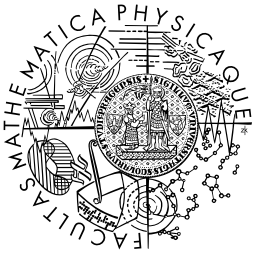


MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Dominik Hrdý

PerfEval: Spojení unit testů s vyhodnocováním výkonu

Katedra distribuovaných a spolehlivých systémů

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Petr Tůma, Dr.

Studijní program: Informatika

Studijní obor: Systémové programování

Praha 2024

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V ..... dne ....

Podpis autora

Poděkování.

Název práce: PerfEval: Spojení unit testů s vyhodnocováním výkonu

Autor: Dominik Hrdý

Katedra: Katedra distribuovaných a spolehlivých systémů

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Petr Tůma, Dr., Katedra distribuovaných a spolehlivých systémů

Abstrakt: Abstrakt.

Klíčová slova: testování výkonnost

Title: PerfEval: Marrying unit testing with performance evaluation

Author: Dominik Hrdý

Department: Department of Distributed and Dependable Systems

Supervisor: prof. Ing. Petr Tůma, Dr., Department of Distributed and Dependable Systems

Abstract: Abstract.

Keywords: testing performance

Obsah

Úvod

Po více než dvacet let pomáhají unit testy udržovat kvalitu kódu v průběhu vývoje softwaru. Za tuto dobu bylo vyvinuto mnoho knihoven pro implementaci a spouštění unit testů. Verzovací nástroje jako GitLab nebo GitHub umožňují v rámci vývoje software verzovat, spouštět unit testy a reagovat na jejich případná selhání.

Psaní výkonnostních testů, které by pomáhaly udržovat kvalitu kódu stejně jako unit testy, již tak běžné není. Práce s frameworky pro měření výkonu totiž není tak jednoduchá, jako používání knihoven pro psaní unit testů. Průběžné udržování výkonnosti by však mohlo pomáhat udržovat kvalitu kódu obdobným způsobem jako unit testy.

Některé frameworky pro vyhodnocování výkonu softwaru jsou podobné frameworkům pro psaní unit testů. Frameworky jako JMH nebo BenchmarkDotNet pomáhají implementovat výkonnostní testy. Vyhodnocování naměřených výsledků dnes obvykle zahrnuje i jejich ruční zhodnocení. Vyhodnocování výkonu totiž vyžaduje porovnat naměřený výkon s nějakou další referenční hodnotou. Měřící frameworky tyto referenční hodnoty nemají a ani je nikde získat nemohou, protože měří pouze jednu verzi softwaru. Nemohou tedy dělat zmíněné celkové vyhodnocení.

Vyhodnocování výkonnostních testů je složitější problém než vyhodnocování unit testů. Unit testy testují korektnost. Ta se prokáže tak, že na každý zadaný vstup program vrátí očekávaný výstup. Při vyhodnocování výkonu se změří sada dat o běhu programu. Tato data ale sama o sobě nemají požadovanou vypovídající hodnotu a je nutné je zkoumat v kontextu.

Výsledkem této práce je nástroj nazvaný PerfEval. PerfEval je konzolová aplikace napsaná v programovacím jazyce Java. PerfEval umí vyhodnocovat výsledky výkonnostních testů. Způsob a průběh vyhodnocování je řízený pomocí argumentů příkazové řádky.

PerfEval je schopen automatického hlášení výsledků výkonnostních testů. Umí porovnávat výsledky měření výkonu dvou verzí softwaru mezi sebou. PerfEval je také vhodný pro skriptování, protože o výsledcích informuje nejen výpisem na standardní výstup, ale také exit kódem. Nástroj podporuje zpracování výstupů frameworků BenchmarkDotNet a JMH ve formátu JSON, ale je rozšiřitelný i pro zpracování jiných frameworků nebo formátů.

1. Kontext

1.1 Testování softwaru při vývoji

Při vývoji softwaru je vhodné vyvíjený software neustále testovat. Software lze testovat více způsoby, ale cílem testů je vždy otestovat některý z důležitých kvalitativních atributů, jako je například korektnost nebo výkon.

Pro testování korektnosti se obvykle používají unit testy. Jedná se většinou o krátké testovací funkce, které kontrolují, jestli se testovaný kód chová požadovaným způsobem. Zjišťují tedy ‚jestli kód na zadaný vstup vrátí očekávaný výstup. Ke kódu, který není aktuálně vyvíjen, se obvykle nemění ani unit testy. Proto když se mění části kódu kolem již takto hotové části, tak unit testy stále průběžně sledují korektnost tohoto již hotového kódu. Zdali je kód korektní se pomocí unit testů zjistí velmi jednoduše. Kód je korektní, pokud vrátil očekávaný výstup a pokrytí kódu unit testy je dostatečné.

Testování výkonu obvykle probíhá tak, že se použije nějaký vhodný měřící framework. Obvyklé frameworky pro měření výkonu mají vlastní pravidla, jak se mají označit metody, které se mají měřit. Tyto frameworky umožňují měřit výkon softwaru podle různých metrik. Mezi tyto metriky se řadí čas, propustnost a například spotřeba paměti. Výsledky měření frameworky umí obvykle zaznamenat jak do strojově čitelného formátu, tak do formátu čitelného pro člověka. Výsledek měření je ale pouze sada čísel, kde jsou ke jménům testovaných metod přiřazeny naměřené hodnoty.


```
"Benchmarks":[
   {
      "DisplayInfo":"SortingAlgorithms.LINQSort: DefaultJob",
      "Namespace":"TestRunner",
      "Type":"SortingAlgorithms",
      "Method":"LINQSort",
      "MethodTitle":"LINQSort",
      "Parameters":"",
      "FullName":"TestRunner.SortingAlgorithms.LINQSort",
      "HardwareIntrinsics":"AVX2,AES,BMI1,BMI2,FMA,LZCNT,PCLMUL,POPCNT VectorSize=256",
      "Statistics":{
      "Measurements":[
         {
            "IterationMode":"Overhead",
            "IterationStage":"Jitting",
            "LaunchIndex":1,
            "IterationIndex":1,
            "Operations":1,
            "Nanoseconds":311800
         },{
            "IterationMode":"Workload",
            "IterationStage":"Jitting",
            "LaunchIndex":1,
            "IterationIndex":1,
            "Operations":1,
            "Nanoseconds":297300
         },{
```


Obrázek 1.1: Příklad části výstupu frameworku BenchmarkDotNET

Výsledky testování výkonu se tedy musejí vyhodnocovat tak, že se podrobně prozkoumá výsledná sada čísel. Oproti testování korektnosti, kdy test projde nebo neprojde, je testování výkonu výrazně složitější. Pohledem na samostatnou sadu

dat se nedá určit, zdali je software dostatečně rychlý. Aby bylo možné ze sady určit něco vypovídajícího, bylo by možné stanovit pevný limit výkonnosti. Tento přístup nemusí být vypovídající při dlouhodobém vývoji a při hodnotách hluboko pod limitem. Proto je vhodné, aby se datové sady, které testovací framework produkuje, porovnávaly mezi sebou. Porovnáním sad je totiž možné zjistit, jestli nedošlo k významným změnám výkonu při vývoji od předchozí verze. Frameworky samotné však tuto možnost obvykle nemají.

1.2 Průběžná integrace

Při vývoji softwaru se často používají nástroje pro automatizování některých činností. Obvykle se automatizují činnosti jako jsou správa verzí, spouštění testů a jejich vyhodnocování.

Pro správu verzí při vývoji softwaru se obvykle používá nástroj git. Git je vhodný i pro práci ve velkých týmech. Umožňuje totiž členění projektu do větví. Každá větev je vhodná pro vývoj samostatné části aplikace. Následným spojováním větví pak dochází k propojení větších funkčních celků aplikace, které byly vyvinuty v jednotlivých větvích. Nástroj si formou pamatování si změn udržuje přehled o průběžných verzích a provedených změnách. Nástroj je možné ovládat jednoduchými příkazy z příkazové řádky. Je to tedy nástroj, který je možné ovládat ze skriptů.

Nástroj git umí jednoduše zprostředkovat průběžnou integraci (continuous integration). Průběžná integrace umožňuje uživateli dělat automatizované kroky při nahrávání nových verzí do větve nebo při spojování větví. Při průběžné integraci tedy jde o spouštění skriptu při některé ze zmíněných událostí. V rámci průběžné integrace je možné testovat software pomocí unit testů i benchmarků pro měření výkonu. Dále je možné použít jakékoli jiné příkazy příkazové řádky. Do průběžné integrace je tedy možné jednoduše zapojit téměř jakoukoli konzolovou aplikaci.

1.3 Scénář

Programátor se rozhodne naprogramovat si své vlastní softwarové dílo. Z tohoto softwarového díla časem přestane být malý projekt. Vznikne mu potřeba udržovat kvalitu kódu. Vytvoří si tedy unit testy s dostatečným pokrytím, aby byl schopen udržovat korektnost napsaného kódu. Začne používat nějaký verzovací nástroj, například Git, a vytvoří si skript pro průběžnou integraci. V rámci této průběžné integrace bude pomocí unit testů s každou novou verzí udržovat průběžná korektnost.

Dalším z aspektů kvality kódu, které by chtěl udržovat je výkon. Programátor s využitím nějakého frameworku pro měření výkonu začne měřit výkon svého kódu. Měření výkonu se trochu podobá unit testům. U měřících frameworků jako je BenchmarkDotNET nebo JMH se vytvoří specializované měřící metody, které se podobají unit testovacím metodám z unit testovacích frameworků jako je například JUnit. Tyto měřící metody, ale změří pouze číslo a jednotku, která nevypovídá o změně výkonu oproti jiné verzi. Pokud chce programátor výkon udržovat potřebuje vyhodnotit právě tuto změnu.

Programátor tedy musí vzít výsledky měření aktuální verze a výsledky měření referenční verze vůči které chce změnu výkonu vyhodnocovat a sám výsledky porovnat. Porovnání výsledků měření nemusí být možné pouhým Pohledem na sady číselných dat. Pravděpodobně si budou hodnoty hodnoty obou sad podobné. Obzvlášť pokud změna bude příliš málo výrazná. Proto by musel programátor nejprve číselná data nějakým způsobem sám zpracovat. Ze zpracovaných dat by pak pro každou měřenou metodu kódu musel vyhodnotit zda-li došlo k výrazné změně výkonu, které by se měl dále věnovat.

PerfEval by měl být nástroj, který řeší programátorův problém. Měl by to být nástroj, který by mu měl pomoci z naměřených datových sad vyhodnotit změnu výkonu a výrazné změny hlásit. Taktéž by mu nástroj měl být schopen udržovat výkon průběžně, a proto by mělo být možné jej použít v průběžné integraci obdobným způsobem jako frameworky pro psaní unit testů.

Vyvíjený nástroj PerfEval byl při vývoji směřován k tomu, aby uspokojil potřeby zmíněného programátora. Vyhodnocování výkonnostních testů se tedy provádí pomocí konzolové aplikace, která se ovládá pomocí příkazů a argumentů. Tento design byl zvolen zejména kvůli tomu, aby se nástroj používal co nejvíce jako spouštění unit testů v rámci průběžné integrace.

2. Kontext vyhodnocování výkonu

2.1 Automatické vyhodnocování

Ve scénáři z minulé kapitoly byl zmíněn problém programátora s testováním výkonu. Programátor má unit testy, které testují korektnost jeho softwaru. Umí je efektivně spouštět s každou změnou pomocí průběžné integrace. Chtěl by, aby mohl podobně efektivně testovat i výkon svého softwaru.

S testováním výkonu je ale problém. Když se spustí měření výkonu, tak výsledkem je pouhá datová sada. Tato datová sada nevypovídá nic o změně průběžného výkonu, která je zajímavá. Právě podle změny ve výkonu softwaru je možné zjistit, jestli je nutné kód optimalizovat, protože dochází k významným zhoršením.

Při měření výkonu dochází jako při jakémkoli jiném měření k šumu. Tento šum se projevuje tak, že pokud se měření opakuje při stejných podmínkách, tak se naměřené hodnoty liší. Tomuto šumu se nelze vyvarovat. Měření proto opakujeme a naměřené hodnoty vyhodnocujeme pomocí statistických metod, které si s tímto šumem poradí.

Vyvinutý systém PerfEval řeší programátorův problém. Jedná se o nástroj, který může zakomponovat do své průběžné integrace tak, aby byl pokles výkonu hlášen. Nástroj při spuštění průběžné integrace porovná dvě poslední verze a případně oznámí zhoršení výkonu. Na základě tohoto hlášení může celá průběžná integrace hlásit varování nebo zprávu o chybě, což je obdobné chování, jako se očekává při selhání unit testů.

2.2 Měření výkonu

Před začátkem vývoje PerfEvalu bylo nutné zamyslet nad tím, jak můžou výsledky měření výkonu softwaru vypadat. V následujících odstavcích budou zmiňovány jednotlivé poznatky o výsledcích měření výkonu. Tyto poznatky vedly k tomu, jak se PerfEval chová a jakou má architekturu.

Měřené veličiny. Testovací frameworky umožňují měřit mnoho různých fyzikálních veličin. Patří mezi ně například doba vykonávání metody, frekvence počtu operací za jednotku času a spotřeba paměti. Předpokládat se tedy dá jen to, že pokud vezmu dva výsledky měření výkonu ze dvou různých verzí, tak budou reprezentovány stejnou fyzikální veličinou a v lepším případě budou mít i stejnou fyzikální jednotku. Je tedy vhodné, aby výsledný systém byl schopen přijmout jakoukoli veličinu bez ohledu na jednotku.

Identifikátory testů. Protože testovací frameworky nepoužívají žádné identifikátory testů, tak je nejpřímější řešení k jejich rozpoznávání používat jména testovacích metod jako identifikátor. Tato jména poskytují ve výsledcích měření jak framework BenchmarkDotNet, tak framework JMH. Z dokumentace frameworku Criterion (Heisler, 2024) pro měření výkonu v jazyce Rust se název metody ve vý-

sledcích nachází také. Z toho lze usoudit, že použití jména metody jako identifikátoru může být dostatečně obecné.

Kompilace just-in-time. V případě měření výkonu u jazyků, které jsou kompilované metodu JIT, je nutné být obezřetný. Je nutné všímat si, jaká data byla naměřena. Jazyky kompilované metodou JIT mohou při měření podléhat tzv. zahřívací fázi. Jedná se o fázi, kdy kód ještě není plně optimalizovaný, ale již se provádí a může být měřen. V závislosti na použitém měřícím frameworku je pak nutné naměřená data vhodně filtrovat. V případě, že by se data před a po optimalizaci nacházela v jedné sadě dat, mohla by být zkreslená.

2.2.1 Výstup měření BenchmarkDotNet

BenchmarkDotNet je framework určený k měření výkonu programů na platformě .NET. V důsledku toho, že měří programy na platformě .NET, je schopen měřit výkon programů napsaných v programovacích jazycích C#, F# a Visual Basic. Podrobnosti o tomto měřícím frameworku je možné nalézt v dokumentaci (Akinshin, 2024).

Při měření výkonu pomocí BenchmarkDotNet se měřené hodnoty vypisují na standardní výstup včetně konečného shrnutí. Mimo standardní výstup se ještě výsledky měření ukládají do strojově zpracovatelných formátů, jako je například JSON nebo CSV.

Výstupem měření výkonu programu v jazyce C# pomocí frameworku BenchmarkDotNet jsou již statisticky zpracované hodnoty. Aby bylo možné sledovat jednotlivé naměřené hodnoty, je nutné zvolit již při psaní testů správný exportér, který tuto funkci podporuje. Dále je nutné naměřené hodnoty filtrovat, protože C# je kompilovaný metodou JIT.


```
},{
   "IterationMode":"Overhead",
   "IterationStage":"Warmup",
   "LaunchIndex":1,
   "IterationIndex":1,
   "Operations":8192,
   "Nanoseconds":32500
},{
   "IterationMode":"Overhead",
   "IterationStage":"Actual",
   "LaunchIndex":1,
   "IterationIndex":15,
   "Operations":8192,
   "Nanoseconds":31300
},{
   "IterationMode":"Workload",
   "IterationStage":"Warmup",
   "LaunchIndex":1,
   "IterationIndex":1,
   "Operations":8192,
   "Nanoseconds":613752700
},{
   "IterationMode":"Workload",
   "IterationStage":"Actual",
   "LaunchIndex":1,
   "IterationIndex":5,
   "Operations":8192,
   "Nanoseconds":641681400
},{
```


Obrázek 2.1: Struktura výsledků měření frameworku BenchmarkDotNET

BenchmarkDotNet je možné nakonfigurovat tak, aby se v souboru s výsledky nacházely podrobnosti o prostředí, jako je operační systém, verze platformy .NET,

jméno, typ a parametry procesoru. Dále aby se v souboru s výsledky nacházely výsledky jednotlivých provedených měření. Výsledek měření u sebe má informaci o jméně testovací metody, zpracované statistické údaje a naměřené hodnoty z různých módů a iterací měření. Konkrétní příklad toho, jak vypadají módy a iterace měření se nachází na obrázku 2.1. Názvy módů a iterací mají intuitivní názvy, takže je z nich poznat, kdy se ještě probíhá překlad, a kdy už se měří plně přeložený kód.

2.2.2 Výstup měření JMH

JMH je framework pro měření výkonu, který umožňuje pomocí anotací definovat výkonnostní testy pro programy v jazyce Java. Z průzkumu (Stefan a kol., 2017) vyplývá, že se jedná o nejpoužívanější framework pro měření výkonu pro projekty vyvíjené v jazyce Java.

JMH obdobně jako BenchmarkDotNet poskytuje výsledek měření jako tabulku na standardní výstup. Dále poskytuje výstup v podobě strojově zpracovatelných formátů, jako jsou například XML nebo JSON. O výstup v této podobě je nutné zažádat pomocí argumentů na příkazové řádce při spouštění měření. Další podrobnosti o frameworku JMH je možné nalézt v dokumentaci (Shipilëv, 2024).


```
{
    "jmhVersion" : "1.37",
    "benchmark" : "io.crate.types.StringTypeTest.booleanConversion",
    "mode" : "thrpt",
    "threads" : 1,
    "forks" : 5,
    "jvm" : "/usr/lib/jvm/java-21-openjdk-amd64/bin/java",
    "jvmArgs" : [
    ],
    "jdkVersion" : "21.0.1",
    "vmName" : "OpenJDK 64-Bit Server VM",
    "vmVersion" : "21.0.1+12-Ubuntu-222.04",
    "warmupIterations" : 5,
    "warmupTime" : "10 s",
    "warmupBatchSize" : 1,
    "measurementIterations" : 5,
    "measurementTime" : "10 s",
    "measurementBatchSize" : 1,
    "primaryMetric" : {
        "score" : 1.828893179607 3906E9,
        "scoreError" : 1.01653921742499 65E8,
        "scoreConfidence" : [
            1.727239257864891E9,
            1.9305471013498902E9
        ],
        "scorePercentiles" : {
            "0.0" : 1.4301278880934358E9,
            "50.0" : 1.8645360710333076E9,
            "90.0" : 1.936512837432647 5E9,
            "95.0" : 1.9403031190979056E9,
            "99.0" : 1.94167079732560 59E9,
            "99.9" : 1.94167079732560 59E9,
            "99.99" : 1.9416707973256059E9,
            "99.999" : 1.941670797325605 9E9,
            "99.9999" : 1.9416707973256059E9,
            "100.0" : 1.9416707973256059E9
        },
        "scoreUnit" : "ops/s",
        "rawData" : [
            [
                1.8554191503325295E9,
                1.8561380112017648E9,
                1.8560222540239005E9,
                1.8499319451317933E9,
                1.85752715931031 5E9
            ],
```


Obrázek 2.2: Struktura výsledků měření frameworku JMH

Ve výstupním souboru měření pomocí JMH lze nalézt informace o stroji na kterém probíhalo měření. Jedná se především o název stroje a verzi operačního systému. Dále zde lze nalézt verzi Javy, ve které probíhalo měření. V souboru je možné vidět také ostatní parametry měření, jako je zahřívací doba a počet zahřívacích iterací. Zahřívací iterace jsou zde uvedeny, protože Java je stejně jako C# jazyk kompilovaný metodou JIT. Je tedy nutné výstupní data vhodně filtrovat.

Jednotlivé naměřené hodnoty jsou ve výstupním souboru dostupné i ve výchozím nastavení JMH. Naměřené hodnoty nejsou bezrozměrná čísla, ale jsou doplněny i o fyzikální jednotku, kterou naměřená hodnota reprezentuje. Pro každý běh (fork), přičemž běhů může být v jednom spuštění JMH více, se objeví jedna sada měřených hodnot u položky `rawData`.

2.3 Použití statistických metod pro analýzu dat

Pro vyhodnocování výkonu je využito metod testování hypotéz. Ve statistickém testování hypotéz se snažíme zamítnout nulovou hypotézu. V případě zamítnutí nulové hypotézy se předpokládá, že platí alternativní hypotéza. Popis testování hypotéz v této kapitole se řídí skripty Pravděpodobnost a statistika 1 (Šámal, 2023).

Při testování hypotéz rozeznáváme chyby I. a II. druhu. Chyba I. druhu znamená, že jsme nulovou hypotézu zamítli, i když platí. Chyba II. druhu znamená, že jsme ji nezamítli, ale ona neplatí.

V našem případě porovnávání výkonu bude nulová hypotéza tvrzení, že výkon dvou verzí softwaru je stejný. Jako alternativní hypotézu budeme uvažovat, že výkony dvou verzí softwaru jsou různé. Pomocí metody testování hypotéz bude zjišťováno jestli mají dvě spojité náhodné veličiny stejnou střední hodnotu. Hodnoty spojité náhodné veličiny jsou vždy hodnoty výkonu jedné testované metody programu jedné z verzí. Pro každou z verzí je tedy uvažovaná jedna náhodná veličina. Pokud hodnoty těchto veličin mají stejnou střední hodnotu, tak budeme tvrdit, že i výkon obou porovnávaných verzí je stejný.

Chyba I. druhu tedy v našem případě znamená, že jsme prohlásili, že výkony dvou verzí jsou různé, ačkoli jsou stejné. Pravděpodobnost chyby I. druhu je obvyklý parametr statistického testu. Pravděpodobnost chyby I. druhu bude dále značen jako parametr α. Parametr α je součástí konfigurace systému PerfEval.

2.3.1 Welchův dvouvýběrový t-test

Welchův dvouvýběrový t-test se používá jako statistika při testování hypotéz. Tato statistika předpokládá, že náhodné veličiny jsou nezávislé a jejich rozdělení se blíží normálnímu rozdělení. Nezávislost náhodných veličin je dána vlastnostmi experimentu (Turčicová, 2021) a její zajištění je mimo doménu řešeného problému. PerfEval tedy v případě použití možnosti t-test možnou závislost zanedbává.

Normalitě náhodných veličin je možné se přiblížit díky centrální limitní větě (CLV). Se zajištěním normality nám pomůže samotná struktura naměřených výsledků. Výsledky měření obsahují běhy. Běhy obsahují jednotlivé naměřené hodnoty. Naměřené hodnoty představují vzorky náhodné veličiny. Pokud se budou v rámci t-testu namísto naměřených hodnot uvažovat průměry jednotlivých běhů, tak se podle CLV bude rozdělení těchto průměrů blížit normálnímu rozdělení.

Interval spolehlivosti pro Welchův t-test se spočítá podle následujícího algoritmu. V algoritmu jsou použité funkce, které odkazují na skutečně použité knihovní funkce. Funkce mean počítá střední hodnotu sady hodnot. Funkce var počítá rozptyl sady hodnot. TDistribution je třída, která reprezentuje T-rozdělení pro statistický test a parametr konstruktoru je počet stupňů volnosti. Vzorec pro stupně volnosti je dostupný na Wikipedii Welchova t-testu (Wikipedia contributors, 2023). Vstupními parametry jsou vzorky náhodných veličin a parametr α (critValue.)

Algorithm 1: WelchCI

```
Input: samples1, samples2, critValue
Output: lowerBound, upperBound
n1 = length(samples1);
n2 = length(samples2);
mean1 = mean(samples1);
mean2 = mean(samples2);
var1 = var(samples1);
var2 = var(samples2);
varOverN1 = var1 / n1;
varOverN2 = var2 / n2;
degreesOfFreedom = Math.Pow(varOverN1 + varOverN2, 2) /
 (varOverN1 * varOverN1 / (N1-1) + varOverN2 * varOverN2 / (N2-2));
tDist = new TDistribution(degreesOfFreedom);
tCrit = tDist.inverseCumulativeProbability(critValue / 2);
marginOfError = tCrit * Math.Sqrt(varOverN1 + varOverN2);
lowerBound = mean1 - mean2 - marginOfError;
upperBound = mean1 - mean2 + marginOfError;
```

Nakonec se již jen zkoumá, zdali tento interval obsahuje nulu. Pokud interval nulu neobsahuje, pak lze s pravděpodobností $1 - \alpha$ správně tvrdit, že nulová hypotéza neplatí.

2.3.2 Percentilový hierarchický bootstrap

Bootstrap je statistická metoda využívající tzv. resamplování. Stejně jako u dvouvýběrového t-testu se předpokládá nezávislost náhodných veličin. Podmínka nezávislosti bude zanedbána, protože ji není možné zaručit. Bootstrap se jako metoda používá v případě, kdy o náhodných veličinách není možné určit téměř žádné silné předpoklady. Díky této vlastnosti je bootstrap pro testování hypotéz o výkonu verzí softwaru použit.

Podle percentilového bootstrapu se interval spolehlivosti nalezne tak, že se hranice intervalu stanoví jako $\frac{\alpha}{2}$-tý a $\frac{1-\alpha}{2}$-tý percentil z resamplovaného souboru. Tyto dvě hodnoty budou představovat hranice intervalu.

Zkoumanou náhodnou veličinou je rozdíl dvou náhodných veličin. Tyto dvě náhodné veličiny jsou dány měřením výkonnosti dvou verzí softwaru. Nulová hypotéza, která je vyvracena, tvrdí, že obě veličiny mají stejnou střední hodnotu. Pokud tedy interval spolehlivosti neobsahuje nulu, tak můžeme nulovou hypotézu vyvrátit, protože s pravděpodobností $1 - \alpha$ o ní test správně prohlásil, že neplatí.

Algorithm 2: Bootstrap1D

```
Input: measurements, iterationCount
Output: bootstrappedSamples
n = length(measurements);
samples = [];
for i = 0; i < iterationCount; i += 1 do
    sum = 0;
    for j = 0; j < n; j = j + 1 do
        index = random() mod n;
        sum += measurements[index];
    samples.add(sum/n);
return samples;
```

Algorithm 3: Bootstrap2D

```
Input: runs1, runs2, iterationCount
Output: bootstrappedSamples
n = length(runs1);
m = length(runs2);
samples = [];
for i = 0; i < iterationCount; i += 1 do
    samples1 = [];
    for j = 0; j < n; j += 1 do
        index = random() mod n;
        samples1.add(Bootstrap1D(runs1[index], 1));
    samples2 = [];
    for k = 0; k < m; k += 1 do
        index = random() mod m;
        samples2.add(Bootstrap1D(runs2[index], 1));
    diff = mean(samples1)-mean(samples2);
    samples.add(diff);
return samples;
```

Naměřené vzorky však nejsou prostý statistický soubor. Jedná se o hierarchický soubor dat. Každé jedno měření se skládá z jednoho, nebo více běhů. Každý běh se skládá z jednoho, nebo více naměřených údajů. Vytváření bootstrapového statistického souboru tedy vypadá trochu odlišně.

Bootstrap2D ukazuje, jak vypadá výběr nového statistického souboru. Vyberou se náhodné běhy z jednotlivých výsledků měření. Z těchto běhů se získá 1D bootstrap. Novým prvkem vytvářeného statistického souboru se stane rozdíl těchto bootstrapů.

2.3.3 Co dělat v případě nevyvrácení hypotézy?

V případě nevyvrácení nulové hypotézy nám statistické testy nedávají žádnou informaci. Nicméně je stále nutné se rozhodnout, zdali nulová hypotéza platí. Je

nutné se ale stále vyvarovat chyby II. druhu. Proto v tomto případě budeme považovat nulovou hypotézu za platnou, pokud bude interval spolehlivosti dostatečně úzký. Pokud má tedy interval spolehlivosti dolní mez D_{LOW} a horní mez D_{HIGH}, pak je jeho šířka $D_{HIGH} - D_{LOW}$. Odhadovaný průměr by byl $\frac{D_{HIGH}+D_{LOW}}{2}$. Relativní šířka intervalu je tedy poměr šířky a průměru, tedy $\frac{2\cdot(D_{HIGH}-D_{LOW})}{D_{HIGH}+D_{LOW}}$.

V případě většího množství vzorků je možné zužovat interval spolehlivosti. Vztah mezi šířkou a počtem vzorků odpovídá $O(\frac{1}{\sqrt{n}})$, kde n je počet vzorků. Z daného množství vzorků je tedy možné odhadnout, kolik vzorků je ještě zapotřebí změřit.

V případě, že je interval dostatečně úzký, prohlásíme, že nulová hypotéza platí. V případě, že interval není dostatečně úzký, prohlásíme, že vzorků není dost.

PerfEval tedy v konečném důsledku rozlišuje tři základní výsledky porovnání výkonu verzí. Test končí s kladným výsledkem, pokud platí nulová hypotéze dle kritérií výše. Test končí s kladným výsledkem také když je nulová hypotéza vyvrácena, ale výkon novější verze je lepší. V ostatních případech test neprojde. Další dva možné výsledky testu tedy budou značit selhání. Druhý výsledek testu značí, že nulová hypotéza neplatí, a zároveň, že došlo ke zhoršení výkonu. Třetí výsledek značí, že se nulovou hypotézu nepodařilo vyvrátit, ale počet naměřených výsledků je příliš malý.

3. Systém PerfEval

3.1 Popis systému

S rozborem problematiky ve druhé kapitole je možné začít řešit programátorův problém s vyhodnocováním výkonu popsaný ve scénáři z první kapitoly. V důsledku toho je cílem vytvořit systém, který umožní porovnávat výsledky měření výkonu, a který bude možné používat v rámci průběžné integrace.

Když už jsou známy požadavky na aplikaci, tak je možné ji začít navrhovat. V této kapitole jsou popsané úvahy a rozhodnuté, které byly v průběhu vývoje provedeny. Tyto úvahy a rozhodnutí vedly k tomu, že vyvinutý systém PerfEval je konzolová aplikace, jejíž činnost je ovládaná příkazy a parametry na příkazové řádce. Příkazy umožňují inicializovat systém, přidávat nové výsledky měření a vyhodnocovat mezi sebou výsledky měření dvou verzí.

3.2 Rozbor alternativ v řešení

Při vývoji systému PerfEval došlo k několika rozhodnutím, které výrazně ovlivnily jeho fungování a architekturu. Nejdůležitější rozhodnutí, která byla v průběhu vývoje provedena, jsou v následujících částech podrobně vysvětlena.

3.2.1 Spouštění testů systémem PerfEval

V počátku vývoje bylo nutné se rozhodnout, jakým způsobem bude systém přijímat a zpracovávat výsledky testů. V úvahu přicházela varianta, že uživatel provede měření výkonu sám, a druhá varianta, že uživatel systému vysvětlí, jakým způsobem se testování výkonu spouští. Pokud by byla zvolena varianta, kdy PerfEval spouští testy sám, tak by bylo nutné nalézt dostatečně univerzální způsob spouštění testů.

Aplikace a benchmarky pro měření výkonu mohou být jak konzolové, tak grafické aplikace. Pokud by PerfEval měl měření provádět sám, tak by téměř určitě nebyl schopen pracovat s grafickými aplikacemi, ale byl by schopen spouštět programy s parametry na příkazové řádce.

Dále by bylo nutné vysvětlit, jak vypadá výstup spouštěných testů. Když pomineme formát, tak je nutné zjistit, kam program, který provádí měření výsledky ukládá. Benchmarkovací systém BenchmarkDotNet například vypisuje výsledky měření v podobě tabulky na standardní výstup a zároveň ukládá strojově čitelné výsledky do speciálního k tomu určeného adresáře.

Nakonec by to vypadalo tak, že při inicializaci systému uživatel zadá, jak spustit test výkonu a kam se uloží výsledek. Tímto způsobem by došlo k tomu, že PerfEval by začal určovat, jak mají vypadat programy, jejichž výstupy přijímá. Na druhou stranu použití stávajícího řešení tyto nevýhody nemá. Jediné, co musí uživatel zajistit, je, že jeho způsob měření zvládne uložit výsledek do souboru, který PerfEval umí zpracovat.

Stávající řešení je tedy složitější v tom, že uživatel musí testování výkonu spouštět sám. Poté, co spustí testování výkonu a dostane soubor s výsledky, jej přidá do databáze výsledků systému PerfEval a poté spustí PerfEval s příkazem

evaluate pro porovnání výsledků testování výkonu. Kdyby se použila varianta s tím, že si PerfEval spouští testy sám, tak by uživatel testování a porovnání výkonu zvládl jedním spuštěním aplikace.

3.2.2 Použité statistické metody

Pro porovnání dvou výsledků měření se používají statistické metody. Statistické metody se používají ke zjištění, jestli výsledky měření považované za náhodné veličiny mají stejné rozdělení, popřípadě jestli je vzorků dostatečné množství. V systému PerfEval jsou implementovány statistické metody bootstrap a t-test.

Pomocí bootstrapu dochází k iluzi, že vzorků je mnohem více, než je jich ve skutečnosti změřeno. Protože měření vzorků je samo o sobě dlouhotrvající proces, tak se použití této statistické metody vyplatí. Bootstrap má ale tu nevýhodu, že jeho výpočet může oproti prostému zkoumání vzorků trvat delší dobu.

t-test je tedy možné zvolit namísto bootstrapu kvůli tomu, že je rychlejší. Oproti náhodnému vybírání vzorků z dvoudimenzionální sady dat, kterým vzorky odpovídají, dochází k pouhému dosazení hodnot do vzorce.

Uživatel by se tedy při volbě testu měl rozhodovat na základě toho kolik má změřených vzorků a kolik má času na porovnání výsledků měření. Pokud má uživatel naměřených vzorků málo a větší množství času k vyhodnocení doporučuje se použít bootstrap. Pokud má uživatel větší množství vzorků a málo času je pro něho lepší použít t-test.

3.2.3 Rozpoznání formátu výsledků měření

Systém, který porovnává výsledky měření výkonu, by měl mít informace o tom v jakém formátu jsou data uložena a který benchmarkovací framework je vytvořil. Podle použitého frameworku a formátu je totiž možné výsledky měření zpracovat pomocí programu a transformovat data o měření tak, aby jim systém rozuměl. Problém je tedy jak se systém dozví o tomto formátu a o použitém frameworku.

Nejpříjemnější řešení pro uživatele by bylo, že by systém sám přišel na to, který framework a formát je použitý. Uživatel by totiž nemusel vědět pomocí jakého frameworku a v jakém formátu data ukládá. Pro systém by však mohl být problém různé frameworky rozlišit.

Při rozlišování by se totiž musel podívat do dat uložených v souboru a na základě obsahu určit o jaký formát a framework se jedná. Správné určení frameworku a formátu by bylo zásadní pro správnou reprezentaci dat. Samotné rozlišování frameworků a formátu by bylo obtížné, protože soubory s výsledky měření obsahují podobná data a položky, ale hierarchie struktur ve kterých jsou uloženy jsou různé. Při následném rozlišování většího množství formátů a frameworků by tedy systém automatického rozpoznávání začal být příliš komplikovaný, aby si zachoval přesnost.

Docházelo by také k dvojímu čtení souboru z paměti. První čtení souboru by sloužilo k rozpoznání formátu, aby systém zjistil, jak má data ze souboru zpracovávat. Při druhém čtení souboru by již transformoval data tak, aby jim rozuměla vyhodnocovací část systému.

PerfEval tedy řeší tento problém tak, že uživatel při inicializaci zadá jméno jednoho z dostupných parserů. Předpokládá se tedy, že pokud uživatel používá výkonnostní testy, tak framework a výstupní formát je shodný. Pokud má PerfEval parser pro tento framework a formát dat parser, pak je schopný vyhodnocovat výsledky měření. V opačném případě si tento parser může uživatel doimplementovat.

Tento přístup umožňuje snazší implementaci nových parserů. Není totiž nutné k těmto parserům implementovat také sadu pravidel, kdy má být použitý. Uživatele tento přístup omezuje v tom, že musí znát framework a formát ve kterém se výsledky měření nachází. Protože psaní výkonnostních testů není jednoduché, tak lze předpokládat, že uživatel je dostatečně zkušený, aby tuto znalost měl.

3.2.4 Kdy zpracovávat naměřená data?

Systém musí v některém bodě výpočtu zpracovat data z měření. Existuje několik možností, kdy je možné toto zpracování do formátu, kterému bude rozumět, udělat. Je možné buď zpracovat data ihned po tom, co se systém dozví o jejich existenci, nebo až těsně před vyhodnocováním.

Pokud by se data zpracovávala hned po tom, co se o nich systém dozví, tak to nutně neznamená, že již má proběhnout vyhodnocování. Je tedy nutné zvolit nějaký formát do kterého zpracovaná data uložit. Při vyhodnocení by se pak data z tohoto formátu musela opět zpracovat. Tento způsob zpracování dat by měl význam pouze v případě, že by první předzpracování vedlo k velkému zrychlení druhého zpracování. Zároveň by toto řešení vedlo k dvojímu ukládání dat, protože by někde byl uložený původní výsledek měření v původním formátu, a také soubor se předzpracovanými výsledky měření, který by obsahoval data se stejným významem.

Výše zmíněné nevýhody vedly k tomu, že systém zpracovává data z původního formátu těsně před vyhodnocováním. Podle zvoleného parseru se tedy data naparsují těsně před vyhodnocením ze souborů, které vygeneroval přímo framework pro měření výkonu.

3.2.5 Jak přistupovat k naměřeným datům?

Systém, který porovnává výsledky měření, by měl mít nějaké informace o tom, k jaké verzi se měření vztahuje, nebo kde se soubor s výsledky nachází. Proto bylo při vývoji nutné se zamyslet nad tím, jakými způsoby lze tyto informace získat a spravovat. Systém PerfEval potřebuje o výsledcích měření vědět, kde jsou uloženy a ke které verzi softwaru bylo měření provedeno.

První zvažovaná varianta byla, že by existovala složka, do které by uživatel vkládal výsledky měření do adresáře určeného systémem PerfEval, nebo do adresáře zadaného při inicializaci systému. Po každém měření by tedy uživatel výsledek pouze vložil do správné složky a o nic víc by se nemusel starat.

Toto řešení má několik nevýhod. Omezuje uživatele v tom, jak musí výsledky testů ukládat. Dále by se špatně určovalo, ke které verzi bylo měření provedeno, protože toto se ve výsledcích měření běžnými frameworky neudává. Pravděpodobně by proto vznikla hierarchie v tomto adresáři a uživatel by například pomocí pojmenovávání složek určoval, ke které verzi se měření vztahuje.

Celkově tedy tento způsob poskytuje jednoduché zjištění, kde se výsledek testu nachází. Je to pevně dané. Není ale možné jednoduše zjistit verzi, protože je nutné projít adresářovou strukturu, což může být při velkém množství dat pomalé.

Druhé uvažované řešení bylo vylepšení prvního řešení o cache a sledování času modifikace adresářů. Verze se totiž dobře určují, ale špatně dohledávají. Nicméně by se pravděpodobně používání některých verzí k porovnání opakovalo častěji než u jiných. Zároveň pokud by nejnovější verze nebyla v cache, tak by se dohledávala na základě nejmladšího data změny adresáře v adresáři s výsledky měření. Cache by byla tvořena posledními několika desítkami záznamů s cestou k výsledkům měření a verzí.

Toto řešení má ale podobné nevýhody jako první. V případě, že se verze porovnává poprvé, tak záznamy o ní jistě nejsou v cache a musí se prohledat adresářová struktura. Pokud je poslední úprava cache starší než nejnovější úprava nějakého podadresáře v adresáři s výsledky měření, tak je nutné tuto část adresářové struktury projít. V procházené části adresářové struktury je vždy nutné prozkoumat zdali se jedná o soubor verze, která je v cache, a tak by se do ní měl přidat záznam o tomto souboru. Popsaná práce s cache měla za následek poslední uvažované řešení, kde již nezáleží na tom, kde jsou uložené výsledky měření. Jediné, co budeme předpokládat, je, že uživatel soubory s výsledky měření nepřesouvá.

Poslední uvažované řešení je strukturované ukládání metadat o výsledcích měření. Využije se databáze o jedné tabulce, kde je uvedena cesta k výsledku měření a verze ke které byl výsledek změřen. Uživatel do systému nahlásí, že má nový výsledek měření, kde je uložen, a k jaké verzi softwaru je měření provedeno. Systém si tato data pouze poznamená do databáze. Při vyhodnocení pak pomocí databázových dotazů nalezen snadno všechny soubory s výsledky měření k potřebné verzi.

Toto řešení poskytuje jak rychlé vkládání nových výsledků, tak rychlé vyhledávání výsledků měření k dané verzi.

3.2.6 Formát výstupu

Při volbě formátu v jakém se budou výsledky výkonnostních testů prezentovat je nutné se zamyslet nad tím, kdo je bude číst a zpracovávat. Výsledky vyhodnocení bude zpracovávat zejména člověk a průběžná integrace v rámci verzovacího nástroje Git.

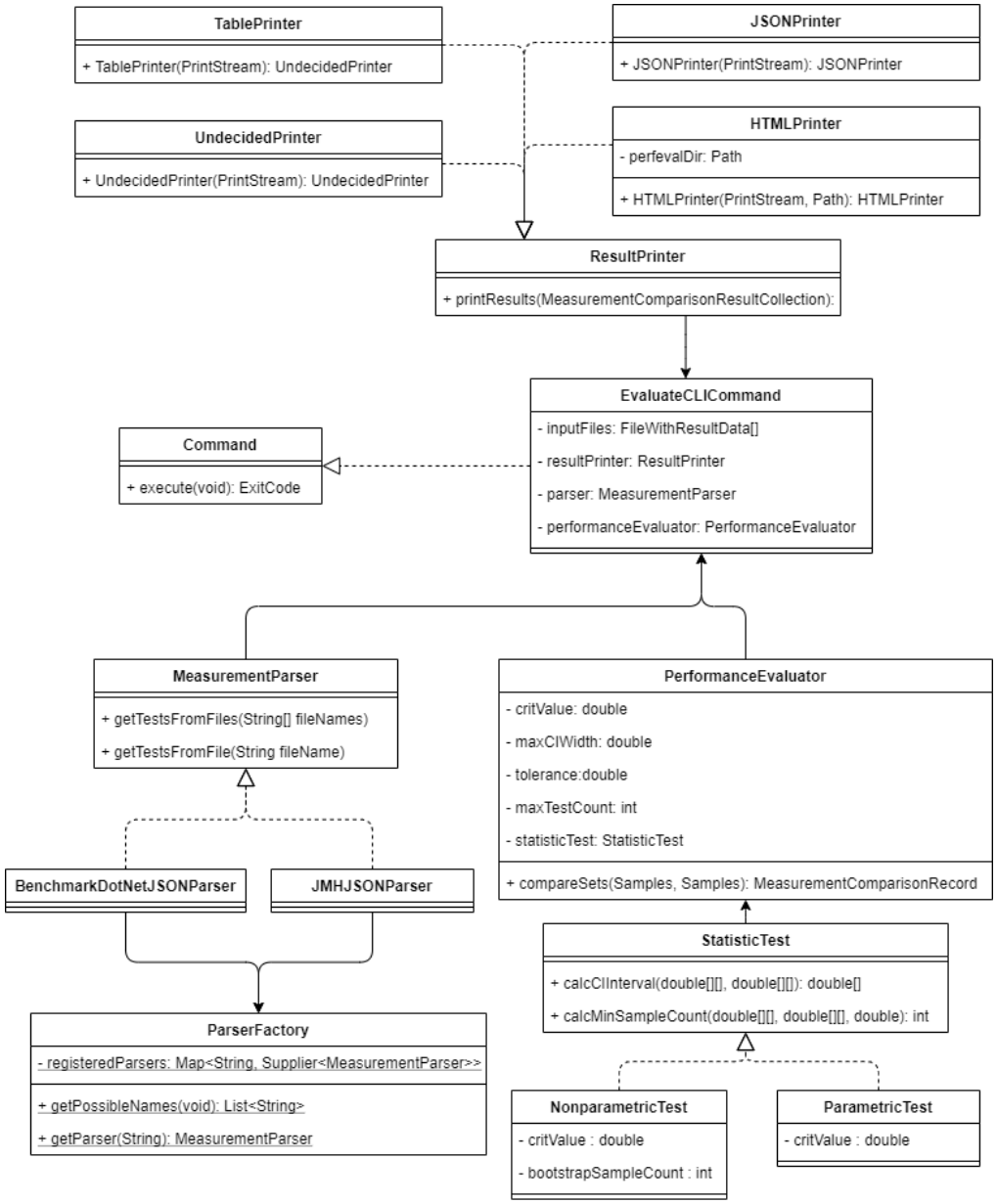
Pro člověka je čitelný formát zpracovaných dat tabulka s údaji o tom, který test prošel a který ne. Jeden z výstupních formátu systému PerfEval je takováto tabulka na příkazové řádce.

3.3 Architektura systému PerfEval

3.3.1 Průběh vyhodnocování

Na následujícím obrázku je k vidění architektura části systému kolem třídy EvaluateCLICommand, která zajišťuje průběh vyhodnocování testů výkonu.

Po zpracování příkazové řádky dostane instance EvaluateCLICommand informace o souborech se kterými bude pracovat. Při konstrukci dostane správné



Obrázek 3.1: Objektový návrh části PerfEvalu pro porovnávání výsledků měření

implementace ResultPrinter, MeasurementParser a instanci třídy PerformanceEvaluator se správnou instancí StatisticTest.

Hlavní funkcionalitu pro vyhodnocování poskytuje třída EvaluateCLICommand. Celý úkol vyhodnocování výkonu byl rozdělen do tří oddělených kroků.

Jako první dojde k naparsování výsledků měření dvou porovnávaných verzí. Parsování probíhá pomocí implementace rozhraní MeasurementParser, který umí naparsovat potřebný formát výsledků měření, které se budou porovnávat. Výsledkem parsování vzniknou dvě instance třídy Samples, která reprezentuje vzorky výsledků měření.

Následně se tyto dvě instance porovnají pomocí metody compareSets na třídě PerformanceEvaluator. Instance třídy PerformanceEvaluator k porovnání dvou instancí Samples využívá implementace rozhraní StatisticTest. Konkrétně tato implementace rozhoduje o tom, jaký statistický test se při porovnávání vzorků

použije.

Statistický test, který implementuje rozhraní StatisticTest, musí mít metody calcCIInterval a calcMinSampleCount. Metoda calcCIInterval vrací intervalový odhad rozdílu náhodných veličin, které jsou reprezentovány konkrétními naměřenými vzorky.

Pokud tento interval neobsahuje nulu, pak lze s požadovanou přesností a pravděpodobností usuzovat, že rozdělení náhodných veličin jsou různá. Pokud jsou rozdělení různá, pak se jako kladný výsledek testu připouští zlepšení výkonu, nebo pokud je nový průměr v dané toleranci.

Pokud interval obsahuje nulu, tak je vyhodnocení výsledku testu výkonu složitější. Pokud je interval spolehlivosti dostatečně úzký, tak považujeme rozdělení náhodných veličin za stejná a test výkonu dopadl kladně. Pokud interval spolehlivosti není dostatečně úzký, tak test výkonu neprošel. Následně se pomocí metody calcMinSampleCount určí kolik měření by bylo potřeba, aby byl interval spolehlivosti dostatečně úzký. Spočtený počet vzorků s informací o tom, zdali je, nebo není možné je změřit, bude přidán k výsledkům porovnávání.

Posledním krokem při vyhodnocování je zavolání metody printResults na implementaci rozhraní ResultPrinter. Tato metoda vypíše instanci MeasurementComparisonResultCollection, která reprezentuje všechny výsledky jednotlivých testů výkonu. Po vypsání výsledků požadovaným způsobem dle dodané implementace ResultPrinter se nastaví správný exit kód. V případě, že všechny testy dopadly kladně, pak bude exit kód 0. V případě, že alespoň v jednom případě došlo ke zhoršení, pak bude exit kód 1. V případě, že dojde k nějaké výjimce, tak exit kód bude větší než 100. Touto výjimkou může být například neexistence některého ze souborů s naměřenými výsledky v důsledku jeho smazání, nebo přesunutí.

3.3.2 Inicializace systému PerfEval

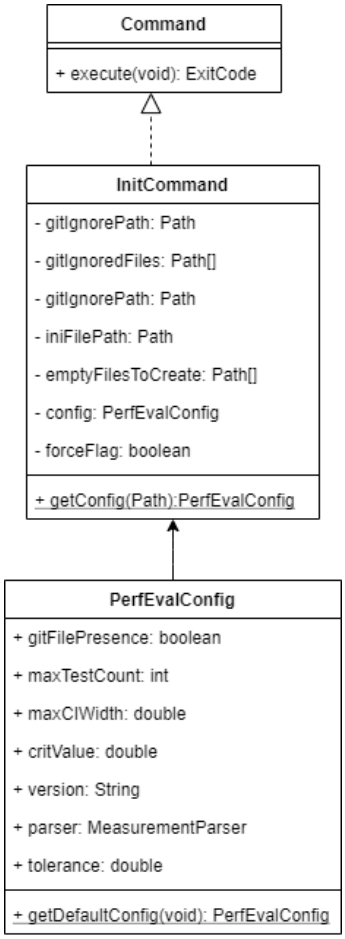
Před použitím systému PerfEval k vyhodnocování je nutné jej inicializovat. Inicializace umí rozpoznat zdali se nachází v kořenovém adresáři Git repozitáře. Rozpoznávání probíhá tak, že se hledá soubor s názvem .git.

Inicializace probíhá tak, že se zjistí přítomnost .git souboru. Z příkazové řádky se zjistí jaký parser (implementace třídy MeasurementParser) pro naměřené hodnoty se bude používat. Vyrobí výchozí konfigurace. Do výchozí konfigurace se dodají informace o git repositáři a o parseru. Nakonec se vyrobí složka se v adresáři, kde uživatel program spustil vyrobí složka .performance a v ní soubory .gitignore a config.ini. Soubor config.ini obsahuje konfiguraci systému PerfEval pro jeden projekt jehož výkon mezi verzemi se bude porovnávat.

Z obrázku je patrné, že třída InitCommand úzce spolupracuje s třídou PerfEvalConfig. Třída PerfEvalConfig reprezentuje obsah souboru config.ini. Provedení metody execute na třídě InitCommand provede inicializaci systému PerfEval výše zmíněným způsobem.

3.3.3 Přidávání nových výsledků testů

Uživatel musí každý výsledek měření výkonu zaznamenat do systému PerfEval. Pokud výsledek měření zaznamenán, nebude s ním PerfEval vůbec pracovat.

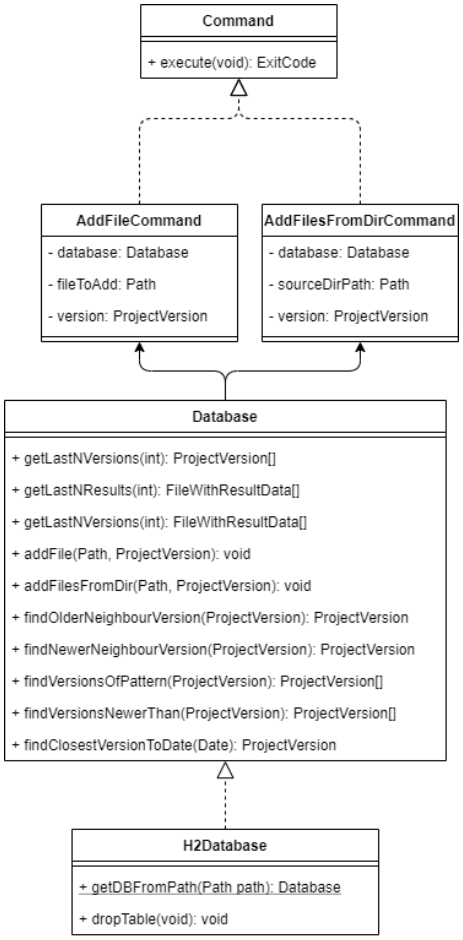


Obrázek 3.2: Objektový návrh části PerfEvalu pro inicializaci

Přidávat je možné soubory samostatně, nebo z adresáře. Při přidávání souborů z adresáře budou přidány všechny soubory a to i soubory zanořené ve vnitřních adresářích zadaného adresáře.

Na obrázku je vidět, že za oběma příkazy pro přidávání výsledků měření stojí jedna implementace rozhraní Database. Jediná existující implementace tohoto rozhraní využívá technologie H2 databáze. Jedná se o technologii, která umožňuje vést si databázi lokálně v rámci souboru a pokládat na ní klasické SQL dotazy.

Implementace rozhraní Database pomocí technologie H2 je třída H2Database. V rámci databáze pro jeden projekt, který PerfEval spravuje jsou lokální soubory pro H2 databázi uloženy v adresáři .performance. Databáze pro správu dat o výsledcích měření má jen jednu tabulku. V této tabulce jsou informace o cestě k souboru a informace o verzi.



Obrázek 3.3: Objektový návrh části PerfEvalu pro přidávání výsledků měření

4. Uživatelská dokumentace systému PerfEval

4.1 Instalace

Instalace systému PerfEval probíhá pomocí nástroje gradle. V adresáři se zdrojovým kódem se nachází spustitelný soubor `gradlew`, který je určen pro kompilaci a sestavení PerfEvalu v systémech Linux. Pro kompilaci a sestavení v systémech Windows je určený spustitelný soubor `gradlew.bat`.

Po kompilaci a sestavení pomocí zmíněných souborů vznikne soubor typu JAR v podadresáři `build/libs`. Soubor je možné spustit pomocí příkazu `java -jar PerfEval.jar`, nebo pomocí připravených skriptů `perfeval.sh` pro systémy Linux a `perfeval.bat` pro systémy Windows.

4.2 Dostupné příkazy

Tato část práce se zabývá jednotlivými příkazy systému PerfEval a jejich parametry. V jednotlivých podkapitolách je vysvětleno, k čemu se daný příkaz používá. V podkapitolách se nachází také informace o volitelných a povinných parametrech jednotlivých příkazů.

4.2.1 Příkaz init

Příkaz init slouží k inicializaci systému v rámci aktuálního pracovního adresáře. Systém PerfEval po spuštění hledá v pracovním adresáři složku s názvem .performance. Pokud složka není nalezena a nebyl zadán příkaz init, končí s chybou, že systém není inicializovaný.

Povinné argumenty:

`benchmark-parser` Nastavení parseru, který se bude pro tento projekt používat. Jméno parseru je zadávané jako parametr tohoto příznaku. Parser se volí podle použitého testovacího frameworku a výstupního formátu. Jedná se o jediný parametr konfiguračního souboru, který lze zadat při inicializaci. Důvodem je, že je to jediný konfigurační parametr, jehož hodnotu není možné nastavit nějakým výchozím způsobem. Určuje totiž podobu a formát vstupních dat, které PerfEval očekává.

Volitelné argumenty:

`force` Příznak, který vynutí inicializaci i v případě, že je systém v adresáři již inicializovaný.

4.2.2 Příkaz index-new-result

Příkaz index-new-result slouží k přidání výsledků měření výkonu do databáze. Databáze je pro každý projekt zvlášť a je tedy možné na jednom zařízení systémem PerfEval spravovat více projektů. Při přidávání informací o souboru s výsledky je nutné zadat cestu k tomuto souboru. Verze, ke které byly výsledky změřeny, může být zadaná také, nebo ji systém zkusí určit podle git repozitáře.

Povinné argumenty:

`path` Parametr tohoto příznaku udává cestu k souboru s výsledky měření.

Volitelné argumenty:

`version` Parametr tohoto příznaku udává textovou reprezentaci verze SW, která se měřila.

`tag` Parametr tohoto příznaku udává tag verze měření.

4.2.3 Příkaz index-all-results

Příkaz index-all-results slouží k přidání více výsledků měření výkonu do databáze. Při přidávání informací o souborech s výsledky je nutné zadat cestu k adresáři s těmito výsledky. Budou přidány všechny (i zanořené) soubory v tomto adresáři. Verze, ke které byly výsledky změřeny, může být zadaná také, nebo ji systém zkusí odhadnout podle git repozitáře.

Povinné argumenty:

`path` Parametr tohoto příznaku udává cestu k adresáři s výsledky měření.

Volitelné argumenty:

`version` Parametr tohoto příznaku udává textovou reprezentaci verze SW, která se měřila.

`tag` Parametr tohoto příznaku udává tag verze měření.

4.2.4 Příkaz evaluate

Příkaz evaluate porovnává dvě poslední zaznamenané verze, které byly změřeny. Verze k porovnání je možné specifikovat také manuálně pomocí příznaků. Výstupem je tabulka nebo JSON s výsledky porovnání. V případě, že alespoň u jednoho porovnání došlo ke zhoršení výkonu, bude selhání signalizováno exit kódem 1.

Volitelné argumenty:

`new-version` Parametr udává textovou reprezentaci verze, která se má při porovnání považovat za novější.

`new-tag` Pouze soubory s tímto tagem budou použity k porovnání jako novější.

`old-version` Parametr udává textovou reprezentaci verze, která se má při porovnání považovat za starší.

`old-tag` Pouze soubory s tímto tagem budou použity k porovnání jako starší.

`t-test` T-test bude při statistickém porovnání použitý místo bootstrapu.

`json-output` Formát výstupu bude JSON.

`html-output` Výstup bude ve formátu HTML stránky.

`html-template` Při použití příznaku html-output je možné ještě jako argument tohoto příznaku dodat adresu nové HTML šablony pro vypsání výsledků.

`junit-xml-output` Výstup bude ve formátu JUNIT XML. Tento formát je běžně přijímaný nástrojem Git v rámci průběžné integrace.

4.2.5 Příkaz list-undecided

Příkaz list-undecided porovnává dvě poslední zaznamenané verze, které byly změřeny. Verze k porovnání je možné specifikovat také manuálně pomocí příznaků. Výstupem jsou dva sloupce oddělené znakem tabulátoru. V prvním sloupci je název testovací metody. Ve druhém sloupci je počet měření, které jsou potřeba, aby bylo možné s dostatečnou pravděpodobností říct, že je výkon stejný.

Volitelné argumenty:

`new-version` Parametr udává textovou reprezentaci verze, která se má při porovnání považovat za novější.

`new-tag` Pouze soubory s tímto tagem budou použity k porovnání jako novější.

`old-version` Parametr udává textovou reprezentaci verze, která se má při porovnání považovat za starší.

`old-tag` Pouze soubory s tímto tagem budou použity k porovnání jako starší.

`t-test` T-test bude při statistickém porovnání použitý místo bootstrapu.

4.2.6 Příkaz list-results

Příkaz list-results vypíše informace o souborech uložených v databázi. Příkaz nemá žádné argumenty. Výstupní formát je tabulka s informacemi o souborech. Poskytuje jednoduchý přehled o souborech v databázi PerfEvalu.

4.3 Konfigurační soubor

Po spuštění systému PerfEval s příkazem init dojde k vytvoření složky .performance v pracovním adresáři. Ve vytvořené složce bude konfigurační soubor config.ini. Tento soubor obsahuje nastavení spojené s používáním systému PerfEval při vyhodnocování výkonu jednoho projektu. Změnou hodnot v konfiguračním souboru je možné omezeně změnit chování systému PerfEval.

Hodnoty v konfiguračním souboru

`falseAlarmProbability` Určuje pravděpodobnost chyby I. druhu při testování hypotézy, že výkony verzí jsou stejné.

`accuracy` Určuje maximální relativní šířku intervalu spolehlivosti

`minTestCount` Určuje minimální počet testů (běhů), který bude dodán.

`maxTestCount` Určuje maximální počet testů (běhů), který je uživatel schopný změřit.

`tolerance` Určuje maximální pokles výkonu (relativně vůči starší verzi), který nezpůsobí selhání.

`git` Určuje, jestli projekt podléhá správě verzí pomocí nástroje git. Nabývá hodnot TRUE a FALSE.

`parserName` Jméno parseru, který bude použit při zpracovávání souborů s výsledky měření.

`highDemandOfRuns` Určuje, jestli má PerfEval hlásit, že je zapotřebí vyšší počet běhů, než udává maxTestCount. Nabývá hodnot TRUE a FALSE.

`improvedPerformance` Určuje, jestli má PerfEval hlásit, že výkon novější verze je lepší.

5. Programátorská dokumentace systému PerfEval

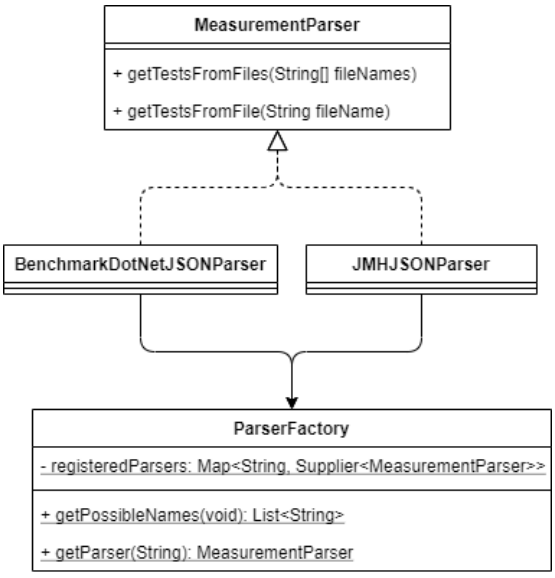
5.1 Architektura systému

Architekturu systému PerfEval je možné rozdělit do dvou částí. První část systému tvoří parser příkazové řádky a tzv. setup třídy. Druhou částí jsou tzv. command třídy, které provádí skutečně požadovanou činnost. V této části dokumentace nemusí být některé podrobnosti o implementaci, které je možné najít v automaticky generované dokumentaci JavaDoc. Jedná se například o argumenty zmiňovaných metod.

Vnitřní struktura běhu je velice jednoduchá. Metoda `main` má tři jednoduché úkoly. Zavolat metodu `getCommand` na třídě `Parser`. Tato metoda vrátí objekt typu `Command`, na kterém metoda `main` zavolá metodu `execute`. Metoda `execute` při návratu vrací enumerátor typu `ExitCode`. Na objektu `ExitCode` pak na konci metoda `main` zavolá metodu `exit`, která ukončuje program s požadovaným exit kódem. Metody `getCommand` a `execute` mohou skončit s výjimkami `ParserException` a `PerfEvalCommandFailedException`. Pro tyto případy tyto výjimky obsahují položku `exitCode`, na které metoda `main` opět zavolá metodu `exit`.

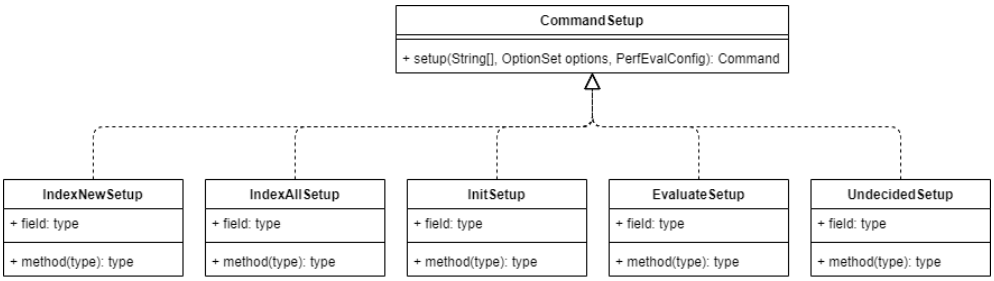
5.1.1 Použité návrhové vzory

Součástí architektury systému PerfEval je několik běžných návrhových vzorů. Prvním z použitých návrhových vzorů je factory. Factory je použitý při práci s parsery vstupních souborů. Factory třídou podle tohoto návrhového vzoru je zde třída `ParserFactory`. Tato třída konstruuje parsery podle parametru metody `getParser`.



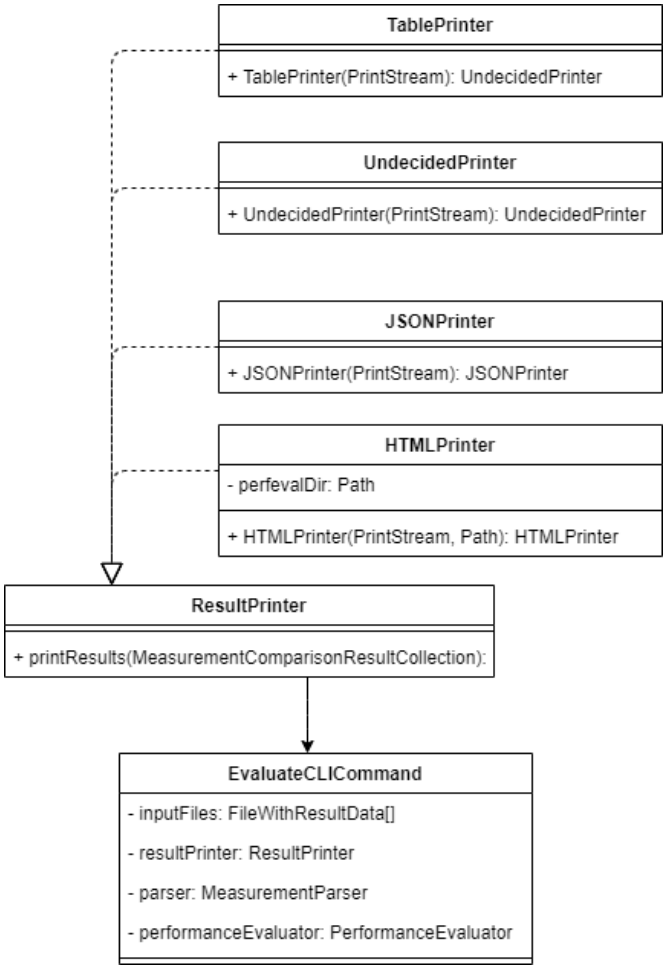
Obrázek 5.1: Struktura části PerfEvalu - návrhový vzor factory

Druhým použitým návrhovým vzorem je builder. Jednotlivé builder třídy jsou implementacemi rozhraní `CommandSetup`. Tyto builder třídy v rámci systému PerfEval v rámci metody setup konstruují objekt typu `Command`.



Obrázek 5.2: Struktura části PerfEvalu - návrhový vzor builder

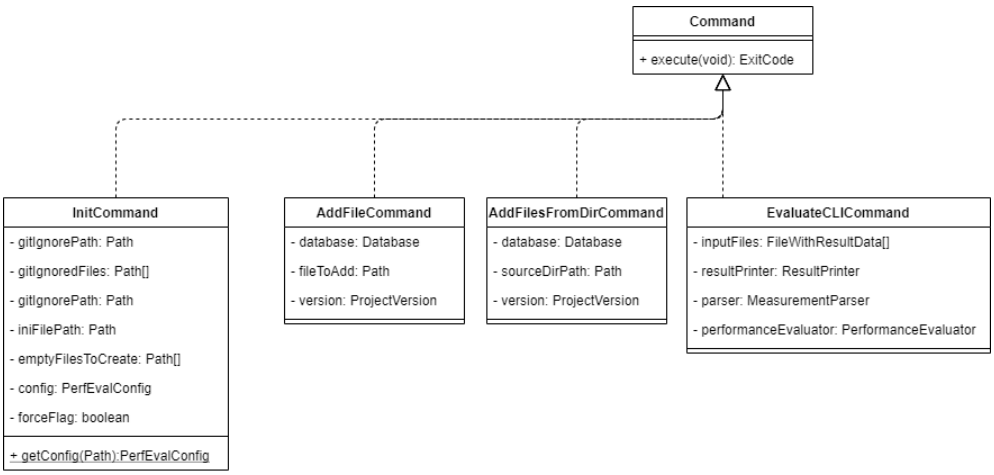
Dalším použitým návrhovým vzorem je strategy. Tento návrhový vzor je využitý při volbě statistického testu, který se bude používat pro vyhodnocení, a pro volbu toho, jakou podobu výstupu má program vyrobit. Na obrázku s příkladem tříd jsou vidět jednotlivé strategie pro volbu formy výstupu.



Obrázek 5.3: Struktura části PerfEvalu - návrhový vzor strategy

Posledním použitým návrhovým vzorem je návrhový vzor command. Protože je PerfEval konzolová aplikace ovládaná pomocí příkazů, tak je příhodné jej použít. Na obrázku jsou vidět dostupné implementace rozhraní `Command`. Pro každý

z příkazů systému PerfEvalu se zkonstruuje nějaká jeho implementace a na ní se zavolá její metoda `execute`.



Obrázek 5.4: Struktura části PerfEvalu - návrhový vzor command

5.1.2 Parser a setup třídy

Třídu `Parser` tvoří slovník `commandPerSetup` a metoda `getCommand`. Ve slovníku jsou k jednotlivým řetězcovým klíčům přiřazeny objekty typu `Supplier`, které mají za úkol vracet instance typu `CommandSetup`. Klíče jsou skutečné řetězce zadávané uživatelem. `Parser` pak na základě příkazu zadaného na příkazové řádce zkonstruuje skrze `Supplier` získaný ze slovníku správnou instanci třídy `CommandSetup`. Na této instanci se zavolá metoda `setup`, která vrací objekt typu `Command`, podle definice rozhraní `CommandSetup`. Metoda `getCommand` je volaná z metody `main`, která tvoří hlavní metodu programu.

Třída `Parser` předává do metody `setup` objekty `OptionSet`, které reprezentují argumenty příkazové řádky, a `PerfEvalConfig`. Třída `PerfEvalConfig` reprezentuje globální konfiguraci systému PerfEval podle konfiguračního souboru. `Parser` tedy skrze statické metody této třídy zařídí přečtení konfiguračního souboru do objektu `PerfEvalConfig`. Objekt `OptionSet` reprezentuje parametry a značky zadané uživatelem na příkazovou řádku. Jedná se o objekt z knihovny joptsimple. Rozpoznávány jsou všechny značky blíže specifikované ve třídě `SetupUtilities`.

`SetupUtilities` je třída obsahující statické položky a řetězcové konstanty. Tyto položky a konstanty slouží pro zpracování argumentů příkazové řádky. Setup třídy a `Parser` využívají jednotlivé metody této třídy. Protože některé setup třídy využívají stejných metod ze třídy `SetupUtilities`, tak jsou tyto metody umístěny právě ve třídě `SetupUtilities`.

`InitSetup` je třída, která má za úkol připravit instanci `InitCommand`. Protože se jedná o setup třídu, tak připravuje data pro práci instance typu `Command`, který konstruuje. Poté, co v rámci metody `setup` připraví potřebná data zkonstruuje `InitCommand` a vrátí jej. Tímto je `InitCommand` připraven k práci.

`IndexNewSetup` je třída pro přípravu instance `AddFileCommand`. Tato setup třída dodává při konstrukci instance `AddFileCommand` cestu k přidávanému souboru, implementaci rozhraní `Database` a instanci objektu `ProjectVersion`. Instance objektu `ProjectVersion` popisuje verzi softwaru pro kterou byl nově při-

dávaný výsledek změřen. Zkonstruovanou instanci třídy `AddFileCommand` vrací metoda `setup`.

`IndexAllSetup` je třída pro přípravu instance `AddFilesFromDirCommand`. Té je při konstrukci dodána implementace rozhraní `Database`, cesta ke složce, ze které se budou přidávat soubory, a instance objektu `ProjectVersion`. Instance objektu `ProjectVersion` popisuje verzi softwaru pro kterou byly nově přidávané výsledky změřeny. Zkonstruovanou instanci třídy `AddFilesFromDirCommand` vrací metoda `setup`.

`EvaluateSetup` je třída která připravuje `EvaluateCLICommand`. Tato setup třída musí v databázi najít soubory s výsledky měření, které bude konstruovaný `EvaluateCLICommand` porovnávat. Dále vyrábí správné implementace rozhraní `StatisticTest` a `ResultPrinter`, podle argumentů z příkazové řádky. `EvaluateSetup` musí vyrobit také instanci objektu `PerformanceEvaluator`. Tuto instanci vyrobí z nastavení v objektu `PerfEvalConfig` a ze zmíněné implementace `StatisticTest`. `EvaluateCLICommand` je zkonstruovaný z vyrobených instancí `PerformanceEvaluator`u, `ResultPrinter`u, `MeasurementParser`u a vstupních souborů s výsledky. `MeasurementParser` je součástí objektu `PerfEvalConfig`.

`UndecidedSetup` konstruuje `EvaluateCLICommand` způsobem z předchozího odstavce. Jediný rozdíl je, že se použije pevně stanovený `ResultPrinter` typu `UndecidedPrinter`. Tato implementace `CommandSetup` vznikla proto, aby se vypsání informace o nerozhodných testech vypisovala pomocí odlišného příkazu.

Třída `ListResultsSetup` připravuje instanci `ListResultsCommand`. Jediná činnost metody setup spočívá ve vyrobení instance rozhraní `Database`. Tuto instanci předá konstruktoru třídy `ListResultsCommand`. Vyrobenou instanci třídy `ListResultsCommand` vrací.

5.1.3 Command třídy

V této podkapitole je popsaný význam a práce jednotlivých implementací rozhraní Command. Implementace třídy Command musejí mít implementovanou jedinou metodu `execute`.

Třída AddFileCommand má za úkol přidat nový výsledek měření do databáze. Vnitřní položky třídy jsou fileToAdd, `database` a version. Metoda `execute` tedy volá metodu addFile na dodané implementaci databáze. Předávané parametry jsou fileToAdd a version.

Třída `AddFilesFromDirCommand` má za úkol přidat všechny výsledky měření ve složce do databáze. Vnitřní položky třídy jsou sourceDirPath, `database` a version. Metoda `execute` tedy volá metodu addFilesFromDir na dodané implementaci databáze. Předávané parametry jsou sourceDirPath a version.

Třída `InitCommand` má za úkol v adresáři, odkud byl PerfEval z příkazové řádky spuštěn, inicializovat systém PerfEval. Inicializace systému PerfEval probíhá v několika krocích. Nejprve se vytvoří adresář .performance. Následně se do .gitignore (v případě neexistence bude vytvořen) souboru doplní ignorace souborů a adresářů systému PerfEval. Nakonec je z parametrů dodaných při konstrukci a z výchozích parametrů vytvořen konfigurační soubor config.ini. V případě, že systém je v adresáři již inicializovaný a nebyl dodán příznak násilné inicializace, tak systém nebude inicializovaný.

Třída `EvaluateCLICommand` má za úkol porovnat výsledky měření výkonu

dvou různých verzí. Soubory s výsledky dvou verzí a parser k nim jsou dodané při konstrukci. Při konstrukci je dodaná implementace rozhraní `StatisticTest`. Zmíněná instance slouží ke statistickému porovnání výsledků měření. Při konstrukci je dále dodaná implementace rozhraní `ResultPrinter`. Implementace tohoto rozhraní rozhoduje o tom, jakým způsobem budou prezentovány výsledky porovnání. Třída v rámci volání metody `execute` nechá naparsovat soubory s výsledky měření do objektů typu `Samples`. Seznamy těchto objektů nechá porovnat pomocí statistického testu. Výsledkem je objekt MeasurementComparisonResultCollection. Tento objekt je nakonec pomocí dodané implementace rozhraní `ResultPrinter` prezentováno uživateli.

Třída `ListResultsCommand` a její metoda `execute` slouží k prostému vypsání obsahu databáze s výsledky měření. Databáze obsahuje informace o výsledcích měření jako je cesta k souboru a popis verze. Tyto údaje vypíše metoda print na třídě FileInfoPrinter do přehledné tabulky na standardní výstup.

5.1.4 Implementace rozhraní MeasurementParser

Rozhraní `MeasurementParser` je určeno ke zpracování souborů s výsledky měření výkonu. Metoda `getParser` třídy `MeasurementFactory` vrací správnou instanci `MeasurementParser`u na základě dodaného jména (řetězce). Jméno parseru je uloženo v konfiguračním souboru.

Implementace rozhraní mohou při zpracovávání souborů vyhazovat runtime výjimku `MeasurementParserException`. Výjimka je odchytávaná mimo implementaci `MeasurementParser` v metodě `execute` třídy `EvaluateCLICommand`. Výjimku je tedy bezpečné vyhazovat.

Aktuálně dostupné implementace rozhraní `MeasurementParser` jsou pouze dvě. `JMHJSONParser`, který umí zpracovávat výstup frameworku JMH ve formátu JSON, a `BenchmarkDotNetJSONParser`, který umí zpracovávat výstup frameworku BenchmarkDotNet ve formátu JSON.

5.1.5 Implementace rozhraní StatisticTest

Rozhraní `StatisticTest` definuje, jaké metody mají mít implementace statistických testů pro porovnání dvourozměrných polí typu double. Jedná se o metodu, která vrací interval spolehlivosti. Interval spolehlivosti je intervalový odhad střední hodnoty pro rozdíl dvou náhodných veličin. Dále musí umět vrátit odhad minimálního počtu vzorků, které jsou zapotřebí pro zajištění dostatečně úzkého intervalu.

Implementace tohoto rozhraní jsou dvě. První je třída `ParametricTest`, která používá Welchův t-test, který je podrobněji popsán v kapitole 2.3.1. Druhou implementací je `NonparametricTest`, který využívá hierarchického bootstrapu. Tento bootstrap je podrobněji popsaný v kapitole 2.3.2.

5.1.6 Implementace rozhraní Database

Rozhraní `Database` definuje funkce, které jsou požadovány od systému, který má ukládat metadata o výsledcích měření. Jeho jediná implementace využívá technologie H2 embedded databáze. Technologie umožňuje vyhledávat položky v lokální databázi pomocí standardních SQL příkazů.

5.2 Rozšiřitelnost a její omezení

Systém PerfEval byl od počátku projektován tak, aby byl rozšiřitelný. V různých částech návrhu se vyskytují místa, kde je možné významným způsobem doplnit a změnit chování celé aplikace.

Nejdůležitější ze zmiňovaných rozšíření je rozšíření o datový formát. Tato možnost dělá z PerfEvalu poměrně univerzální nástroj. Činí ho totiž méně závislým na použitém měřícím systému a jeho výstupním formátu.

5.2.1 Rozšíření o datový formát

Vezměme opět scénář našeho programátora z první kapitoly. Programátor si napsal výkonnostní testy. Testy napsal pomocí nástroje, který nepodporuje PerfEval. Nicméně programátor ví, že systém PerfEval dělá přesně to, co potřebuje. Jediný problém je tedy ve vysvětlení svého datového formátu systému.

PerfEval je od počátku zamýšlen pro rozšíření v tomto místě. Programátor tedy musí prozkoumat, jak správně zkonstruovat třídu `Samples`. Třída `Samples` obsahuje všechny hodnoty naměřené pro jednu testovanou metodu a instanci třídy `Metric`. Instance třídy `Metric` reprezentuje fyzikální jednotku a příznak jestli vyšší hodnota znamená vyšší výkon.

Programátor musí implementovat rozhraní `MeasurementParser`. V tomto rozhraní je důležitá metoda `getTestsFromFiles`. Tato metoda na vstupu přijme všechny soubory s výsledky měření jedné verze. Výstupem je list objektů typů `Samples`. Pro každou metodu (test výkonu), který se v souborech nachází, se v listu vyskytuje pouze jedna instance typu `Samples`.

Poslední krok tohoto rozšíření po implementování `MeasurementParser`u je jeho registrace. Registrace probíhá tak, že se přidá jeden řádek do statického konstruktoru třídy `ParserFactory`. Na řádku bude přidání položky do objektu s názvem `registeredParsers`. Tento objekt je typu `HashMap` a přiřazuje k sobě `Supplier`, který vrací `MeasurementParser`, a název typu `String`. Přidávaná položka je tedy `String` odpovídající názvu parseru a reference na metodu, která umí parser zkonstruovat.

Použití nového parseru je pak jednoduché. Při inicializaci systému PerfEval příkazem init se jako argumentu benchmark-parser použije jméno nového parseru. Dokonce jej začne hlásit v nabídce i chybová hláška v případě, že žádný parser není při inicializaci zadán.

5.2.2 Rozšíření o komparátor

Pokud uživatel chce PerfEvalu změnit pořadí výpisu testů na výstupu, může použít komparátor. Pokud mu žádný z připravených nevyhovuje, tak může implementovat nový komparátor. Tento komparátor je objektem typu Comparator, který porovnává instance MeasurementComparisonRecord. Pomocí tohoto komparátoru, pak dojde k setřídění vypisovaných prvků.

Dále je nutné přepsat metodu resolvePrinterForEvaluateCommand takovým způsobem, aby reagovala i na nový druh komparátoru podle příkazové řádky. Tuto metodu je možné nalézt ve třídě `SetupUtilities`. Posledním krokem je přidání nové značky do parseru příkazové řádky v metodě createParser. Kom-

parátor se pak může předávat objektům typu `ResultPrinter` při konstrukci. O jejich dalším použití si tedy tyto objekty rozhodují samy.

5.2.3 Rozšíření o statistický test

Může se stát, že uživatel systému PerfEval má o svých datech nějaké předpoklady, které by chtěl při vyhodnocování zohlednit. Může si tedy naprogramovat vlastní implementaci rozhraní `StatisticTest`, kde tyto předpoklady zohlední.

Po naprogramování vlastní implementace rozhraní `StatisticTest`, pak jen stačí ve třídě `SetupUtilities` změnit chování metody resolve`StatisticTest` tak, aby rozpoznávala novou implementaci podle příkazové řádky. Posledním krokem je přidání nové značky do parseru příkazové řádky v metodě createParser.

5.2.4 Rozšíření o možnost výpisu

Pro vypisování výsledků porovnání slouží rozhraní `ResultPrinter`. Pokud by si uživatel chtěl implementovat vlastní způsob vypisování, tak stačí implementovat jedinou jeho metodu PrintResults.

Přidání nového `ResultPrinter`u je podobné jako rozšíření o statistický test. Je nutné změnit metodu `resolvePrinterForEvaluateCommand` tak, aby vracela i novou implementaci `ResultPrinter`u. Zmíněná metoda se nachází ve třídě `SetupUtilities`. Pokud by bylo zapotřebí nového argumentu na příkazové řádce, tak je nutné do metody `createParser` jeho použití také správně implementovat.

5.2.5 Rozšíření o novou HTML šablonu

Při použití přepínače `html-output` bude výsledek porovnání uložen v podobě HTML souboru. Tento soubor je možné otevřít v běžném internetovém prohlížeči. Přepínač je možné doplnit o argument `html-template`, kde bude uvedena cesta k nové šabloně. Dodaná šablona bude ve formátu, který podporuje šablonový procesor Thymeleaf. Šabloně bude dodaná instance objektu `MeasurementComparisonResultCollection` jehož struktura je zdokumentovaná v JavaDoc dokumentaci systému PerfEval.

5.2.6 Změna použitého databázového systému

V důsledku rozhodování se o tom, jak se budou informace o výsledcích měření ukládat, vzniklo rozhraní `Database`. Rozhraní má mnoho metod. Pokud by se uživatel rozhodl změnit způsob ukládání dat o měřeních, tak by musel implementovat celé toto rozhraní. Po implementaci rozhraní pak už jen stačí změnit metodu `constructDatabase` ve třídě `SetupUtilities`, která vrací instanci objektu typu `Database`.

5.2.7 Rozšíření o příkaz

Každý příkaz PerfEval se skládá ze dvou tříd. Jedná se o třídu implementující rozhraní `CommandSetup` a o třídu implementující rozhraní `Command`. Pokud by uživatel chtěl doplnit nějaký nový příkaz, který by v kontextu systému dával

smysl, tak je to možné. Dobrý příklad pro reprezentování nového příkazu bude vyhodnocení výkonu s grafickým výstupem.

Na rozdíl od stávajícího vyhodnocování by grafické vyhodnocování potřebovalo údaje z více než dvou posledních verzí. Proto by příkaz evaluate-graphical metoda `getCommand` rozpoznala jako příkaz a vytvořila instanci nové setup třídy `EvaluateGraphicalSetup`. Na této třídě, implementaci `CommandSetup`, by pak zavolala metodu `setup`. Metoda setup na třídě `EvaluateGraphicalSetup` by měla za úkol z konfigurace PerfEvalu a příkazové řádky vyrobit instanci nové třídy `EvaluateGraphicalCommand`. Tuto instanci, která by implementovala rozhraní `Command`, by pak metoda `getCommand` na třídě `Parser` vrátila.

Zbytek programu by se již nezměnil a metoda `main` ve třídě `Main` by vykonala dodaný příkaz. Spustila by standardním způsobem metodu `execute` na instanci objektu typu Command.

Zaregistrování nového příkazu by probíhalo přidáním nové položky do statického konstruktoru třídy `Parser`. Položka mapy `commandPerSetup` má obdobnou strukturu jako v případě rozšíření o nový `MeasurementParser`. Dodal by se řádek s názvem příkazu typu `String` a z reference na bezparametrický konstruktor implementace rozhraní `CommandSetup`. Název příkazu odpovídá příkazu, kterým se bude volat z příkazové řádky.

5.2.8 Omezená rozšiřitelnost ve vyhodnocování

Jeden z nejhorších požadavků na rozšíření systému by bylo rozšíření v oblasti vyhodnocování. Jedná se o změnu implementace třídy `PerformanceEvaluator`. Tato třída utváří celkovou vyhodnocovací logiku. Její rozšiřitelnost je omezená na implementace rozhraní `StatisticTest`.

Omezenou změnu chování vyhodnocování výkonnostních testů provést lze. Omezené změny ve vyhodnocování se provádí změnami hodnot uvnitř config.ini souboru.

6. Vyhodnocení práce

Výsledkem této práce je implementace systému pro porovnávání výkonu verzí softwaru pojmenovaná PerfEval. V této kapitole bude krok za krokem ukázáno, jak se systémem pracovat.

6.1 Používání systému PerfEval

V následujících dvou ukázkách bude vysvětleno, jak používat PerfEval. První ukázka bude cílit na nastínění, co nejjednoduššího použití. Druhá část ukáže aplikaci PerfEvalu na skutečným projektu.

Jednoduché použití PerfEvalu

Následující kód popisuje obvyklou posloupnost příkazů práce se systémem PerfEval. Na začátku je nutné jej inicializovat. PerfEval bude inicializován pro použití JMHJSONParseru. Následně se přidají výsledky měření několika (alespoň dvou) různých verzí. Nakonec program vypíše, jestli výkonnostní testy prošly nebo ne.

```
perfeval init --benchmark-parser JMHJSONParser
perfeval index-all-results --path tests/old_test --
   version old_version
perfeval index-all-results --path tests/new_test --
   version new_version
perfeval evaluate && echo "Performance␣test␣passed"
    | exit 0
echo "Performance␣test␣failed" | exit 1
```

Návrh skriptu pro doměření výsledků

Následující kód nastiňuje možnost využití příkazu list-undecided. Výstupem tohoto příkazu jsou dva tabulátorem oddělené sloupce. V prvním sloupci jsou názvy metod, pro něž systém eviduje málo naměřených běhů. Ve druhém sloupci je uveden tento počet. Příkaz je určený pro skriptování, proto není dodaná žádná další hlavička.

V případě, že výstupem není žádný výpis, tak je hodnot u všech testovacích metod naměřeno dostatek. Druhou alternativou je, že v důsledku nastavení v konfiguračním souboru systém vyhodnotil, že není možné požadovaný počet testů doměřit. Následné vyhodnocení pak bude vyžadovat kontrolu uživatelem, protože systém PerfEval bude vyhodnocení považovat za nevyhovující.

Skript projde všechny řádky výpisu. Pokud je výpis prázdný, tak skončí. V následujícím kódu je celá situace velmi zjednodušena. Nalezne se maximální počet testů, který je zapotřebí změřit. Pro tento maximální počet se změří výkony obou verzí znovu. Výsledky těchto měření se zaznamenají do systému PerfEval. Po doběhnutí všech měření skript skončí. Vyhodnotí mezi sebou výsledky těchto verzí a skončí. Parametry $1 a $2 jsou stará a nová verze k porovnání. Předpokládá se,

že příkaz measure provede měření verze zadané jako první argument a výsledek uloží do souboru specifikovaného jako druhý argument.

```
#!/bin/bash

index=1
while true; do
    output=$(perfeval list-undecided --old-version
       "$1" --new-version "$2")
    if [[ -n "$output" ]]; then
        max=$(echo "$output" | cut -f2 -d$'\t' |
           sort -n -k | head 1)
        for ((i=1; i<=$max; i++)); do
            result_file="old_version_$index"
            measure "$1" "$result_file"
            perfeval index-new-result --path "
               $result_file" --version "$1"

            result_file="new_version_$index"
            measure "$2" "$result_file"
            perfeval index-new-result --path "
               $result_file" --version "$2"
            ((index++))
        done
    else
        perfeval evaluate --old-version "$1" --new-
           version "$2"
        exit $?
        break
    fi
done
```

6.2 Nasazení systému v praxi

V této kapitole bude ukázáno, jak systém PerfEval funguje při svém nasazení. Pro ukázku byl vybrán projekt Crate Lutz a kol. (2024). Jedná se o databázový projekt volně dostupný na platformě GitHub.

Projekt Crate byl vybrán, protože je volně dostupný, a protože má implementované výkonnostní testy. Tyto testy je možné spouštět samostatně přímo z adresáře projektu a to i pro starší verze.

Systém PerfEval tedy bude použit pro porovnání vybraných commitů. Cílem tohoto spouštění je zjistit, jestli systém PerfEval detekuje zhoršení a případně zlepšení výkonu.

6.2.1 Výběr commitů

Commity pro prezentování práce systému byly vybírány z období od 21. dubna 2020 do 11. května 2023. Byly vybrány ty commity, jejichž commit message ob-

sahuje slovo „performance“ a jejich sousední commity (pro porovnání). Commity byly vybírány z hlavní větve projektu. Všechny výkonnostní testy byly prováděné na strojích stejného druhu a konfigurace.

Z takto vybraných commitů byly dále vybrané jen ty, u kterých bylo možné projekt bez problémů sestavit. Zároveň bylo také nutné, aby bylo možné sestavit a spustit výkonnostní testy. Nakonec tedy bylo vybráno a naměřeno celkem 16 commitů z uvedeného období. Pro každý z těchto commitů, který reprezentuje v doméně systému PerfEval verzi, bylo měření provedeno celkem osmkrát.

6.2.2 Porovnatelné commity

Systém PerfEval porovnává pouze dvě verze jejichž všechny testované metody se shodují. Pokud se tedy mezi dvěma verzemi název některé metody změnil, byla přidaná nová metoda nebo byla nějaká metoda odstraněna, tak tyto verze PerfEval neporovná.

Proto i ze zvolených 16 commitů nebylo možné porovnat každý s každým. Naměřené commity se tedy rozdělily do tří skupin. V těchto skupinách se všechny měřené metody shodují, a tak je možné je vzájemně porovnat. Zároveň se v commitu označeném jako HEAD, tedy nejnovější verze, přidala jedna nová metoda, a tak není možné jej porovnávat s žádným jiným commitem.

V první skupině se nachází 3 commity z období od 8. června 2022 do 4. července 2022. Ve druhé skupině se nachází 3 commity z období od 28. února 2023 do 7. března 2023. V poslední skupině se nachází 9 commitů z období od 29. března 2023 do 11. května 2023. U nejnovějšího commitu z 11. května 2023 (čas 15:42:16) je součástí commit message také poznámka o tom, že byla přidaná nová testovací metoda v rámci benchmarku JMH.

První skupina commitů:

- commit 5f0d8a0792f5c6fa2f90f42518b39abb242f21c2 - 8. června 2022
- commit 43a996010438ab8784c19269cab14932e02d3a6a - 4. července 2022
- commit a9ae6e07bfafea8771f559122f5330a89793748b - 4. července 2022

Druhá skupina commitů:

- commit f626ec8918422ca0cb6ada5aa7fc601bbbfc53fa - 28. února 2023
- commit 03c913ecc91043b1cecdff738dd7bdea07857a9b - 7. března 2023
- commit 270b1bd3db98ccd7e2427c7f5a8137d47477b5a1 - 7. března 2023

Třetí skupina commitů:

- commit 4a4848d9b9c47e4b3e5a00fb4ca0e19e2c11828b - 28. března 2023
- commit da83f1eb1d70462d326946a8aa46955e81080f7f - 29. března 2023
- commit 5b73ac03409c41acb51b4efd9f58d68c6bffb6b9 - 11. dubna 2023
- commit 5b6458b20779a1429fa5724c447bbb9b779298e9 - 4. ledna 2023
- commit 50e3ed3a43f7a85d52c6cd96791a4fe76c941ba8 - 12. dubna 2023

- commit 6a2b489d9b5691f9bc517e312c86814d4a4f8b07 - 12. dubna 2023
- commit df0635dec721861d1f9f5fbde4e9e8647bfebc13 - 10. května 2023
- commit 30081686c6e38b3b20817d86a3a38eb652c8625a - 11. května 2023
- commit 5ad19461d9bbdfd812586612f3598ef91fb1d529 - 11. května 2023

6.2.3 Výsledek práce systému PerfEval

Jednotlivé naměřené hodnoty byly pomocí příkazu `index-all-result` přidány do databáze systému PerfEval. Všechna měření výkonu pro jeden commit byla takto přidána jako výsledek měření jedné verze. Následně byly pomocí PerfEvalu porovnány sousední porovnatelné commity.

Při porovnávání naměřených datových sad pro první skupinu commitů bylo zjištěno, že výkonnostní testy prošly. Pokud by tedy tyto verze v rámci průběžné integrace byly měřeny a porovnány systémem PerfEval, tak by byly úspěšně integrovány. Popis commitu 43a996010438ab8784c19269cab14932e02d3a6a o významné změně výkonu PerfEval neprokázal.

Porovnáním naměřených datových sad druhé skupiny commitů bylo zjištěno, že výkonnostní testy prošly. Pokud by tedy tyto verze v rámci průběžné integrace byly měřeny a porovnány systémem PerfEval, tak by také byly úspěšně integrovány. Při porovnání po sobě jdoucích commitů nebyla zjištěna žádná výrazná změna výkonu a to ani zlepšení. Při porovnání nejnovějšího a nejstaršího commitu ze skupiny bylo systémem PerfEval zjištěno, že výkon se výkon zlepšil v jedné testovací metodě o více než 5 %. Pokud se v konfiguračním nastavil parametr `improvedPerformance` na TRUE, tak program skončil s nenulovým exit kódem. PerfEval tedy zjištěné zlepšení nahlásil.

Při porovnávání sousedních verzí ve třetí sadě bylo hlášeno jedno zhoršení výkonu. Při srovnání commitu 6a2b489d9b5691f9bc517e312c86814d4a4f8b07 a commitu df0635dec721861d1f9f5fbde4e9e8647bfebc13 bylo systémem PerfEval zjištěno a hlášeno zhoršení výkonu. Ve třech testovacích metodách bylo zjištěno zhoršení výkonu větší než 5 %. Při pohledu na výsledek porovnání je ale také vidět, že se výsledek zlepšil také ve třech testovacích metodách. Pokud by byl parametr `tolerance` nastaven na hodnotu 0,1, tak by ale PerfEval žádnou chybu nehlásil, protože zhoršení výkonu bylo v těchto třech testovacích metodách vždy menší než 10 %.

Metody u kterých nástroj detekuje zhoršení:

- io.crate.execution.TimePrecisionIncreaseTest.currentTimeMillisNextGen
- io.crate.data.join.RowsBatchIteratorBenchmark.measureConsumeHash InnerJoin
- io.crate.analyze.PreExecutionBenchmark.measure_parse_simple_select

V konečném důsledku tedy nástroj Perfeval odhalil zlepšení výkonu u tří metod o více než 10% a současně zhoršení u výše zmíněných metod, které jsou součástí výkonnostních testů projektu Crate. Při změně nastavení nástroj byl schopen detekovat i samostatné zlepšení. Nástroj Crate by tedy bylo možné uplatnit v rámci průběžné integrace projektu.

old version: 4a4848d9b9c47e4b3e5a00fb4ca0e19e2c11828b
new version: 5ad19461d9bbdfd812586612f3598ef91fb1d529

Name	NewAverage	OldAverage	Change [%]	Comparison result	Comparison verdict
iceT.currentTimeMillisNextGen	0.0000 us/op	0.0000 us/op	-5.46	different distribution	NOT OK
iccS.measure_StringUti~ParseLong_invalid	0.00000 us/op	0.00000 us/op	+21.44	different distribution	OK
icoaI.benchmarkIntervalAggregation	684 us/op	696 us/op	+1.83	different distribution	OK
icoaH.benchmarkHLLPlusPlusMurmur128	316 us/op	320 us/op	+1.30	different distribution	OK
icdjR.measureConsumeHa~thHashCollisions	0.000 ms/op	0.000 ms/op	-0.81	different distribution	OK
icaP.measure_parse_ana~lan_simple_select	14.0 us/op	13.0 us/op	-2.08	different distribution	OK
icdjR.measureConsumeNestedLoopJoin	81.0 ms/op	82.0 ms/op	+1.90	different distribution	OK
iccS.measure_StringUti~ryParseLong_valid	0.000 us/op	0.000 us/op	+18.61	different distribution	OK
icdjR.measureConsumeHashInnerJoin	2.0 ms/op	2.0 ms/op	-5.47	different distribution	NOT OK
iceerC.measureFileReadingIteratorForCSV	39.0 us/op	39.0 us/op	+0.37	different distribution	OK
iceeccL.measureConsumeL~neBatchIterator	224 ms/op	224 ms/op	-0.04	same distribution	OK
icoaH.benchmarkHLLAggregationOffHeap	538 us/op	540 us/op	+0.33	same distribution	OK
ice.dml.IndexerBenchmark.measure_index	789 us/op	775 us/op	-1.81	different distribution	OK
iccS.measure_Long_parseLong_invalid	1.00 us/op	1.00 us/op	+1.17	different distribution	OK
iccS.measure_Long_parseLong_valid	0.000 us/op	0.000 us/op	+14.67	different distribution	OK
iceeaG.measureGroupBySumLong	626 ms/op	631 ms/op	+0.86	different distribution	OK
iceeccO.measureLoadAndC~neBatchIterator	7.0 s/op	7.0 s/op	+0.62	different distribution	OK
icaP.measure_parse_simple_select	7.0 us/op	7.0 us/op	-5.75	different distribution	NOT OK
icdjR.measureConsumeBlockNestedLoopJoin	116 ms/op	114 ms/op	-1.73	different distribution	OK
iceeaG.measureGroupingOnNumericDocValues	410 ms/op	409 ms/op	-0.20	same distribution	OK
iceeaG.measureGroupingO~NumericDocValues	441 ms/op	444 ms/op	+0.67	different distribution	OK
iceerJ.measureFileReadingIteratorForJson	14.0 us/op	14.0 us/op	+1.58	different distribution	OK
icoaH.benchmarkHLLPlusPlusMurmur64	295 us/op	298 us/op	+1.16	different distribution	OK
iceedmS.measurePagingIt~orWithoutRepeat	12.0 ms/op	13.0 ms/op	+12.25	different distribution	OK
icoaH.benchmarkHLLAggregationOnHeap	498 us/op	500 us/op	+0.39	same distribution	OK
iceedmS.measurePagingIteratorWithRepeat	17.0 ms/op	17.0 ms/op	-0.24	different distribution	OK
iceeaG.measureGroupByMinString	639 ms/op	608 ms/op	-4.81	different distribution	OK
iceeaG.measureGroupingOnLongArray	215 ms/op	208 ms/op	-2.93	different distribution	OK
iceT.currentTimeMillisOriginal	0.0000 us/op	0.0000 us/op	+0.23	different distribution	OK
iceeaA.measureAggregateCollector	226 us/op	215 us/op	-4.95	different distribution	OK
ict.StringTypeTest.booleanConversion	1.74702e+09 ops/s	1.74690e+09 ops/s	+0.01	different distribution	OK
iceedmS.measurePagingIteratorWithSort	546 ms/op	549 ms/op	+0.55	different distribution	OK
iceedmS.measureListSort	552 ms/op	554 ms/op	+0.34	different distribution	OK
icdjR.measureConsumeNestedLoopLeftJoin	116 ms/op	114 ms/op	-1.62	different distribution	OK
icaP.measure_parse_and~yze_simple_select	10.0 us/op	9.0 us/op	-1.69	different distribution	OK
icejC.benchmarkRuntimeMethod	2 us/op	2 us/op	-1.02	impossible to measure (1037 samples needed)	NOT OK
icejC.benchmarkMemoryMXBeanMethod	18 us/op	17 us/op	-0.82	impossible to measure (1095 samples needed)	NOT OK

Obrázek 6.1: Výsledek porovnání výkonu metod projektu Crate s tolerancí 0,05

```
old version: 4a4848d9b9c47e4b3e5a00fb4ca0e19e2c11828b
new version: 5ad19461d9bbdfd812586612f3598ef91fb1d529
```

Name	NewAverage	OldAverage	Change [%]	Comparison result	Comparison verdict
iceT.currentTimeMillisNextGen	0.0000 us/op	0.0000 us/op	-5.46	different distribution	OK
icoaI.benchmarkIntervalAggregation	684 us/op	696 us/op	+1.83	different distribution	OK
iccS.measure_StringUti~ParseLong_invalid	0.00000 us/op	0.00000 us/op	+21.44	different distribution	OK
icoaH.benchmarkHLLPlusPlusMurmur128	316 us/op	320 us/op	+1.30	different distribution	OK
icaP.measure_parse_ana~lan_simple_select	14.0 us/op	13.0 us/op	-2.08	different distribution	OK
icdjR.measureConsumeHa~thHashCollisions	0.000 ms/op	0.000 ms/op	-0.81	different distribution	OK
iceerC.measureFileReadingIteratorForCSV	39.0 us/op	39.0 us/op	+0.37	different distribution	OK
icdjR.measureConsumeNestedLoopJoin	81 ms/op	82 ms/op	+1.90	different distribution	OK
iccS.measure_StringUti~ryParseLong_valid	0.000 us/op	0.000 us/op	+18.61	different distribution	OK
icoaH.benchmarkHLLAggregationOffHeap	538 us/op	540 us/op	+0.33	same distribution	OK
iceeccL.measureConsumeL~neBatchIterator	224 ms/op	224 ms/op	-0.04	same distribution	OK
ice.dmJ.IndexerBenchmark.measure_index	789 us/op	775 us/op	-1.81	different distribution	OK
icdjR.measureConsumeHashInnerJoin	2.0 ms/op	2.0 ms/op	-5.47	different distribution	OK
iccS.measure_Long_parseLong_invalid	1.00 us/op	1.00 us/op	+1.17	different distribution	OK
iccS.measure_Long_parseLong_valid	0.000 us/op	0.000 us/op	+14.67	different distribution	OK
iceeccO.measureLoadAndC~neBatchIterator	7.0 s/op	7.0 s/op	+0.62	different distribution	OK
iceeaG.measureGroupBySumLong	626 ms/op	631 ms/op	+0.86	different distribution	OK
icaP.measure_parse_simple_select	7.0 us/op	7.0 us/op	-5.75	different distribution	OK
iceerJ.measureFileReadingIteratorForJson	14.0 us/op	14.0 us/op	+1.58	different distribution	OK
iceeaG.measureGroupingOnNumericDocValues	410 ms/op	409 ms/op	-0.20	same distribution	OK
iceedmS.measurePagingIt~orWithoutRepeat	12.0 ms/op	13.0 ms/op	+12.25	different distribution	OK
icoaH.benchmarkHLLPlusPlusMurmur64	295 us/op	298 us/op	+1.16	different distribution	OK
icoaH.benchmarkHLLAggregationOnHeap	498 us/op	500 us/op	+0.39	different distribution	OK
icdjR.measureConsumeBlockNestedLoopJoin	116 ms/op	114 ms/op	-1.73	different distribution	OK
iceeaG.measureGroupingO~NumericDocValues	441 ms/op	444 ms/op	+0.67	different distribution	OK
iceeaG.measureGroupByMinString	639 ms/op	608 ms/op	-4.81	different distribution	OK
iceedmS.measurePagingIteratorWithRepeat	17.0 ms/op	17.0 ms/op	-0.24	different distribution	OK
iceeaA.measureAggregateCollector	226 us/op	215 us/op	-4.95	different distribution	OK
iceT.currentTimeMillisOriginal	0.0000 us/op	0.0000 us/op	+0.23	different distribution	OK
iceedmS.measurePagingIteratorWithSort	546 ms/op	549 ms/op	+0.55	different distribution	OK
iceeaG.measureGroupingOnLongArray	215 ms/op	208 ms/op	-2.93	different distribution	OK
icaP.measure_parse_and~yze_simple_select	10.0 us/op	9.0 us/op	-1.69	different distribution	OK
iceedmS.measureListSort	552 ms/op	554 ms/op	+0.34	different distribution	OK
ict.StringTypeTest.booleanConversion	1.74702e+09 ops/s	1.74690e+09 ops/s	+0.01	different distribution	OK
icdjR.measureConsumeNestedLoopLeftJoin	116 ms/op	114 ms/op	-1.62	different distribution	OK
icejC.benchmarkMemoryMXBeanMethod	18 us/op	17 us/op	-0.82	impossible to measure (1048 samples needed)	NOT OK
icejC.benchmarkRuntimeMethod	2 us/op	2 us/op	-1.02	impossible to measure (1052 samples needed)	NOT OK

Obrázek 6.2: Výsledek porovnání výkonu metod projektu Crate s tolerancí 0,1

Závěr

Tato práce se snaží navázat na využívání unit testů při vývoji softwaru. Nástroj PerfEval, který byl vytvořen, má za úkol poskytnout vývojářům možnost psát výkonnostní testy obdobně jako unit testy.

V první kapitole bylo vysvětleno, co je průběžná integrace. Dále byl popsán scénář programátora, který ji využívá pro udržování korektnosti svého kódu, a jak by ji chtěl využít i pro udržování výkonu. Programátor měl napsané výkonnostní testy pomocí benchmarkovacího frameworku a potřeboval je vyhodnocovat. Neměl ale žádný nástroj, který by uměl výsledky měření porovnat a vyhodnotit změnu výkonu.

Druhá kapitola se věnuje analýze problematiky kolem vyhodnocování výkonu softwaru. Je zde popsáno jak vypadají výstupy benchmarkovacích frameworků JMH a BenchmarkDotNET. Dále jsou popsány statistické metody, které se následně v nástroji využívají k porovnání výsledků měření.

Ve třetí kapitole je vysvětleno několik důležitých rozhodnutí, které byly provedeny před a v průběhu vývoje nástroje PerfEval. Zároveň byla nastíněna architektura nástroje a jakým způsobem se používá.

Uživatelská dokumentace ukazuje jaké příkazy má uživatel k dispozici včetně jejich argumentů. V této kapitole se také uživatel dozví jak nástroj instalovat a používat včetně toho, jak jej konfigurovat.

Programátorská dokumentace obsahuje detailní popis struktury kódu. Je zde popsáno jaké byly využité návrhové vzory a jak spolu jednotlivé třídy vzájemně interagují.

Výsledkem práce je nástroj PerfEval jehož způsob použití včetně nasazení v rámci existujícího projektu je demonstrováno v poslední kapitole. Nástroj byl nasazen v rámci projektu Crate a byl použit k analýze výkonnostních testů verzí, které byly označené, jako verze se změnou výkonem.

Nástroj změnu výkonu detekoval a označil ji jako významnou. Zároveň byl nástroj schopen detekovat také zlepšení výkonu. Nástroj PerfEval byl tedy úspěšně nasazen v rámci projektu Crate a splnil tak očekávání, která na něj byla kladena. Nástroj Perfeval tedy může být používán v rámci průběžné integrace spolu s unit testy a dalšími nástroji pro udržování kvality kódu.

Seznam použité literatury

Akinshin, A. (2024). dotnet/BenchmarkDotNet. URL https://github.com/dotnet/BenchmarkDotNet. original-date: 2013-08-18T06:17:48Z.

Heisler, B. (2024). criterion - Rust. URL https://docs.rs/criterion/latest/criterion/index.html.

Lutz, C., Dorn, B. a Batlogg, J. (2024). crate. URL https://github.com/crate/crate. original-date: 2013-04-10T09:17:16Z.

Shipilëv, A. (2024). openjdk/jmh. URL https://github.com/openjdk/jmh. original-date: 2019-05-15T06:47:19Z.

Stefan, P., Horký, V., Bulej, L. a Tůma, P. (2017). Unit testing performance in java projects: Are we there yet? In *Proc. 8th ACM/SPEC Intl. Conf. on Performance Engineering (ICPE)*, pages 401–412. ISBN 978-1-4503-4404-3. doi: 10.1145/3030207.3030226.

Turčicová, M. (2021). Dvouvýběrové testy. URL https://www.karlin.mff.cuni.cz/~turcic/Dvouvyberove_testy.pdf.

Wikipedia contributors (2023). Welch's t-test — Wikipedia, the free encyclopedia. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Welch%27s_t-test&oldid=1184251732. [Online; accessed 28-March-2024].

Šámal, R. (2023). NMAI059 Pravděpodobnost a statistika 1. URL https://iuuk.mff.cuni.cz/~samal/vyuka/2223/PSt1/skripta.pdf.

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam použitých zkratek

A. Přílohy

A.1 První příloha