůstem o 15,25 %. Procentuální rozdíl 99. percentilu latence mezi KDBS Aerospike a Redis je zanedbatelný a činí pouze 0,305 %. Na posledním místě je opět KDBS Riak KV s latencí 7885,67 μs a nárůstem o 388,15 % při porovnání s KDBS Memcached a 323,41 % při porovnání s KDBS Aerospike.

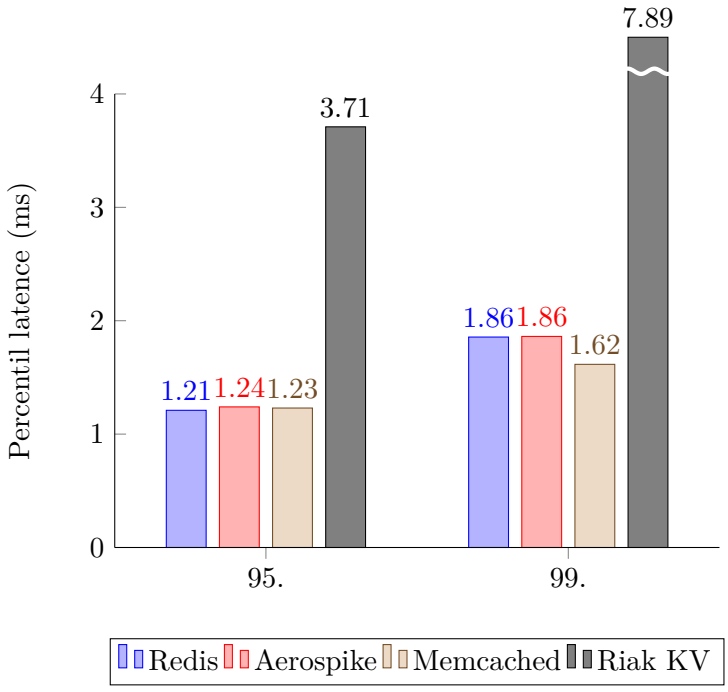
Tento scénář ukázal dominanci KDBS Redis při operacích zaměřených čistě na čtení. Při porovnání propustnosti prvním scénářem (viz graf 4.4) byla tato KDBS lepší přibližně o 67,3 operací za sekundu a o 141,34 operací za sekundu oproti druhému scénáři. Každopádně KDBS Aerospike a Memcached si opět vedly velice obstojně a zaostávaly pouze o desítky procent. Databáze Riak KV dokázala, že při čistém čtení si vede stejně dobře, jako když se ke čtení provádělo navíc 5 % aktualizací v druhém scénáři. Při porovnání této KDBS s prvním scénářem byl nárůst propustnosti o 499,41 operací za sekundu, tedy o 38,86 %.

4.5.4 Testový scénář 4 - Insert only

Poslední testový scénář, Insert only s číslem 4, se věnoval pouze vkládání dat do KDBS. Všechny předchozí scénáře se zaměřovaly na čtení nebo aktualizace. Databáze u předešlých scénářů se však neplnila novými daty, vždy obsahovala 1 000 000 záznamů. Tentokrát byla každá databáze nově



Obrázek 4.11: Workload C - Min Avg Latence (ms)



Obrázek 4.12: Workload C - Percentil latence (ms)

vytvořena a před spuštěním testu byla prázdná. Testovala se právě propustnost a odezva během plnění databáze novými daty. Do každé KDBS se vkládalo přesně 100 000 záznamů.

Při zkoumání naměřených hodnot (viz tabulka 4.5) případně výšky sloupců v grafu (viz graf 4.5), si můžeme všimnout poměrně kratšího času vkládání dat. Tento problém nastává především proto, že do databází bylo vkládáno desetkrát méně záznamů než je počet prováděných operací u předchozích scénářů. Proto vkládání dat zabralo pouze desítky sekund oproti ostatním testům, které trvaly stovky sekund. Proto by bylo vhodnější pro graf času běhu vytvořit spíše databáze obsahující 1 000 000 záznamů, nebo tuto kategorii vykreslovat zvlášť. Konkrétně se nejrychlejší KDBS Aerospike naplnila za 20,21 sekund. Nicméně ostatní porovnání jsou vzájemně relevantní a hodnoty propustností nebo latencí jsou přizpůsobeny pro porovnání napříč všemi scénáři. Při měření propustnosti pro 100 000 a 1 000 000 operací vkládání vycházely testy propustnosti a latence stejně. Navíc opětovým spuštěním testů a průměrováním výsledků se omezily možné zásadní odchylky.

Pokud se podíváme na graf propustnosti (viz graf 4.4), uvidíme velkou rychlost vkládání záznamů KDBS Aerospike oproti všem ostatním testovaným databázím. Propustnost této KDBS je 4953,06 operací za sekundu. S velkým skokem následuje KDBS Memcached s propustností 3937,96 operací za sekundu a poklesem o 20,5 %. Za ní následuje KDBS Redis s propustností 2553,02 operací za sekundu a poklesem o 48,48 % oproti KDBS Aerospike. Poslední je KDBS Riak KV s propustností 1052,43 operací za sekundu a poklesem o 78,79 %.

Z grafu minimální a průměrné latence (viz graf 4.13) vyčteme stejnou posloupnost nejrychlejších databází jako z grafu propustnosti. Databáze s nejnižší minimální latencí, 318,67 μs, je KDBS Aerospike. Opět následuje KDBS Memcached s latencí 406,33 μs a nárůstem o 27,5 %. Za ní je KDBS Redis s minimální latencí 762 μs a nárůstem o 139,02 % oproti KDBS Aerospike. Na posledním místě je KDBS Riak KV s latencí 1121,33 μs a nárůstem času nejnižší latence operace zápisu o 251,77 %. Kategorie zaměřená na průměrné latence má také tento trend. První je KDBS Aerospike s latencí 800,58 μs. Následuje KDBS Memcached s latencí 983,52 μs a nárůstem o 22,83 %. Na třetím místě je KDBS Redis s latencí 1559,62 μs a nárůstem průměrné latence o 94,75 % oproti KDBS Aerospike. Na konci je KDBS Riak KV s latencí 2753,93 μs a nárůstem o 243,74 %.

Dle grafu maximální latence (viz graf 4.6) soudíme, že KDBS Redis je sice v tomto scénáři třetí co se týče propustnosti a minimální i průměrné latence, každopádně znatelně dominuje maximální latenci zápisu oproti ostatním KDBS. Tato databáze má maximální latenci pouze 23,26 ms. Oproti tomu KDBS Aerospike má maximální latenci 34,93 ms a dochází zde k nárůstu latence o 50,22 %. Následuje KDBS Memcached s maximální latencí 70,64 ms a nárůstem latence o 203,79 % při porovnání s KDBS Redis. Poslední je KDBS Riak KV s naměřenou hodnotou maximální latence 325,89 ms, což je nárůst o 1300,73 % a několikanásobně nejvyšší naměřená latence napříč testy všech databází ve všech čtyřech scénářích.

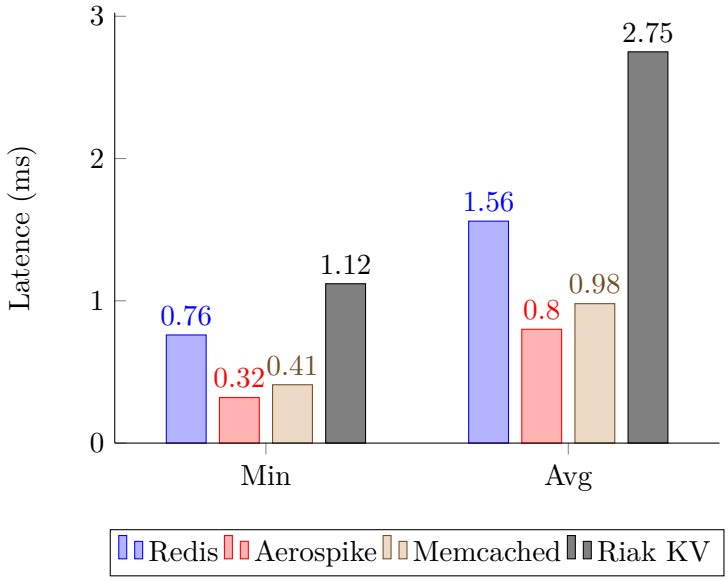
V grafu znázorňujícím 95. a 99. percentil latence (viz graf 4.14) vidíme stejný trend jako u propustnosti a minimální a průměrné latence v rámci tohoto scénáře. Pro 95. percentil latence má opět KDBS Aerospike nejnižší latenci s hodnotou 1199,33 μs. Za ní následuje KDBS Memcached

KDBS	Redis	Riak KV	Aerospike	Memcached
Čas běhu (ms)	39184	69749	20212	25412,67
Propustnost (op/sec)	2553,02	1052,43	4953,06	3937,96
Zápis				
Počet operací	100000	100000	100000	100000
AverageLatency(us)	1559,62	2753,93	800,58	983,52
Min letence (μs)	762	1121,33	318,67	406,33
Max letence (μs)	23260,33	325887	34927	70644,33
Letence 95. percentil (μs)	2219	4386,33	1199,33	1536,67
Letence 99. percentil (μs)	3195	8124,33	1690	2322,33

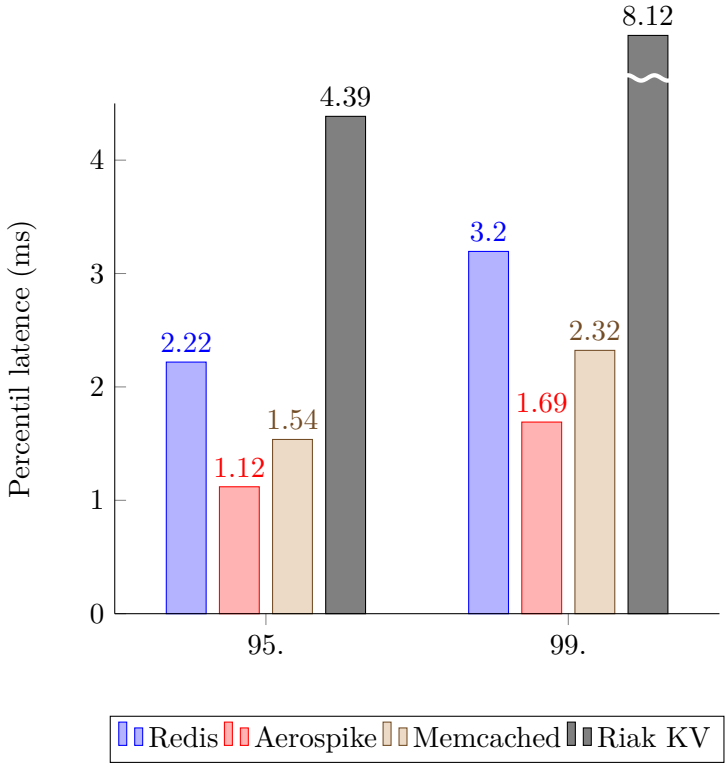
Tabulka 4.5: Naměřené výsledky testů pro Insert only

s latencí 1536,67 μs a nárůstem o 28,12 %. Další v pořadí je KDBS Redis s latencí 2219 μs a nárůstem 95. percentilu latence o 84,99 % oproti KDBS Aerospike. Poslední je pro tento percentil KDBS Riak KV s 95. percentilem latence s hodnotou 4386,33 μs a nárůstem o 265,72 %. Následně pak 99. percentil zastává stejné uspořádání KDBS dle nejnižších latencí jako 95. percentil. Databáze Aerospike má latenci 1690 μs, za ní je KDBS Memcached s latencí 2322,33 μs a nárůstem o 37,43 %. Následuje KDBS Redis s latencí 3195 μs a nárůstem 99. percentilu latence o 89,05 % oproti KDBS Aerospike. Na posledním místě je opět KDBS Riak KV s latencí 8124,33 μs a nárůstem o 380,57 %.

Tento scénář nám ukázal, jak rychlá dokáže být KDBS Aerospike, pokud jde o vkládání nových záznamů do databáze. S nejvyšší propustností 4953,06 operací za sekundu překonala všechny ostatní KDBS v rámci tohoto scénáře. Byla rychlejší o více než 1015 operací za sekundu ve srovnání s druhou nejrychlejší v tomto scénáři, KDBS Memcached. Samotná KDBS Memcached zde byla pro téměř všechny kategorie druhá nejrychlejší, zatímco v předchozích třech scénářích se pohybovala spíše až na třetím místě. Jediná kategorie ve které byla Memcached až třetí v rámci tohoto měření, byla maximální latence, kde zaostávala za databázemi Redis a Aerospike. Databáze Redis zde převážně obsadila pozici třetí nejrychlejší, přičemž v jediné kategorii nejvyšší naměřené latence dosáhla nejnižších hodnot napříč ostatními KDBS. Databáze Riak KV zůstala stále nejpomalejší a dosahovala ještě horší propustnosti než v předchozích scénářích. Oproti scénáři Workload C, kde dosáhla nejvyšší propustnosti 1783,39 operací za sekundu, v porovnání sama se sebou v rámci všech scénářů měla v tomto scénáři pokles o 730,97 operací za sekundu a 41,01 %.



Obrázek 4.13: Insert only - Min Avg Latence (ms)



Obrázek 4.14: Insert only - Percentil latence (ms)

Kapitola 5

Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval tím, co vlastně jsou KDBS, a pokusil jsem se představit vlastnosti a využitelnost těchto databází. Na trhu dominují především RDBS, a tak jsem se svou prací snažil osvětlit i část ze světa NoSQL databází. KDBS se často používají pro implementaci cache paměti a dle mých testů dokáží dosahovat i úctyhodné propustnosti v řádu několika tisíců operací za sekundu. Stejně tak ze sledování aktuálních trendů lze vidět, že obecně NoSQL DBS zažívají za poslední desetiletí velký nárůst popularity a dostávají se více do širokého povědomí [8]. Určitě se nesnažím tvrdit, že by měly v budoucnu KDBS nahradit RDBS, ale stávají se větší součástí databázových systémů a fungují společně s RDBS v souladu díky své horizontální škálovatelnosti a nedefinovanému schématu dat.

Práce mi poskytla možnost nahlédnout do odvětví testování databází a z praktického hlediska mě konkrétně seznámila s testovacím prostředím YCSB [21]. Jak se ukázalo, toto prostředí je vhodné právě pro testy databází s párovými daty klíč-hodnota, a při správném nastavení je možné si připravit veškeré testy na míru. Nicméně právě rozběhnutí prostředí YCSB a propojení s vybranými KDBS bylo jednou z největších výzev pro možnost pokroku samotné práce. Několikrát bylo potřeba doinstalovat nový software nebo jeho kompatibilní verze, a nakonec i nastavit správné systémové proměnné.

Práce mi ukázala, jak důležité je provádět testy databází pro možnost porovnání využití jednotlivých KDBS pro různé scénáře použití. Stejně tak se ukázalo, jak složité je komplexně otestovat KDBS a vzájemně je porovnávat. Existuje nespočet nastavení parametrů testů, a je zapotřebí vybrat ty nejvhodnější pro co nejširší škálu databází. Navíc každá z databází se chová trochu jinak při různých testech nad odlišnými daty. Je vidět, že testy musí být připraveny nezaujatě a vhodně pro všechny KDBS. Je totiž možné nachystat testy na míru pro určitou databázi, kde budou ostatní databáze zaostávat, a vybraná KDBS bude vypadat jako ideální ve všech ohledech. Stejně tak to lze udělat i naopak s ostatními KDBS. Proto je potřeba testovat objektivně, opakovaně a ideálně rozsáhle.

Nebojím se říci, že je nemožné vybrat čistě jednu nejlepší KDBS, která by byla nejideálnější

ve všech ohledech. Pokud bych měl stručně zhodnotit testované KDBS, musím především vyzdvihnout KDBS Aerospike [23]. Kromě jednoho scénáře zaměřeného na čisté čtení měla vždy nejvyšší propustnost. Dosahovala skvělých výsledků jak pro aktualizace záznamů, tak pro vkládání nových záznamů. Těsně za ní následovala KDBS Redis [13] s nejrychlejším čtením záznamů a druhou nejrychlejší aktualizací. Tato KDBS zaostávala pouze při operaci vkládání nových záznamů. Databáze Memcached [19] byla sice pomalejší pro čtení i aktualizace, ale při vkládání záznamů byla druhá nejrychlejší hned po KDBS Aerospike a podstatně rychlejší než KDBS Redis. Na posledním místě se umístila KDBS Riak KV [22], nejspíš kvůli špatnému nastavení konfiguračních souborů. Ve všech testech byla podstatně horší než zbylé testované databáze. Tato KDBS měla i nejsložitější nastavení pro chod testů napříč všemi ostatními KDBS, a obecně s ní bylo nejvíce problémů. Stávalo se, že i během testů padala nebo vracela chyby.

Při vytváření této práce jsem se seznámil s řadou nových pojmů a systémů, ať už jde o práci s prostředím Docker [25], YCSB nebo konkrétně popisovanými databázemi. Z hlediska představení testovacího prostředí YCSB a testování vybraných KDBS v něm bych pro sebe práci hodnotil jako obohacující a naučnou.

Literatura

1. *What Is a Key-Value Database?* [online]. 2022. [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: https://aws.amazon.com/nosql/key-value/.
2. *How do NoSQL databases work? Simply Explained! youtube* [online]. 2021. [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=0buKQHokLK8.
3. *What is a Relational Database (RDBMS)?* [online]. 2024. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://www.oracle.com/cz/database/what-is-a-relational-database/.
4. *Relace* [online]. 2024. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=zaklady-informatiky-pro-biology--teoreticke-zaklady-informatiky--teorie-mnozin--relace.
5. *Efektivnější SQL dotazy pomocí plánování a optimalizace* [online]. 2024. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://cs.khanacademy.org/computing/computer-programming/sql/relational-queries-in-sql/a/more-efficient-sql-with-query-planning-and-optimization.
6. FOOTE, Keith D. *Key-Value Databases Demystified* [online]. 2023. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://www.dataversity.net/understanding-key-value-databases/.
7. PODETI, Suresh. *Schema-on-read vs Schema-on-write* [online]. 2023. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://medium.com/@sureshpodeti/schema-on-read-vs-schema-on-write-624a1f1343e4.
8. *DBMS popularity broken down by database model* [online]. 2024. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://db-engines.com/en/ranking_categories.
9. *2019 Database Trends – SQL™ vs. NoSQL, Top Databases, Single vs. Multiple Database Use* [online]. 2019. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://scalegrid.io/blog/2019-database-trends-sql-vs-nosql-top-databases-single-vs-multiple-database-use/.
10. *DB-Engines* [online]. 2024. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://db-engines.com/en/.
11. *Method of calculating the scores of the DB-Engines Ranking* [online]. 2024. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://db-engines.com/en/ranking_definition.

12. *DB-Engines Ranking - Trend Popularity* [online]. 2024. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://db-engines.com/en/ranking_trend.

13. *Redis* [online]. 2022. [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: https://redis.io/.

14. *Oracle - Database* [online]. 2024. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://www.oracle.com/database/.

15. *DB-Engines Ranking* [online]. 2022. [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: https://db-engines.com/en/ranking.

16. *DB-Engines Ranking of Key-value Stores* [online]. 2024. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: https://db-engines.com/en/ranking/key-value+store.

17. *Amazon DynamoDB* [online]. 2022. [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: https://aws.amazon.com/dynamodb/.

18. *Azure Cosmos DB* [online]. 2024. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: https://azure.microsoft.com/cs-cz/products/cosmos-db.

19. *What is Memcached?* [online]. 2024. [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: https://memcached.org/.

20. *TPC* [online]. 2023. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: https://www.tpc.org/.

21. *Yahoo! Cloud Serving Benchmark (YCSB)* [online]. 2019. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: https://github.com/brianfrankcooper/YCSB.

22. *Riak KV* [online]. 2022. [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://riak.com/products/riak-kv/index.html.

23. *Aerospike* [online]. 2022. [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: https://aerospike.com/.

24. *Top NoSQL Key Value store Databases: Predictiveanalyticstoday* [online]. 2022. [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: https://www.predictiveanalyticstoday.com/top-sql-key-value-store-databases/.

25. *Docker Builds: Now Lightning Fast* [online]. 2024. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://www.docker.com/.

26. *Introduction to Oracle NoSQL Database* [online]. 2024. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: https://docs.oracle.com/cd/E26161_02/html/GettingStartedGuide/introduction.html.

27. *WHAT IS A KEY-VALUE DATABASE?* [online]. 2024. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: https://redis.io/nosql/key-value-databases/.

28. *Distribuované databázové systémy (DDBS)* [online]. 2024. [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: http://langer.zam.slu.cz/teaching/dbaii/distribuovane_db_systemy.pdf.

29. ANANDHI, R.; CHITRA, K. *A Challenge in Improving the Consistency of Transactions in Cloud Databases - Scalability* [online]. 2012. [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: https://research.ijcaonline.org/volume52/number2/pxc3881485.pdf.

30. *Best Document Databases: G2* [online]. 2022. [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: https://www.g2.com/categories/document-databases.

31. *DB-Engines Ranking Key-value stores, 2nd place Amazon DynamoDB* [online]. 2024. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: https://db-engines.com/en/system/Amazon+DynamoDB.

32. *Amazon DynamoDB auto scaling* [online]. 2024. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: https://db-engines.com/en/system/Amazon+DynamoDB.

33. *Improving data access with secondary indexes* [online]. 2024. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: https://docs.aws.amazon.com/amazondynamodb/latest/developerguide/SecondaryIndexes.html.

34. *Using Time to Live (TTL)* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://docs.oracle.com/cd/E17277_02/html/GettingStartedGuide/timetolive.html.

35. *Amazon Virtual Private Cloud (VPC* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://aws.amazon.com/vpc/.

36. *PartiQL* [online]. 2023. [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: https://partiql.org/docs.html.

37. *Oracle NoSQL Database* [online]. 2022. [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: https://www.oracle.com/database/nosql/technologies/nosql/.

38. *Redis CLI* [online]. 2023. [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: https://redis.io/docs/manual/cli/.

39. *Hybrid Memory Architecture* [online]. 2022. [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: https://aerospike.com/products/features/hybrid-memory-architecture/.

40. *Aerospike Quick Look (AQL)* [online]. 2022. [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: https://docs.aerospike.com/tools/aql.

41. *Oracle Berkeley DB* [online]. 2022. [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://www.oracle.com/database/technologies/related/berkeleydb.html.

42. *Multiversion concurrency control* [online]. 2022. [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://www.theserverside.com/blog/Coffee-Talk-Java-News-Stories-and-Opinions/What-is-MVCC-How-does-Multiversion-Concurrencty-Control-work.

43. *SQLite* [online]. 2023. [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: https://www.sqlite.org/index.html.

44. *Getting and Installing BDB SQL* [online]. 2024. [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: https://docs.oracle.com/cd/E17276_01/html/bdb-sql/buildinstall.html.

45. SHAPIRO, Marc; PREGUIÇA, Nuno; BAQUERO, Carlos; ZAWIRSKI, Marek. *Conflict-free Replicated Data Types* [online]. 2014. [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://inria.hal.science/hal-00932836/file/CRDTs_SSS-2011.pdf.

46. *Snappy* [online]. 2022. [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://www.solvusoft.com/cs/file-extensions/software/google/snappy/.

47. *Project Voldemort* [online]. 2022. [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: https://www.project-voldemort.com/voldemort/.

48. *Java Management Extensions* [online]. 2022. [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: https://www.oracle.com/technical-resources/articles/javase/jmx.html.

49. *InfinityDB Java NoSQL Database: Boiler Bay Software* [online]. 2022. [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: https://boilerbay.com/.

50. *MongoDB* [online]. 2023. [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://www.mongodb.com/.

51. *Couchbase* [online]. 2023. [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://www.couchbase.com/.

52. *Document-oriented database* [online]. 2019. [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20190813163612/https://www.digitalocean.com/community/tutorials/a-comparison-of-nosql-database-management-systems-and-models.

53. *Cassandra* [online]. 2023. [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://cassandra.apache.org/_/index.html.

54. *Wide Column Stores* [online]. 2023. [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://db-engines.com/en/article/Wide+Column+Stores.

55. *Systém pro podporu rozhodování* [online]. 2023. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/RPZ/08-DSS.pdf.

56. OSE, Omoruyi; OKOKPUJIE, Kennedy; NDUJIUBA, Nsikan Nkordeh Charles; JOHN, Samuel; UZAIRUE, Idiake Stanley. Performance Benchmarking of Key-Value Store NoSQL Databases [online]. 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/330653733_Performance_Benchmarking_of_Key-Value_Store_NoSQL_Databases.

57. AHAMED, Athiq. Benchmarking Top NoSQL Databases [online]. 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/303485422_Benchmarking_Top_NoSQL_Databases.

58. COOPER, Brian F.; SILBERSTEIN, Adam; TAM, Erwin; RAMAKRISHNAN, Raghu; SEARS, Russell. *Benchmarking Cloud Serving Systems with YCSB* [online]. 2023. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: https://courses.cs.duke.edu/fall13/cps296.4/838-CloudPapers/ycsb.pdf.

59. *5/ Yahoo Cloud Serving Benchmark(YCSB): Knobs and Tunes* [online]. 2023. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=ZJPTgzFXTKo&list=PL9Bv8oH2HsjyOnAOYYLEPUAKq-2HoUWoA&index=5.

60. *Core Workloads - YCSB* [online]. 2023. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://github.com/brianfrankcooper/YCSB/wiki/Core-Workloads.

61. GIBSON, Garth. *YCSB++: PARALLEL DATA LAB, CMU* [online]. 2023. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: https://www.pdl.cmu.edu/ycsb++/.

62. *Online transaction processing (OLTP)* [online]. 2023. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://www.oracle.com/cz/database/what-is-oltp/.

63. *IoT definition in detail* [online]. 2023. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://www.sap.com/insights/what-is-iot-internet-of-things.html.

64. *TPC-C* [online]. 2023. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://www.tpc.org/tpcc/.

65. *TPC-C Top Performance Results* [online]. 2023. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://www.tpc.org/tpcc/results/tpcc_perf_results5.asp?resulttype=all.

66. *Core YCSB properties* [online]. 2024. [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: https://github.com/brianfrankcooper/YCSB/wiki/Core-Properties.

67. *Get Docker* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://docs.docker.com/get-docker/.

68. *Docker Desktop* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://www.docker.com/products/docker-desktop/.

69. *Docker Docs - CLI* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://docs.docker.com/reference/cli/docker/.

70. *What's the Difference Between Docker Images and Containers?* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://aws.amazon.com/compare/the-difference-between-docker-images-and-containers/.

71. *Docker Hub* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://hub.docker.com/.

72. *docker image pull* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://docs.docker.com/reference/cli/docker/image/pull/.

73. *docker container run* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://docs.docker.com/reference/cli/docker/container/run/.

74. *Download the latest release of YCSB* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://github.com/brianfrankcooper/YCSB/releases/download/0.17.0/ycsb-0.17.0.tar.gz.

75. *Apache Maven Project* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://maven.apache.org/download.cgi.

76. *Oracle - Java Downloads* [online]. 2024. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://www.oracle.com/java/technologies/downloads/.

77. *Co je PowerShell?* [online]. 2024. [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: https://learn.microsoft.com/cs-cz/powershell/scripting/overview?view=powershell-7.4.

78. *com.yahoo.ycsb.BasicDB* [online]. 2024. [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: https://github.com/TSDBBench/YCSB-TS/blob/master/core/src/main/java/com/yahoo/ycsb/BasicDB.java.

79. *Windows Environment Variables* [online]. 2024. [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: https://ss64.com/nt/syntax-variables.html.

80. *Terms and Definitions for Database Replication* [online]. 2011. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20110710093040/http://www.postgres-r.org/documentation/terms.