



**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

<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>1 Kontext</b>	<b>4</b>
1.1 Testování softwaru při vývoji . . . . .	4
1.2 Průběžná integrace . . . . .	5
1.3 Scénář . . . . .	5
<b>2 Kontext vyhodnocování výkonu</b>	<b>7</b>
2.1 Automatické vyhodnocování . . . . .	7
2.2 Měření výkonu . . . . .	7
2.2.1 Výstup měření BenchmarkDotNet . . . . .	8
2.2.2 Výstup měření JMH . . . . .	9
2.3 Použití statistických metod pro analýzu dat . . . . .	10
2.3.1 Welchův dvouvýběrový t-test . . . . .	10
2.3.2 Percentilový hierarchický bootstrap . . . . .	11
2.3.3 Co dělat v případě nevyvrácení hypotézy? . . . . .	12
<b>3 Systém PerfEval</b>	<b>14</b>
3.1 Popis systému . . . . .	14
3.2 Rozbor alternativ v řešení . . . . .	14
3.2.1 Spouštění testů systémem PerfEval . . . . .	14
3.2.2 Použité statistické metody . . . . .	15
3.2.3 Rozpoznání formátu výsledků měření . . . . .	15
3.2.4 Kdy zpracovávat naměřená data? . . . . .	16
3.2.5 Jak přistupovat k naměřeným datům? . . . . .	16
3.2.6 Formát výstupu . . . . .	17
3.3 Architektura systému PerfEval . . . . .	18
3.3.1 Průběh vyhodnocování . . . . .	18
3.3.2 Inicializace systému PerfEval . . . . .	18
3.3.3 Přidávání nových výsledků testů . . . . .	20
<b>4 Uživatelská dokumentace systému PerfEval</b>	<b>22</b>
4.1 Instalace . . . . .	22
4.2 Dostupné příkazy . . . . .	22
4.2.1 Příkaz init . . . . .	22
4.2.2 Příkaz index-new-result . . . . .	23
4.2.3 Příkaz index-all-results . . . . .	23
4.2.4 Příkaz evaluate . . . . .	23
4.2.5 Příkaz list-undecided . . . . .	24
4.2.6 Příkaz list-results . . . . .	24
4.3 Konfigurační soubor . . . . .	25
<b>5 Programátorská dokumentace systému PerfEval</b>	<b>26</b>
5.1 Architektura systému . . . . .	26
5.1.1 Použité návrhové vzory . . . . .	26
5.1.2 Parser a setup třídy . . . . .	28

5.1.3	Command třídy . . . . .	29
5.1.4	Implementace rozhraní MeasurementParser . . . . .	30
5.1.5	Implementace rozhraní StatisticTest . . . . .	30
5.1.6	Implementace rozhraní Database . . . . .	30
5.2	Rozšiřitelnost a její omezení . . . . .	31
5.2.1	Rozšíření o datový formát . . . . .	31
5.2.2	Rozšíření o komparátor . . . . .	31
5.2.3	Rozšíření o statistický test . . . . .	32
5.2.4	Rozšíření o možnost výpisu . . . . .	32
5.2.5	Rozšíření o novou HTML šablonu . . . . .	32
5.2.6	Změna použitého databázového systému . . . . .	32
5.2.7	Rozšíření o příkaz . . . . .	32
5.2.8	Omezená rozšiřitelnost ve vyhodnocování . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Vyhodnocení práce</b>	<b>34</b>
6.1	Používání systému PerfEval . . . . .	34
6.2	Nasazení systému v praxi . . . . .	36
6.2.1	Výběr commitů . . . . .	37
6.2.2	Porovnatelné commity . . . . .	37
6.2.3	Výsledek práce systému PerfEval . . . . .	38
	<b>Závěr</b>	<b>42</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>45</b>
	<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>46</b>
<b>A</b>	<b>Přílohy</b>	<b>47</b>
A.1	První příloha . . . . .	47

# 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. Měřicí frameworky tyto referenční hodnoty nemají a ani je nikde získat nemohou, protože měří pouze jednu verzi softwaru. Nemohou tedy zmíněné celkové vyhodnocení dělat.

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. Když se mění částí 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 měřicí 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 umí frameworky 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. Při selhání skriptu, když skončí s nenulovým exit kódem, je možné změny neintegrovat. Tímto způsobem je možné zamezit integraci chybného kódu.

## 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 se 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 nevyovídá 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 novou verzí 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 nebo zadané 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 metodou JIT, je nutné být obezřetný. Je nutné všimnout 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 měřicím 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 měřicím 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-22.04",
  "warmupIterations" : 5,
  "warmupTime" : "10 s",
  "warmupBatchSize" : 1,
  "measurementIterations" : 5,
  "measurementTime" : "10 s",
  "measurementBatchSize" : 1,
  "primaryMetric" : {
    "score" : 1.8288931796073906E9,
    "scoreError" : 1.0165392174249965E8,
    "scoreConfidence" : [
      1.727239257864891E9,
      1.9305471013498902E9
    ],
    "scorePercentiles" : {
      "0.0" : 1.4301278880934358E9,
      "50.0" : 1.8645360710333076E9,
      "90.0" : 1.9365128374326475E9,
      "95.0" : 1.9403031190979056E9,
      "99.0" : 1.9416707973256059E9,
      "99.9" : 1.9416707973256059E9,
      "99.99" : 1.9416707973256059E9,
      "99.999" : 1.9416707973256059E9,
      "99.9999" : 1.9416707973256059E9,
      "100.0" : 1.9416707973256059E9
    },
    "scoreUnit" : "ops/s",
    "rawData" : [
      1.8554191503325295E9,
      1.8561380112017648E9,
      1.8560222540239005E9,
      1.8499319451317933E9,
      1.857527159310315E9
    ]
  },
  "scoreUnit" : "ops/s",
  "rawData" : [
    1.8554191503325295E9,
    1.8561380112017648E9,
    1.8560222540239005E9,
    1.8499319451317933E9,
    1.857527159310315E9
  ]
}
```

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 spojitě náhodné veličiny stejnou střední hodnotu. Hodnoty spojitě 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  $\alpha$ . Parametr  $\alpha$  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  $\alpha$  (`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**  $i = 0; i < \text{iterationCount}; i += 1$  **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**  $i = 0; i < \text{iterationCount}; i += 1$  **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 hypotéza 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 podrobnější znalostí problematiky rozebranou ve druhé kapitole je možné začít řešit programátorův problém s vyhodnocováním výkonu popsany 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 začít ji navrhovat. V této kapitole jsou popsány úvahy a rozhodnutí, 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, která výrazně ovlivnila 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. Druhá varianta byla, 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 pomíneme 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.

Pokud by PerfEval využíval této varianty, tak by uživatel při inicializaci systému musel zadat, jak spustit testy a kam se uloží výsledek. Tímto způsobem by došlo k tomu, že PerfEval by začal určovat, jak mají vypadat programy, jejichž výstupy přijímá.

Přijaté řešení byla druhá zmiňovaná varianta. Uživatel tedy spouští testy sám a PerfEval pouze porovnává výsledky. Při inicializaci uživatel pouze vybere vhodný parser. Zvolený parser umí zpracovat příslušný formát dat z benchmarkovacího frameworku, který uživatel používá.

Vybrané řešení tedy od uživatele požaduje krok navíc. Nicméně dává uživateli mnohem větší prostor pro to, jak spouští testy a kam ukládá výsledky. O tom, že existují výsledky měření dané verze, a kde se nachází, uživatel pouze informuje PerfEval. Systém tak ani do budoucna neklade žádné nároky na to, jak má uživatel testy spouštět, ani kde se mají výsledky ukládat.

### 3.2.2 Použité statistické metody

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

Bootstrap je oproti t-testu výhodnější, protože není vyžadován předpoklad normálního rozdělení dat. Je implementovaný pomocí algoritmů popsaných ve druhé kapitole. Nevýhodou oproti t-testu je, že výpočet je pomalejší. Výpočet je pomalý, protože dochází k velkému množství náhodných výběrů ze sady dat.

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 času na porovnání výsledků měření. Pokud má uživatel 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.

Pokud bude naměřených vzorků pro statistické porovnání příliš málo, tak ani jeden z testů nebude schopen vrátit významný výsledek. V obou případech je tedy nutné také vyhodnocovat, zda je množství vzorků dostatečné. Pokud množství vzorků není dostatečné, pak je nutné o tom uživatele informovat.

### 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 v tom, 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 formátů 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 s těmi které zvolený parser rozpoznává. 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. Uživatelé 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. Tento adresář by byl určený systémem PerfEval, nebo by byla zadána cesta k němu 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 při vkládání, ale špatně dohledávají. Pravděpodobně by se používání některých verzí k porovnání opakovalo častěji než u jiných. Zároveň pokud by nejnovější verze nebyla v cache, tak by se dohledávala postupným průchodem na základě nejmladšího data změny adresáře v adresáři s výsledky měření. Cache by byla tvořena posledními několika desítkami naposledy použitých 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 uloženy 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 formátů systému PerfEval je takováto tabulka na příkazové řádce. Druhý formát s daty čitelnými pro člověka je tabulka na HTML stránce, kterou PerfEval umí vygenerovat. Výstup v HTML formátu je výhodný, protože je možné soubor s výsledky otevřít v internetovém prohlížeči, který je dnes dostupný téměř na každém zařízení.

Strojem čitelný formát je XML soubor. XML má formát shodný s JUNIT XML formátem, který je běžně používaný v průběžné integraci při hlášení výsledků unit testů. Druhým zvoleným formátem je JSON, který je dnes běžně používaný

pro serializaci dat v různých programovacích jazycích. Umožňuje tak snadnou integraci s dalšími programy.

## 3.3 Architektura systému PerfEval

Tato kapitola se věnuje popisu konkrétní architektury systému PerfEval. Popisuje jakým způsobem jsou jednotlivé části systému navrženy a jak spolu vzájemně interagují.

### 3.3.1 Průběh vyhodnocování

Samotné vyhodnocování jakožto porovnání dvou výsledků měření jedné sady testů výkonu je proces, který lze rozdělit do několika kroků. Zpracování dat uložených v souborech s výsledky měření až po vypsání výsledků vyhodnocení probíhá následujícím způsobem:

1. Načtení a naparsování výsledků měření ze souborů.
2. Pomocí statistického testu porovnat dvě sady naměřených dat.
3. Výsledek porovnání vypsát uživateli.

Následující obrázek znázorňuje objektový návrh tříd, které se podílejí na vyhodnocování výsledků měření.

Třída `EvaluateCLICommand` zastřešuje celý tento proces vyhodnocování. Pro první krok použije parser výsledků měření, který je zvolen uživatelem při inicializaci systému, poté je tato volba načtena z konfiguračního souboru. Tento parser umí naparsovat výsledky měření z jednoho formátu a frameworku. Výsledkem parsování jsou dvě instance třídy `Samples`, jejíž struktura další třídy rozumí.

Druhý krok je porovnání dvou instancí třídy `Samples` pomocí statistického testu. Implementace statistického testu je dodaná při konstrukci hlavní vyhodnocovací třídy `EvaluateCLICommand`. Výsledkem porovnání je instance třídy `MeasurementComparisonResultCollection`, která obsahuje výsledky porovnání.

PerfEval umí vypisovat výsledky v několika běžných formátech. O výpis v různých formátech se starají implementace rozhraní `ResultPrinter`. Výsledky vyhodnocení jsou tedy předány instanci třídy `ResultPrinter`, která umí výsledky vyhodnocení z kolekce `MeasurementComparisonResultCollection` vypsát.

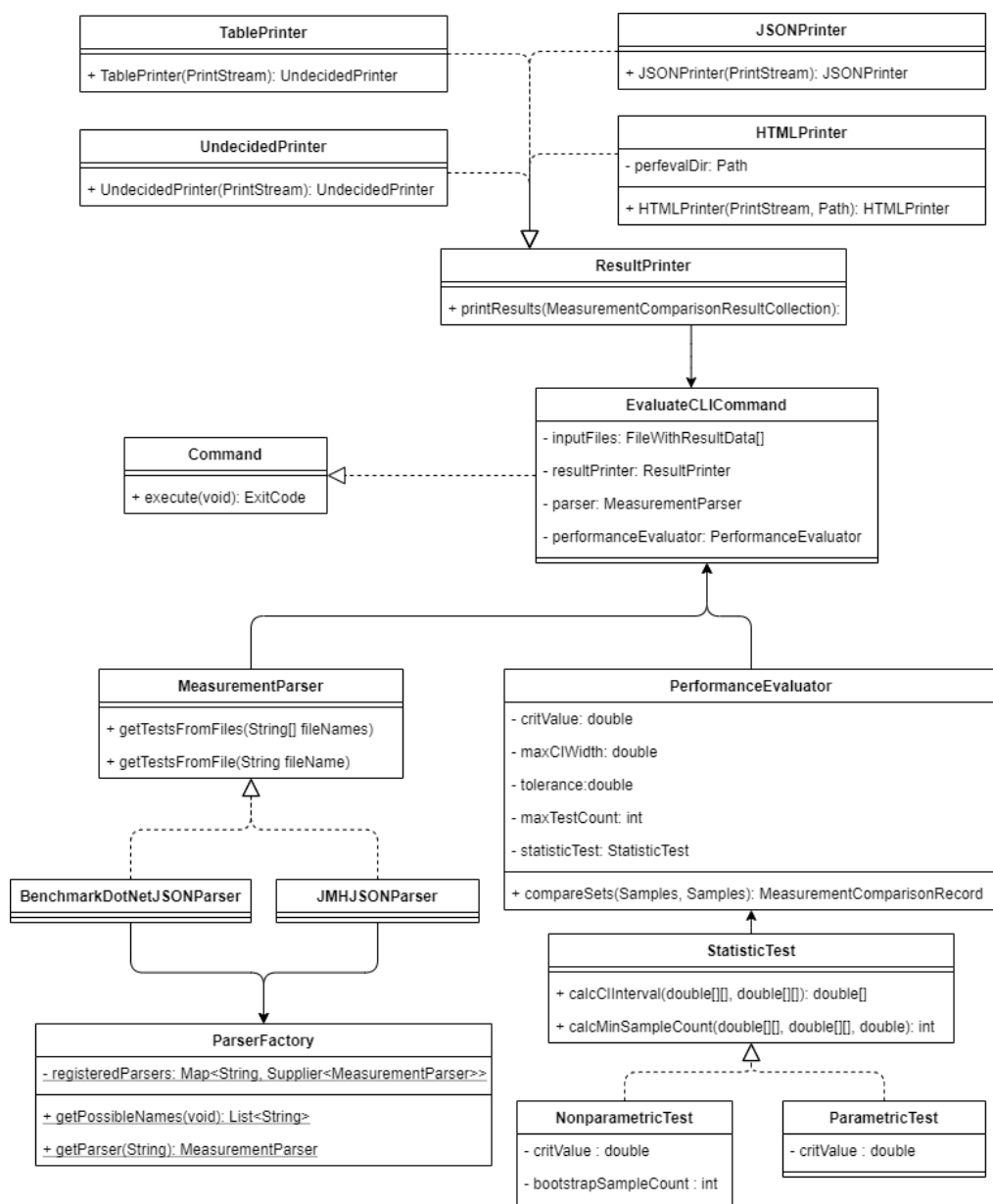
Nakonec se jen podle voleb z konfiguračního souboru nastaví exit kód programu a ukončí se vyhodnocování.

### 3.3.2 Inicializace systému PerfEval

Před použitím systému PerfEval k vyhodnocování je nutné jej inicializovat. Účelem inicializace je vytvoření konfiguračního souboru a databáze pro ukládání informací o výsledcích měření. Tyto soubory jsou potřebné pro fungování systému PerfEval v rámci vybraného projektu.

Kroky inicializace jsou následující:

1. Zjištění zdali adresář podléhá správě verzí systému Git

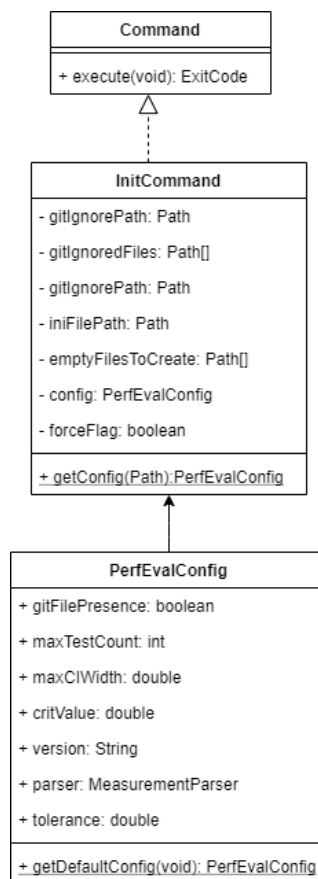


Obrázek 3.1: Objektový návrh části PerfEval pro porovnávání výsledků měření

2. Vytvoření adresáře .performance
3. Vytvoření konfiguračního souboru config.ini s výchozími hodnotami
4. Vytvoření databáze pro ukládání výsledků měření

Při každém spouštění dalšího příkazu systému PerfEval je pak načtena konfigurace z konfiguračního souboru. Při vyhodnocování výkonu se načítají výsledky měření společně s metadaty o verzi, ke které se měření vztahuje. Tato metadata jsou uložena ve zmíněné databázi.

Pomocí těchto kroků je systém PerfEval inicializován pro další použití. Na následujícím obrázku je vidět objektový návrh části systému PerfEval, která se stará o inicializaci systému. Hlavní třídou je třída `InitCommand`, která provádí výše zmíněné kroky inicializace v rámci metody `execute`. Protože třída inicializace se



Obrázek 3.2: Objektový návrh části PerfEvalu pro inicializaci

provádí pomocí příkazu `init`, tak je třída `InitCommand` implementací rozhraní `Command`. Třída `PerfEvalConfig` reprezentuje obsah konfiguračního souboru.

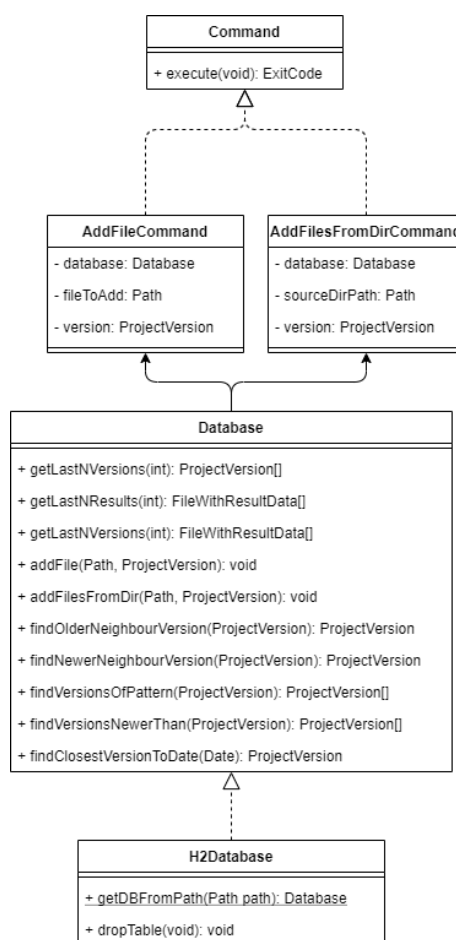
### 3.3.3 Přidávání nových výsledků testů

Uživatel musí každý výsledek měření výkonu zaznamenat do systému PerfEval. Pokud výsledek měření nebude zaznamenán, tak s ním PerfEval nebude vůbec pracovat. 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 H2 databáze 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 PerfEval 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 PerfEval v systémech Linux. Pro kompilaci a sestavení v systémech Windows je určený spustitelný soubor `gradlew.bat`.

- Instalace v systému Linux: `./gradlew build`
- Instalace v systému Windows: `gradlew.bat build`

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. Tyto skripty se nachází taktéž v adresáři se zdrojovým kódem.

- Spuštění v systému Linux: `./perfeval.sh`
- Spuštění v systému Windows: `perfeval.bat`

## 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 zadána 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 zadána 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

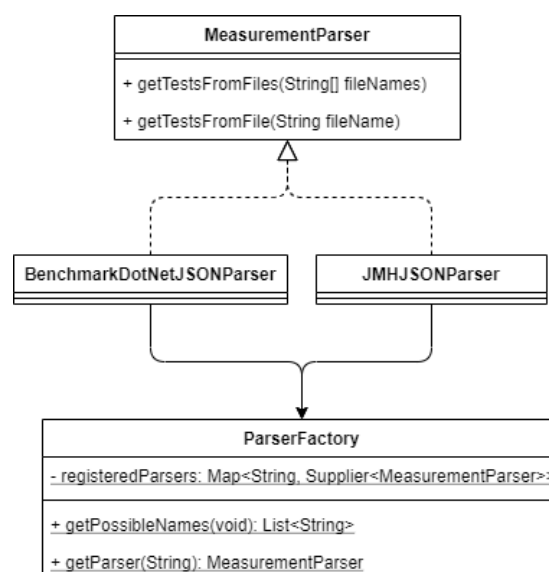
## 5.1 Architektura systému

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`.

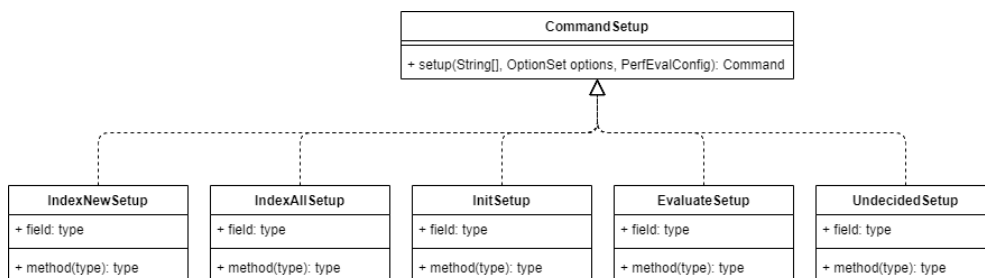
### 5.1.1 Použité návrhové vzory

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`.



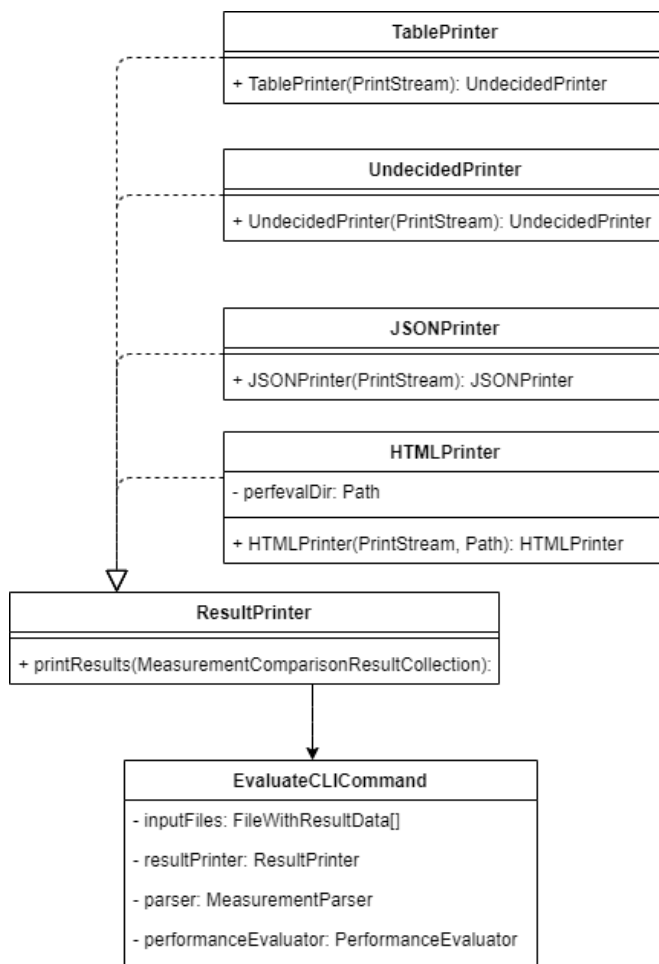
Obrázek 5.1: Struktura části PerfEval - návrhový vzor factory

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



Obrázek 5.2: Struktura části PerfEval - návrhový vzor builder

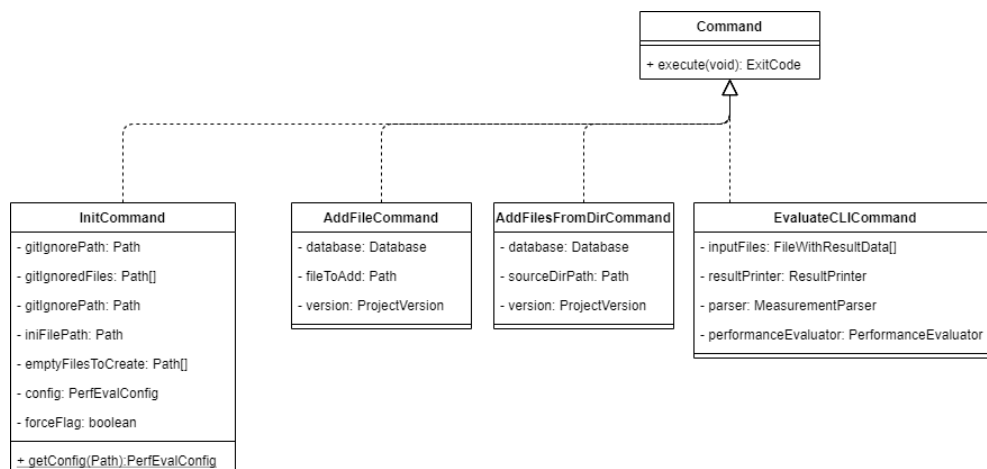
Dalším použitým návrhovým vzorem je strategy. Tento návrhový vzor je využitý při volbě statistického testu, který se bude používat pro vyhodnocení, a pro volbu toho, jakou podobu výstupu má program vyrobit. Na obrázku s příkladem tříd jsou vidět jednotlivé strategie pro volbu formy výstupu.



Obrázek 5.3: Struktura části PerfEval - 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

Třidu **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`. Rozpoznávají 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 instancí třídy `AddFileCommand` vrací metoda `setup`.

`IndexAllSetup` je třída pro přípravu instance `AddFilesFromDirCommand`. Té je při konstrukci dodána implementace rozhraní `Database` a 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 instancí 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 `PerformanceEvaluatoru`, `ResultPrinteru`, `MeasurementParseru` 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 vypsaní 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 instancí třídy `ListResultsCommand` vrací.

### 5.1.3 Command třídy

V této podkapitole je popsán 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 `MeasurementParseru` 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 popsán 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 měřicím 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 typu `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 `MeasurementParseru` 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 PerfEval 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 `resolveStatisticTest` 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 `PerfEval` 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 PerfEval na skutečném projektu.

#### Jednoduché použití PerfEval

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
```

## Použití PerfEvalu v průběžné integraci

Systém PerfEval je možné po vzoru unit testů používat při průběžné integraci. V příkladu níže je uvedeno, jak může vypadat soubor `.gitlab-ci.yml` pro GitLab CI. Uvedený vzor ilustruje, jak dodat výsledky měření do systému PerfEval a jak následně spustit vyhodnocení výsledků měření dvou verzí.

Skripty `measure_old_version.sh` a `measure_new_version.sh` v uvedeném příkladu simulují měření výkonu, tak že přečtou výsledky z předem připravených souborů. Tyto připravené soubory jsou výsledky měření, které byly získány spuštěním výkonostních testů projektu Crate Lutz a kol. (2024).

Výsledek porovnání je zde uložen do souboru `junit-report.xml`. Tento soubor je ve formátu JUNIT XML. Tento formát je běžně přijímaný nástrojem Git v rámci průběžné integrace.

```

image: openjdk:21-jdk

stages:
  - test

variables:
  JUNIT_REPORT_PATH: junit-report.xml

build:
  stage: test
  script:
    - bash measure_old_version.sh >
      old_measurement.json
    - bash measure_new_version.sh >
      new_measurement.json
    - bash perfeval.sh init --benchmark-parser
      JMHJSONParser
    - bash perfeval.sh index-new-result --
      version 1.0 --path ./old_measurement.
      json
    - bash perfeval.sh index-new-result --
      version 2.0 --path ./new_measurement.
      json
    - bash perfeval.sh evaluate --t-test --
      junit-xml-output > $JUNIT_REPORT_PATH

  artifacts:
    when: always
    paths:
      - $JUNIT_REPORT_PATH
    reports:
      junit: $JUNIT_REPORT_PATH
    expire_in: 1 week

```

## 6.2 Nasazení systému v praxi

V této kapitole bude ukázáno, jak systém PerfEval funguje při svém nasazení. Pro ukázkou 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 obsahuje 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 přidána 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 přidána 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 f626ec8918422ca0cb6ada5aa7fc601bbbf53fa - 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 PerfEval 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 nastavení 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.measureConsumeHashInnerJoin`
- `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: 5a619461d9b0d6fd812586612f3598e9f91fb1d529

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_StringUtf8-ParseLong_Invalid	0.00000 us/op	0.00000 us/op	+21.44	different distribution	OK
icoat.benchmarkIntervalAggregation	684 us/op	696 us/op	+1.83	different distribution	OK
icoah.benchmarkKHLPlusPlusMurmur128	316 us/op	320 us/op	+1.30	different distribution	OK
icdfjr.measureConsumerHashCollisions	0.000 ms/op	0.000 ms/op	-0.81	different distribution	OK
icap.measure_parse_ana1an_simple_select	14.0 us/op	13.0 us/op	-2.08	different distribution	OK
icdfjr.measureConsumerNestedLoopJoin	81.0 ms/op	82.0 ms/op	+1.90	different distribution	OK
iccs.measure_StringUtf8-ParseLong_Invalid	0.000 us/op	0.000 us/op	+18.61	different distribution	OK
icdfjr.measureConsumerHashInnerJoin	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.measureConsumerNestedBatchIterator	224 ms/op	224 ms/op	-0.04	same distribution	OK
icoah.benchmarkKHLAggregationOffHeap	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
iceea6.measureGroupBySumLong	626 ms/op	631 ms/op	+0.86	different distribution	OK
iceec0.measureLoadAndCnBatchIterator	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
icdfjr.measureConsumerBlockNestedLoopJoin	116 ms/op	114 ms/op	-1.73	different distribution	OK
iceea6.measureGroupingOnNumericDocValues	410 ms/op	409 ms/op	-0.20	same distribution	OK
iceea6.measureGroupingOnNumericDocValues	441 ms/op	444 ms/op	+0.67	different distribution	OK
iceerj.measureFileReadingIteratorForJoin	14.0 us/op	14.0 us/op	+1.58	different distribution	OK
icoah.benchmarkKHLPlusPlusMurmur64	295 us/op	298 us/op	+1.16	different distribution	OK
iceedms.measurePagingIteratorWithoutRepeat	12.0 ms/op	13.0 ms/op	+12.25	different distribution	OK
icoah.benchmarkKHLAggregationOnHeap	498 us/op	500 us/op	+0.39	same distribution	OK
iceedms.measurePagingIteratorWithoutRepeat	17.0 ms/op	17.0 ms/op	-0.24	different distribution	OK
iceea6.measureGroupByMinString	639 ms/op	608 ms/op	-4.81	different distribution	OK
iceea6.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
iceea4.measureAggregatedCollector	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
icdfjr.measureConsumerNestedLoopLeftJoin	116 ms/op	114 ms/op	-1.62	different distribution	OK
icap.measure_parse_and_vye_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: 5ad19461d9b0bdf812586612f5398ef91fb1d529

Name	NewAverage	OldAverage	Change [%]	Comparison result	Comparison verdict
=====					
icel.currentTimeInNextGen	0.0000 us/op	0.0000 us/op	-5.46	different distribution	OK
icoal.benchmarkIntervalAggregation	684 us/op	696 us/op	+1.83	different distribution	OK
iccs.measure_StringUtf~ParseLong_invalid	0.00000 us/op	0.00000 us/op	+21.44	different distribution	OK
icoah.benchmarkLLP1usPlusMurMur128	316 us/op	320 us/op	+1.30	different distribution	OK
icap.measure_parse_anawlan_simple_select	14.0 us/op	13.0 us/op	-2.08	different distribution	OK
icdjr.measureConsumer~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.measureConsumer~stedLoopJoin	81 ms/op	82 ms/op	+1.90	different distribution	OK
iccs.measure_StringUtf~yParseLong_valid	0.000 us/op	0.000 us/op	+18.61	different distribution	OK
icoah.benchmarkHLAggregationOffHeap	538 us/op	540 us/op	+0.33	same distribution	OK
iceeccl.measureConsumer~neBatchIterator	224 ms/op	224 ms/op	-0.04	same distribution	OK
ice.dml.IndexerBenchmark.measure_index	789 us/op	775 us/op	-1.81	different distribution	OK
icdjr.measureConsumer~hashInnerJoin	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
iceenj.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.measurePagingIteratorWithoutRepeat	12.0 ms/op	13.0 ms/op	+12.25	different distribution	OK
icoah.benchmarkHL1usPlusMurMur64	295 us/op	298 us/op	+1.16	different distribution	OK
icoah.benchmarkHLAggregationOnHeap	498 us/op	500 us/op	+0.39	different distribution	OK
icdjr.measureConsumer~BlockNestedLoopJoin	116 ms/op	114 ms/op	-1.73	different distribution	OK
iceeag.measureGroupingOn~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.currentTimeInInitial	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.measureConsumer~stedLoopLeftJoin	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.
- SHIPILĚV, 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](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](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

1.1	Příklad části výstupu frameworku BenchmarkDotNET . . . . .	4
2.1	Struktura výsledků měření frameworku BenchmarkDotNET . . .	8
2.2	Struktura výsledků měření frameworku JMH . . . . .	9
3.1	Objektový návrh části PerfEvaly pro porovnávání výsledků měření	19
3.2	Objektový návrh části PerfEvaly pro inicializaci . . . . .	20
3.3	Objektový návrh části PerfEvaly pro přidávání výsledků měření .	21
5.1	Struktura části PerfEvaly - návrhový vzor factory . . . . .	26
5.2	Struktura části PerfEvaly - návrhový vzor builder . . . . .	27
5.3	Struktura části PerfEvaly - návrhový vzor strategy . . . . .	27
5.4	Struktura části PerfEvaly - návrhový vzor command . . . . .	28
6.1	Výsledek porovnání výkonu metod projektu Crate s tolerancí 0,05	40
6.2	Výsledek porovnání výkonu metod projektu Crate s tolerancí 0,1 .	41



# Seznam tabulek

# Seznam použitých zkratek

## A. Přílohy

### A.1 První příloha