

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Стефана Церовина

**ВИРТУЕЛНА МАШИНА ДАРТИНО-  
ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА  
ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ  
МИПС**

мастер рад

Београд, 2016.

**Ментор:**

др Милена ВУЛОШЕВИЋ ЈАНИЧИЋ  
Универзитет у Београду, Математички факултет

**Чланови комисије:**

др Саша МАЛКОВ  
Универзитет у Београду, Математички факултет

др Филип МАРИЋ  
Универзитет у Београду, Математички факултет

Датум одбране: \_\_\_\_\_

*Брату, маме и тати*

**Наслов мастер рада:** Виртуелна машина Дартино- имплементација интерпретатора за платформу МИПС

**Резиме:**

**Кључне речи:** МИПС, систем са уграђеним рачунаром, интерпретатор,

# Садржај

<b>1</b>	<b>Увод</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>МИПС</b>	<b>3</b>
2.1	ЦИСК и РИСК . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Програмски језик Дарт</b>	<b>5</b>
3.1	Уопштено . . . . .	5
3.2	Карактеристике . . . . .	5
3.3	Специфичности у односу на јаваскрипт . . . . .	5
3.4	Платформе . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Дартино</b>	<b>6</b>
4.1	Опис виртуелне машине . . . . .	6
4.2	Модел програмирања . . . . .	9
4.3	Значајне карактеристике . . . . .	9
4.4	Најзначајније библиотеке . . . . .	15
4.5	Покретање Дарт програма унутар виртуелне машине . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Имплементација интерпретатора за платформу МИПС</b>	<b>19</b>
5.1	Имплементација у програмском језику Ц++ . . . . .	19
5.2	Дартино стек . . . . .	25
5.3	Систем за дебаговање . . . . .	27
5.4	Тестирање и резултати . . . . .	29
5.5	Пример апликације у програмском језику Дарт . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Закључак</b>	<b>34</b>
	<b>Библиографија</b>	<b>35</b>

# Глава 1

## Увод

Појам „Интернет ствари” (енг. *Internet of things*), скраћено ИоТ (енг. *IoT*), се све чешће среће, и он представља модел повезаности објеката који чине систем у оквиру којег објекти међусобно комуницирају. Реч „ствар” у оквиру појма „Интернет ствари” се односи на систем са уграђеним рачунаром (енг. *embedded system*) који преноси и прима информације путем мреже. Системи са уграђеним рачунаром су системи специјалне намене, који обављају једну или више функција које тој намени одговарају (паметни телефони, дигитални сатови, паметне утичнице, МПЗ плејери, штампачи, дигиталне камере и друго). Модерни системи са уграђеним рачунаром су углавном базирани на микроконтролерима, а ређе на микропроцесорима, зато што микроконтролере карактерише ефикасно управљање процесима у реалном времену, масовна производња, ниска цена и мала потрошња електричне енергије. Сматра се да је потенцијал за развој индустрије система са уграђеним рачунаром велики, и да је будућност у изградњи велики ИоТ система.

Развијање апликација за системе са уграђеним рачунаром се обично своди на програмирање у асемблеру или у програмском језику Ц (енг. *C*). Најчешће се користе компилатори ГЦЦ (енг. *GCC*) или ЛЛВМ (енг. *LLVM*), а од алата за дебаговање, обично алат ГДБ (енг. *GDB*). Развојно окружење се најчешће налази на другом рачунару, јер микроконтролер садржи малу количину РАМ и флеш меморије, па се на њему обично не може покренути ниједан регуларни оперативни систем, а и микролинукс често захтева више РАМ меморије од оне којом микроконтролер располаже. Због наведених услова, процес развоја апликација је доста захтеван, подложен грешкама па због тога и спор.

Пошто се веб апликације много брже развијају од апликација за системе

са уграђеним рачунаром, компанија Гугл (енг. *Google*) је дошла на идеју да омогући програмирање система са уграђеним рачунаром у вишем програмском језику Дарт, за који постоји подршка за развој веб, серверских и мобилних апликација. Више о програмском језику Дарт биће речено у поглављу 3.

Дарт је прилагођен специфичностима микроконтролера кроз нову библиотеку „dartino”. Тако је настала виртуелна машина Дартино, са намером да се програмирање система са уграђеним рачунаром олакша и приближи што већем броју програмера. Дартино омогућава писање апликација за мале микроконтролере, на језику који доста личи на Ц, али је објектно-оријентисан и садржи разне погодности које процес имплементације доста олакшавају, те се апликације могу развијати брже и ефикасније. Ова виртуелна машина је детаљније описана у поглављу 4.

У оквиру Дартино виртуелне машине постојала је подршка за микроконтролере са Интел и Арм архитектуром процесора. Због широке распрострањености МИПС процесора у системима са уграђеним рачунаром, у оквиру овог рада развијен је интерпретатор за платформу МИПС који је и званично интегрисан у Дартино пројекат. Имплементација интерпретатора описана је у поглављу 5, док се о платформи МИПС више може прочитати у поглављу 2.

## Глава 2

## МИПС

### 2.1 ЦИСК и РИСК





## Глава 3

# Програмски језик Дарт

### 3.1 Уопштено

### 3.2 Карактеристике

Приватност

Конкурентност

Грешке и упозорења

Променљиве

Функције

Оператори

Класе

Интерфејси

Енумерације

Генерици

Уграђени типови

Библиотеке

### 3.3 Специфичности у односу на јаваскрипт

5

### 3.4 Платформе

## Глава 4

# Дартино

У овом поглављу биће описана Дартино виртуелна машина. На почетку је описано чему служи Дартино и које су компоненте виртуелне машине. Након тога је представљен модел програмирања. У трећем одељку су представљене значајне карактеристике и новине ове виртуелне машине: паралелизам, корутине, изолате, влакна итд. Након тога описане су најзначајније библиотеке у оквиру Дартина и чему оне служе. На крају је описана употреба Дартина из командне линије и улога Дарта и Дартина при покретању програма.

### 4.1 Опис виртуелне машине

Виртуелна машина представља софтверску симулацију физичког рачунара. У зависности од употребе и степена сличности са физичким рачунаром, виртуелне машине се деле на виртуелне машине за симулирање система и виртуелне машине за симулирање процеса.

Дартино виртуелна машина представља виртуелну машину за симулирање процеса. Виртуелне машине за симулирање процеса додају слој изнад оперативног система, који служи за симулирање програмског окружења, које је независно од платформе, и у оквиру ког се може извршавати један процес. Извршавање више процеса може се постићи креирањем више инстанци виртуелне машине. Овај тип виртуелних машина обезбеђује висок ниво апстракције. Програми се пишу у програмском језику вишег нивоа, и могу се извршавати на различитим платформама. Имплементација виртуелне машине се заснива на интерпретатору.

Као што је речено у уводу, Дартино виртуелна машина је настала са циљем

да се писање апликација за микроконтролере олакша. Како би се направило боље окружење за рад, потребна је отворена и приступачна платформа, која ће већини програмера бити позната. Потребно је омогућити и статичку анализу кода, допуњавање кода, библиотеке са разним функционалностима, и тиме развијање апликација учинити ефикаснијим.

Пре Дартина је било могуће програмирати микропроцесоре у Дарту, али не и микроконтролере. Због мале количине меморије и мале брзине микроконтролера, виртуелне машине које се на њих смештају морају бити што једноставније. Виртуелна машина обично садржи компилатор изворног кода, некакву компоненту за извршавање, сакупљач отпадака, омогућује препознавање класа и објеката (објектни модел), и има подршку за дебаговање. Како би се уклопила у поменута ограничења које намећу миктроконтролери, Дартино виртуелна машина је поједностављена тиме што не садржи компилатор. Она садржи преостале четири компоненте, које су неопходне када је у питању виши програмски језик као што је Дарт. Направљен је систем у коме су компилатор и окружење за извршавање раздвојени, као што је случај код ГЦЦ-а или ЛЛВМ-а, при чему је систем за дебаговање поједностављен и смањен.

За програмски језик Дарт постоји Дарт виртуелна машина, која се користи за веб програмирање. У оквиру Дартина је искоришћен постојећи ЈИТ компилатор за Дарт, који се покреће помоћу Дарт виртуелне машине. Тај компилатор може да се налази било где, обично на рачунару где се развија апликација, и он комуницира са окружењем за извршавање које се потенцијално налази на другом систему (микроконтролеру). Интерфејс за комуникацију је једноставан, јер окружење за извршавање мора бити веома једноставно, како би одговарало карактеристикама миктроконтролера.

Окружење за извршавање садржи командни АПИ, преко ког му компилатор може затражити да уради одређене задатке. Испод тога се заправо налази стек машина, тако да се путем овог АПИ-ја може поставити ново стање на стек окружења за извршавање, могу се правити класе, и дефинисати објекти и методе. Стек машина представља виртуелну машину код које је меморијска структура представљена као стек. То значи да се операције извршавају скидањем операнада са стека, применом операције и уписивањем резултата на стек. Компилатор класама може доделити идентификаторе, помоћу којих при примању објекта назад, може утврдити којој класи објекат припада. На који начин компилатор комуницира са окружењем за извршавање приказано је на слици

### 4.1.



Слика 4.1: Комуникација ЈИТ компилатора и окружења за извршавање

Сва комуникација се врши преко жичног протокола, тако да је омогућено удаљено извршавање, и обично је базирано на TCP/IP протоколу. На овај начин велики део посла се пребацује на компилатор, а окружење за извршавање се максимално упрощава.

Помоћу протокола за комуникацију компилатора и окружења за извршавање, може се постављати структура програма, што обухвата:

1. Додавање нових класа на стек окружења за извршавање
2. Додавање нових метода на стек окружења за извршавање

Може се мењати структура програма, што обухвата:

1. Мењање табела метода

Може се рећи „од овог тренутка желим да ова класа поред метода А има и метод Б”. То значи да је омогућена висока интерактивност са системом.

2. Мењање шема

Мењање шема се односи на мењање класе, нпр. додавањем нових поља. Оно што се дешава у тој ситуацији је да се врши пролаз кроз све инстанце класе, и оне се ажурирају и прилагођавају новом формату класе.

3. Дебаговање У оквиру дебаговања, могуће је:

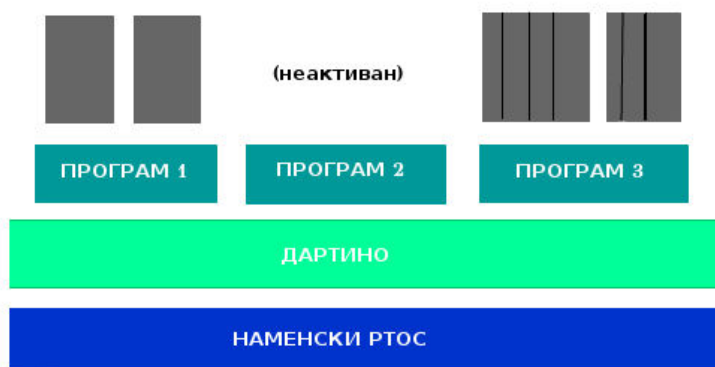
- а) Покретање дебагера
- б) Постављање зауставних тачака

### с) Рестартовање дебагера

Систем за дебаговање је једноставан и ограничен, јер не зна ништа о изворном коду.

## 4.2 Модел програмирања

Доњи слој чини традиционални оперативни систем са уграђеним рачунаром у реалном времену (нпр. Фри РТОС). Изнад тога се налази Дартино окружење за извршавање, које може извршавати више програма, независно, и они не морају знати ништа једни о другима. Ово се разликује од уобичајених система који раде на оперативном систему уграђеног рачунара, и који обично не могу да извршавају више независних компоненти, на независан начин. За сваки програм можемо имати више процеса, више инстанци програма, или делова програма, који се извршавају конкурентно.



Слика 4.2: Модел програмирања

На слици 4.2 је приказана ситуација када имамо 3 програма. Програм2 се тренутно не извршава, за Програм1 су покренуте две инстанце, док се Програм3 извршава у 7 нити.

## 4.3 Значајне карактеристике

У наставку су наведене најзначајније карактеристике Дартино виртуелне машине.

### 1. Лаки процеси

За сваки процес нам је потребно мало меморије, неколико стотина бајтова. Сав код и подаци у меморији се деле, па меморију заузимају само подаци који представљају процес. На овај начин ради већина оперативних система, али је то новина за оперативне системе са уграђеним рачунаром.

### 2. Блокирање процеса

Процес се може блокирати, при чему се не заузимају ресурси, већ се главна нит враћа систему. Разлог за то је што у системима са уграђеним рачунаром обично имамо мали фиксирани број нити, па не желимо да их блокирамо.

### 3. Конкурентни процеси

Уколико процесор има више језгара, процеси се могу извршавати конкурентно.

```
main() {
    for (int i = 0; i < 4000; i++) {
        Process.spawn(hello(i));
    }
}
void hello(n) {
    print("Hello from \${i}");
}
```

Код 1: Креирање конкурентних процеса методом `Process.spawn`

Код 1 приказује покретање 4000 независних процеса за исписивање поздравне поруке, који ће бити распоређени на одређени број језгара и извршавати се конкурентно. Сваки процес има своју хип меморију, а са осталим процесима може комуницирати само слањем порука. Дартино веома добро распоређује велики број процеса на много мањи број језгара. *Process.spawn* креира нови процес и покреће га.

У коду 2 се креира `ServerSocket` који представља сервер, затим се помоћу метода *spawnAccept* креира нови процес. У оквиру тог процеса се чека да клијент успостави конекцију са сервером, и самим тим блокира даље извршавање док се конекција не успостави. При успостављању конекције,

```
var server = new ServerSocket("127.0.0.1", 0);
while(true) {
    server.spawnAccept((Socket socket){
        //izvrsava se u novom procesu
        socket.send(UTF.encode("Hello"));
        socket.close();
    })
}
```

Код 2: Манипулисање надолазећим конекцијама методом `spawnAccept`

клијент (*socket*) шаље серверу (*server*) поздравну поруку. Издвајање комуникације у нови процес је потребно вршити увек када се врши неко комплексније израчунавање пре слања поруке.

#### 4. Комуникација

Комуникација између процеса се обавља слањем порука, помоћу канала и портова. Канал представља један ред порука. Порт представља могућност слања поруке каналу, и без приступа одеђеном порту, не може се слати порука каналу који чека на другој страни порта.

```
final channel = new Channel();
final port = new Port(channel);
Process.spawn(() {
    int i=0;
    while(i < 50) {
        port.send(i++);
    }
});
while(true) {
    print(channel.receive());
}
```

Код 3: Комуникација процеса слањем порука на одређени канал

Код 3 приказује један процес који шаље поруке, и функцију *print* која блокира извршавање све док не прими следећу поруку и испише је.

#### 5. Дељено непроменљиво стање између процеса

Процеси деле само објекте који се не мењају, и то на следећи начин:

а) Сваки непроменљиви објекат се може слати као порука, без копирања



- б) Више процеса могу користити(читати) исти објекат истовремено
- с) Нема потребе за експлицитним примитивама за синхронизацију, јер мењање објеката није омогућено

### 6. Изолате

Изолате (енг. *Isolates*) су независни воркери (енг. *Worker* <sup>1</sup>), свака изолата има своју хип меморију, и за разлику од нити нема дељења меморије између изолата. Изолате комуницирају само преко порука. Могу се паузирати, наставити и убити.

```
main() {
  Expect.equals(1597, fib(16));
  Expect.equals(4181, fib(18));
}

fib(n) {
  if (n <= 1) return 1;
  var n1 = Isolate.spawn(() => fib(n - 1));
  var n2 = Isolate.spawn(() => fib(n - 2));
  return n1.join() + n2.join();
}
```

Код 4: Употреба изолата

Код 4 приказује пример употребе изолата за рачунање елемената Фибоначијевог низа, рекурзивно. Покрећу се две независне изолате и на крају се спаја резултат.

### 7. Влакна

Влакна (енг. *Fibers*) представљају нити извршавања у оквиру једног процеса, које деле спољну меморију, али не деле непроменљиву меморију. Извршавају се конкурентно, тако да нема паралелизма. Омогућују да више независних нити једног процеса могу чекати на исту ствар(блокирати) независно једна од друге. На овај начин се имплементира вишеструка одвојена контрола тока.

Код 5 приказује употребу два влакна. У оквиру једног се чека на промену вредности у сензору за температуру, док се у оквиру другог чека на промену вредности у сензору за влажност ваздуха. Функција *publishOnChange*

---

<sup>1</sup>Појам који означава нешто између процеса и нити. Извршава се у позадини и тиме не утиче на одзивност система.

```
void publishOnChange(Socket socket, String property, Channel input){
    int last = 0;
    while(true){
        int current = input.receive();
        if(current != last)
            socket.send(UTF.encode('("$property": \"$current)'));
        last = current;
    }
}

Fiber.fork(() => publishOnChange(server, "temperature", tempSensor));
Fiber.fork(() => publishOnChange(server, "humidity", humSensor));
```

Код 5: Пример употребе два влакна која чекају на функцију `publishOnChange`, при чему не зависе једно од другог

блокира извршавање док се у сензору за који је позвана не деси промена вредности. На овај начин је омогућено да се у оквиру једног процеса чека на више ствари, и нема паралелизма, већ се уколико дође до блокирања у једном влакну, прелази на извршавање следећег који је спреман за извршавање.

## 8. Корутине

Дартино има уграђену подршку за корутине. Корутине су објекти налик на функције, које могу давати више вредности, па су веома сличне генераторима. Када корутина врати вредност, зауставља се на тренутној позицији, а њен стек извршавања се чува за касније покретање. Када врати последњу вредност, сматра се завршеном, и више се не може покретати.

## 9. Динамичко отпремање метода (енг. *Dynamic dispatch*)

Динамичко отпремање метода се односи на позивање полиморфних метода класа, при чему се који метод треба позвати разрешава у фази извршавања, а не у фази превођења. Прави се табела отпремања, која се имплементира као низ, у који се сваки метод, сваке класе, смешта на своју позицију. Позиција метода у табели се рачуна помоћу редног броја класе и позиције метода. У току извршавања, на основу ове табеле се одлучују који метод треба позвати. Оно што је неопходно при добијању одређеног метода из табеле, је провера да ли је резултат заправо оно што нам треба. Уколико није, значи да тражени метод одређене класе не постоји.

```
var co = new Coroutine((x) {  
    Expect.isTrue(co.isRunning);  
    Expect.equals(1, x);  
    Expect.equals(2, Coroutine.yield(4));  
    Expect.isTrue(co.isRunning);  
});  
  
Expect.isTrue(co.isSuspended);  
Expect.equals(4, co(1));  
Expect.isTrue(co.isSuspended);  
Expect.isNull(co(2));  
Expect.isTrue(co.isDone);
```

Код 6: Употреба корутина

Загарантовано је константно време отпремања, и табела отпремања се израчунава пре извршавања, па представља део апликације.

```
class A {  
    metod1();  
}  
class B extends A {  
    metod2();  
}  
class C extends B {  
    metod1();  
}  
class D extends A {  
    metod3();  
}
```

Код 7: Пример хијерархије класа помоћу ког се илуструје генерисање табеле отпремања метода

У коду 7 је представљено неколико класа којима се преклапају методи. Процес генерисања табеле отпремања је следећи: Класама редом придружимо бројеве: 0, 1, 2 и 3. Методима придружимо позиције на мало компликованији начин: методу *metod1*, који је дефинисан у највећем броју класа, придружимо позицију 0, и он се смешта на почетак табеле. Методу *metod2* придружимо позицију 3, и методу *metod3* придружимо 4. Позиције морају бити јединствени бројеви, како не би дошло до преклапања метода. Пример табеле отпремања за ове класе приказан је на слици 4.3. Приметимо да се могу појавити празне позиције у табели.

A	B	C	D	B	C		D
A.metod1	A.metod1	C.metod1	A.metod1	B.metod2	B.metod2		D.metod3
0	1	2	3	4	5	6	7

Слика 4.3: Табела отпремања за класе у примеру 7

## 4.4 Најзначајније библиотеке

Ради прилагођавања програмског језика Дарт специфичностима микроконтролера, развијена је нова библиотека „*dartino*”. Она се састоји из више мањих библиотека, а неке од најзначајних су описане у наставку.

1. **file** - Интерфејс за рад са датотекама. Подржано само када се Дартино извршава на ПОСИКС платформи.
2. **ffi** - „foreign function interface” библиотека која омогућава да се из Дарт кода позивају функције дефинисане у неком другом програмском језику, нпр. функције програмског језика Ц.
3. **http** - Имплементација ХТТП (енг. *HTTP - HyperText Transfer Protocol*) клијента.
4. **mbedtls** - ТЛС (енг. *TLS - Transport Layer Security*) подршка, базирана на mbedtls. Ово се може користити на исти начин као нормални сокет (и да се прослеђује ХТТП пакету).
5. **mqtt** - MQTT клијентска библиотека за MQTT протокол, ИоТ протокол за размену порука заснован на објављивању/претплати.
6. **os** - Приступ оперативном систему. Подржано када се Дартино извршава на ПОСИКС платформи.
7. **socket** - Дартино имплементација ТЦП (енг. *TCP - Transmission Control Protocol*) и УДП (енг. *UDP - User Datagram Protocol*) сокета
8. **stm32** - Подршка за STM32 плоче.

## 4.5 Покретање Дарт програма унутар виртуелне машине

Примарни начин за комуникацију са Дартино виртуелном машином је преко команде **dartino**. Ова команда комуницира са процесом који се извршава а не захтева интеракцију са корисником (енг. *persistent process*), који ради сав тежи посао. Помоћу њега **dartino** компајлира програм, а помоћу Дартино виртуелне машине ( **dartino-vm**) извршава и дебагује програме .

Нешто више о извршним фајловима које се користе при покретању програма:

### 1. **dartino**

Ова команда је C++ програм. Намера је била да буде што једноставнији програм који једноставно прослеђује стандардне улазно/излазне сигнале процесу који се извршава а не захтева интеракцију, преко сокета. Ово је мали извршни фајл за покретање компилатора. Компилатор је написан у Дарту и извршава се у оквиру Дарт виртуелне машине. То је ЈИТ компилатор.

### 2. **dartino-vm**

Самостална виртуелна машина која подржава превођење програма и покретање програма из бајткода.

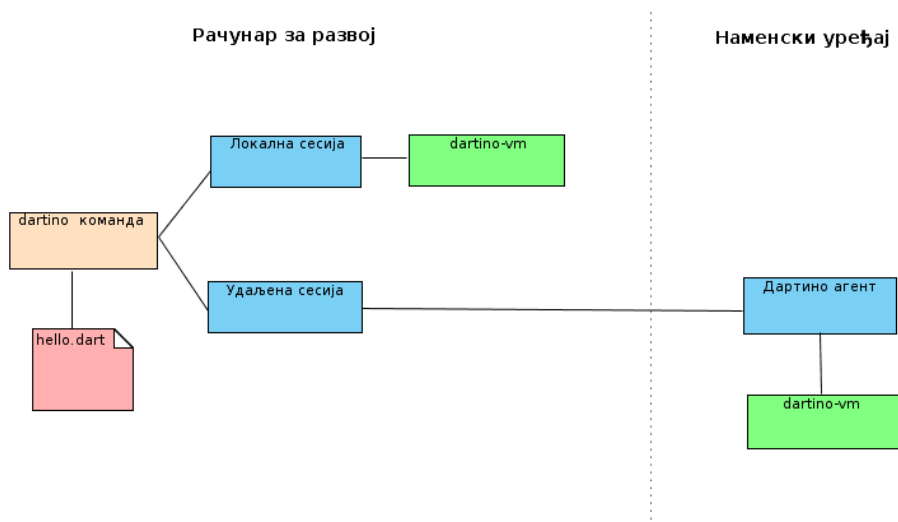
### 3. **dart**

Процес који се извршава а не захтева интеракцију са корисником. То је Дарт програм: Класична Дарт виртуелна машина за покретање компилатора. Овај извршни фајл се не генерише у оквиру Дартина, већ је део Дарта. Процес се састоји из главне нити, и неколико воркера. Главна нит ослушкује надолазеће конекције из **dartino** команде, и може да користи воркере да обави тражени задатак.

Шта се заправо дешава када се покрене команда **dartino run hello.dart**? Дартино је подразумевано повезан на локалну сесију, која је повезана на локалну виртуелну машину која ради на нашем рачунару. **dartino** преводи код до бајткода, помоћу Дарт компилатора, а онда га прослеђује **dartino-vm** која

га извршава. Дартино виртуелна машина враћа резултат назад Дартину, и он га приказује.

Дартино подржава више сесија. Свака сесија може бити придружена различитој Дартино виртуелној машини, што омогућује кориснику да тестира више различитих уређаја истовремено. Тренутно је руковање сесијама експлицитно.



Слика 4.4: Процес извршавања програма

Покретање програма у оквиру одређене сесије је омогућено на следећи начин:

```
./out/DebugXMIPS/dartino create session my_session
```

Креирање нове сесије „my\_session”.

Након тога морамо да покренемо дартино виртуелну машину:

```
./out/DebugXMIPS/dartino-vm
```

Након чега се исписује порука типа „Waiting for compiler on 127.0.0.1:61745”. 61745 представља рандом генерисани порт.

У новом терминалу се прикачимо на дати сокет:

```
./out/DebugXMIPS/dartino attach tcp_socket 127.0.0.1:61745 in session my_session
```

А затим покренемо жељени програм у оквиру те сесије:

```
./out/DebugXMIPS/dartino run hello.dart in session my_session
```

Сесија се прекида помоћу следеће команде:

`./out/DebugXMIPS/dartino x-end session my_session`

## Глава 5

# Имплементација интерпретатора за платформу МИПС

У овом поглављу биће описан поступак имплементације интерпретатора за платформу МИПС, кроз делове кода и тест примере за које су одређене целине имплементирани. Након тога биће описан стек Дартино виртуелне машине, а затим и имплементирани систем за дебаговање. На крају ће бити описани још неки значајни тест примери, резултати тестирања на постојећем скупу тестова и апликација у језику Дарт имплементирана за потребе упоређивања перформанси интерпретатора.

### 5.1 Имплементација у програмском језику Ц++

Имплементација је рађена на рачунару са Интел x86 процесором, крос-компилацијом, при чему је циљна архитектура МИПС32Р2. У почетку развоја, постојао је мултинаменски интерпретатор, који не зависи од архитектуре. Требало је само конфигурисати Дартино за платформу МИПС, и тиме би превођење за МИПС било омогућено. Конфигурисање подразумева додавање опције „mips” у списку подржаних архитектура и додавање опција које се користе приликом превођења. Да би се при превођењу добио одговарајући извршни фајл, било је неопходно гцц-у проследити аргументе који указују на МИПС архитектуру: *-mips32r2*, *-EL*, и линкеру проследити *-EL*, што указује на литл ендиан (енг. *little endian*<sup>1</sup>). Да би се у фази линковања користиле МИПС библиотеке,

---

<sup>1</sup>Начин записа података у меморији тако да је на нижој адреси нижи бит меморијске речи.



## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

постављене су путање до њих. МИПС извршне датотеке се покрећу помоћу КЕМУ (енг. *QEMU* - *Quick Emulator*) емулятора у корисничком режиму<sup>2</sup>. Да би се то вршило аутоматски, неопходно је команди **update-binfmts** проследити вредности које одговарају мипс ЕЛФ (енг. *ELF* - *format of Executable and Linking Format* <sup>3</sup>) датотекама, и путању до скрипте која покреће КЕМУ емулятор. На овај начин ће се при покретању извршних датотека чије се меџик (енг. *magic*) и маск (енг. *mask*) вредности поклапају са овим, покретање извршити помоћу КЕМУ емулятора за МИПС. Команда са одговарајућим аргументима је представљена кодом 8, док је скрипта која покреће КЕМУ представљена кодом 9.

```
sudo update-binfmts --install qemu-mipsel /<skripta>
--magic '\x7fELF\x01\x01\x01\x00\x00\x00\x00
        \x00\x00\x00\x00\x00\x02\x00\x08\x00'
--mask '\xff\xff\xff\xff\xff\xff\xff\x00\xfe\xff
        \xff\xff\xff\xff\xff\xff\xff\xff\xff'
--credentials yes --package qemu-user-static
```

Код 8: Команда за аутоматско покретање МИПС извршних датотека помоћу КЕМУ-а. <skripta> представља путању до скрипте 9:

```
#!/bin/bash
qemu=/<qemu>/mipsel-linux-user/qemu-mipsel
exec $qemu $*
```

Код 9: Скрипта у којој се покреће КЕМУ емулятор

Где <qemu> представља путању до директоријума у ком се налази qemu емулятор.

Интерпретатор за платформу МИПС је урађен по угледу на постојећи интерпретатор за АРМ процесоре.

За почетак су направљене датотеке *assembler\_mips.h* и *assembler\_mips.cc* које описују МИПС асемблерски језик. Најпре је најпре дефинисана енумерација регистар која обухвата МИПС регистре (референца на део о мипс регистрима). Направљене су класе *Label*, *Constant* и *Address*.

<sup>2</sup>У овом режиму КЕМУ може покретати процесе преведене за једну врсту процесора на другој врсти процесора

<sup>3</sup>Бинарни формат извршних датотека на Линукс оперативном систему

```
class Label {
public:
    Label() : position_(-1) {}

    int position() {
        if (position_ == -1) position_ = position_counter++;
        return position_;
    }

private:
    int position_;
    static int position_counter_;
};
```

Код 10: Класа помоћу које се генеришу лабеле у МИПС асемблерском језику

Лабела представља линију у оквиру асемблерског фајла на коју се може скочити. У коду 10 је представљена класа *Label* која садржи два поља: *position* - представља редни број лабеле и *position\_counter* - заједничка променљива за све инстанце класе *Label*, на основу које се додељује позиција лабеле.

```
class Immediate {
public:
    explicit Immediate(int32_t value) : value_(value) {}
    int32_t value() const { return value_; }

private:
    const int32_t value_;
};
```

Код 11: Класа помоћу које се генеришу константе у МИПС асемблерском језику

У коду 11 је представљена класа *Immediate*. Инстанца те класе представља константу вредност целобројног типа.

У коду 12 је представљена класа *Address*. Инстанца те класе представља меморијску адресу, која је на платформи МИПС32Р2 32-битна. Адреса се рачуна као збир адресе у базном регистру и помераја. Базни регистар је регистар опште намене који садржи 32-битну адресу.

Дефинисани су макрои за МИПС инструкције са одговарајућим бројем аргумената, помоћу којих ће се по потреби увести одговарајуће инструкције које

## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

```
class Address {
public:
    Address(Register base, int32_t offset)
        : base_(base), offset_(offset) {}

    Register base() const { return base_; }
    int32_t offset() const { return offset_; }

private:
    const Register base_;
    const int32_t offset_;
};
```

Код 12: Класа помоћу које се представљају меморијске у МИПС асемблерском језику

се користе при интерпретацији.

```
#define INSTRUCTION_3(name, format, t0, t1, t2) \
    void name(t0 a0, t1 a1, t2 a2) {           \
        Print(format, Wrap(a0), Wrap(a1), Wrap(a2)); \
    }
```

Код 13: Макро за генерисање инструкције која има 3 аргумента

У коду 13 представљен је пример макроа за генерисање МИПС асемблерских инструкција које имају 3 аргумента. Аналогно томе, постоје макрои за генерисање инструкција са 1, 2 и 4 аргумента.

Након тога је имплементирана функција *Print* за уписивање асемблерских инструкција у фајл. Дефинисан је начин записивања регистара, лабела и адреса у МИПС асемблеру.

```
case 'l': {
    Label* label = va_arg(arguments, Label*);
    printf(".L%d", label->position());
    break;
}
```

Код 14: Пример записивања лабеле у МИПС асемблерском језику

У коду 14 представљен је део функције *Print* који се односи начин записивања лабеле унутар асемблерског фајла. Пре позиције додаје се префикс „L”

који означава да је у питању лабела.

```
case 'r': {
    Register reg = static_cast<Register>(va_arg(arguments, int));
    printf("\t%s", ToString(reg));
    break;
}
```

Код 15: Пример записивања регистра у МИПС асемблерском језику

У коду 15 представљен је део функције *Print* који се односи начин записивања регистра унутар асемблерског фајла. Регистар се означава префиксом „\$”, након чега следи ознака регистра.

```
void Assembler::PrintAddress(const Address* address) {
    printf("%d\t%s", address->offset(), ToString(address->base()));
}
```

Код 16: Пример записивања адресе у МИПС асемблерском језику

У коду 16 представљен је део функције *Print* који се односи начин записивања адресе унутар асемблерског фајла. Адреса се записује као померај иза ког следи у загради запис базног регистра.

На овај начин је омогућено генерисање МИПС асемблерског кода. Следећи корак је генерисање интерпретатора. Интерпретатор генерише асемблерску датотеку чијим превођењем добијамо програм који извршава бајткод на МИПС архитектури. Већина функција у интерпретатору представља имплементацију одговарајућих Дартино процедура.

Најпре су имплементирани специфичности у вези са МИПС позивном конвенцијом (референца). Функција *GeneratePrologue* служи за генерисање асемблерског кода који ће се извршити приликом позива сваке функције. Мора се сачувати садржај регистара S0-S7 на стеку, и такође садржај регистра RA, у ком се налази адреса повратка функције. По повратку из неке функције, позива се функција *GenerateEpilogue* у којој се скида са стека садржај регистара S0-S7 и регистра RA.

При скоку на функцију која се налази ван интерпретатора, мора се позвати функција за поравнање стека. Ова функција је представљена кодом 17. На основу позивне конвенције, неопходно је резервисати 4 места на стеку за аргументе функције (уколико функција коју позивамо позива неку другу функцију). Осим тога, неопходно је сачувати садржај регистра GP. Стек увек мора бити

## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

поравнат на 8 (адреса стека мора бити дељива са 8), па се због тога сачува 6 речи уместо 5.

```
void InterpreterGeneratorMIPS::PrepareStack() {  
    __ addiu(SP, SP, Immediate(-6 * kWordSize));  
    __ sw(GP, Address(SP, 5 * kWordSize));  
}
```

Код 17: Пример функције за поравнање стека, која се позива пре скока на неку спољну функцију

По повратку из неке спољне функције, позива се функција *RestoreStack*, која ради инверзну операцију функције *PrepareStack*. Ова функција је представљена кодом 18.

```
void InterpreterGeneratorMIPS::RestoreStack() {  
    __ lw(GP, Address(SP, 5 * kWordSize));  
    __ addiu(SP, SP, Immediate(6 * kWordSize));  
}
```

Код 18: Пример функције за поравнање стека, која се позива по повратку из неке спољне функцију

Након тога настављена је постепена имплементација интерпретатора. Први циљ је био превођење програма који декларише променљиву и иницијализује је на вредност 42, а затим је исписује на стандардни излаз. Овај програм је представљен кодом 19.

```
main() {  
    var number = 42;  
    print(\${number});  
}
```

Код 19: Програм за исписивање броја 42 у програмском језику Дарт

Направљени су механизми за дебаговање у МИПС и АРМ асемблеру који садрже две опције: могућност исписивања редног броја функције интерпретатора која се тренутно извршава и могућност исписивања садржаја задатог регистра. Ти механизми су у процесу развоја били део интерпретатора. Коришћени су

## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

---

како би се извршавањем програма на АРМ архитектури добила информација о функцијама које је неопходно имплементирати да би се тај програм извршио на МИПС архитектури. Такође, када дође до грешке и прекида извршавања програма, овај механизам нам омогућава да знамо у којој функцији је дошло до грешке. Више о овом механизму може се прочитати у одељку 5.3.

Након програма који исписује број 42, имплементиран је остатак функција који је неопходан за исписивање поруке „Здраво свете”. Пример Дарт програма који исписује поруку представљен је кодом 20.

```
main() {  
    print("Hello world");  
}
```

Код 20: Програм за исписивање поруке „Hello world” у програмском језику Дарт

Затим су имплементиране функције неопходне за превођење програма са основним аритметичким операцијама, рад са низовима, битовски оператори и слично. Кодом 21 представљена је функција која сабира два броја, при чему се проверава да ли је дошло до прекорачења. Уколико је било прекорачења, неопходно је скочити на део кода који врши опоравак.

Након тога имплементиране су функције које су неопходне да би се исправно извршио програм који исписује поздравну поруку и информације о машини на којој се програм извршава, и тај програм представљен је кодом 22.

На крају су имплементиране преостале функције, како би се могао покренути постојећи скуп тестова.

### 5.2 Дартино стек

У оквиру Дартино виртуелне машине се ради са локалним стеком, и за те потребе је искоришћен регистар S2. Све операције са стеком у оквиру интерпретатора се раде над тим стеком, при чему стек процесора користи Дарт виртуелна машина, односно компајлер. Функције која врши скидање садржаја са стека је представљена кодом 23. У регистар се упише садржај са врха стека, а затим се врх стека помери за дужину једне речи, односно садржај се скине

## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

```
void InterpreterGeneratorMIPS::InvokeAdd(const char* fallback) {
    Label no_overflow;
    LoadLocal(A0, 1);
    __ andi(T0, A0, Immediate(Smi::kTagMask));
    __ B(NEQ, T0, ZR, fallback);
    LoadLocal(A1, 0);
    __ andi(T1, A1, Immediate(Smi::kTagMask));
    __ B(NEQ, T1, ZR, fallback);

    __ xor_(T1, A0, A1);
    __ b(LT, T1, ZR, &no_overflow);
    __ addu(T0, A0, A1); // Delay-slot.
    __ xor_(T1, T0, A0);
    __ b(LT, T1, ZR, fallback);
    __ Bind(&no_overflow);
    __ move(A0, T0); // Delay-slot.
    DropNAndSetTop(1, A0);
    Dispatch(kInvokeAddLength);
}
```

Код 21: Функција у МИПС интерпретатору која сабира две целобројне вредности

```
main() {
    SystemInformation si = sys.info();
    String nodeInformation =
        si.nodeName.isEmpty ? '' : ' running on \${si.nodeName}';
    print('Hello from \${si.operatingSystemName}\${nodeInformation}');
}
```

Код 22: Програм који испишује „Hello” и информације о машини на којој се извршава

са стека. Функција која поставља садржај на стек је представљена кодом 24. На стеку се алоцира меморија за једну реч (помери се врх стека), а затим се садржај регистра упише на врх стека.

```
void InterpreterGeneratorMIPS::Pop(Register reg) {
    __ lw(reg, Address(S2, 0));
    __ addiu(S2, S2, Immediate(1 * kWordSize));
}
```

Код 23: Функција за скидање садржаја регистра са локалног Дартино стека.

```
void InterpreterGeneratorMIPS::Push(Register reg) {  
    __ addiu(S2, S2, Immediate(-1 * kWordSize));  
    __ sw(reg, Address(S2, 0));  
}
```

Код 24: Функција за чување садржаја регистра на локалном Дартино стеку.

### 5.3 Систем за дебаговање

С обзиром да се функције у интерпретатору извршавају у току превођења кода, а не у току извршавања, било је неопходно да се систем за дебаговање угради у асемблерски код.

У коду 25 представљен је макро у оквиру ког се налазе инструкције за чување садржаја регистра на стеку. Чување садржаја на стеку је имплементирано као у функцији која је представљена кодом 24, при чему је једина разлика то што се ради са процесорским стеком.

У коду 26 представљене су инструкције за скидање садржаја регистра на стеку. Макро је имплементиран исто као функција у коду 23.

```
#define push_asm(reg) \n    assembler()->subi(SP, SP, Immediate(1*kWordSize)); \n    assembler()->sw(reg, Address(SP, 0));
```

Код 25: Макро за чување садржаја регистра са стека.

```
#define pop_asm(reg) \n    assembler()->lw(reg, Address(SP, 0)); \n    assembler()->addi(SP, SP, Immediate(1*kWordSize));
```

Код 26: Макро за скидање садржаја регистра са стека.

У коду 27 приказан је макро који се користи да би се исписао садржај регистра. Неопходно је сачувати садржај регистара који се користе у макроу, како систем за дебаговање не би утицао на извршавање остатка програма. У А0 се смешта адреса ниске „print\_reg”, коју генерише функција *GenerateDebugStrings* док се у А1 сачува садржај регистра који је аргумент макроа. Након тога се скочи на функцију *printf*, при чему се у А0 и А1 налазе аргументи функције. Сличан макро генерисан је за записивање редног броја функције интерпретатора која се тренутно извршава.



## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

```
#define PrintRegister(reg) \
    push_asm(GP); \
    push_asm(V0); \
    push_asm(A0); \
    push_asm(A1); \
    push_asm(T9); \
    push_asm(RA); \
    assembler()->la(A0, "print_reg"); \
    assembler()->move(A1, reg); \
    assembler()->lw(T9, "\%call16(printf)(\%gp)"); \
    assembler()->jalr(T9); \
    assembler()->nop(); \
    pop_asm(RA); \
    pop_asm(T9); \
    pop_asm(A1); \
    pop_asm(A0); \
    pop_asm(V0); \
    pop_asm(GP);
```

Код 27: Макро за исписивање садржаја регистра

```
void InterpreterGeneratorMIPS::GenerateDebugStrings() {
    int i;
    char *str = (char *)malloc(10);
    printf("\n\t.data\n");
    for(i=1;i<=255;i++) {
        sprintf(str, "string_\\%d", i);
        printf("\\%s: .asciiz \"\\%d  \"\\n", str, i);
    }
    printf("print_reg: .asciiz \"register_value: \\%\\%x\\n\"\\n");
    free(str);
}
```

Код 28: Функција која генерише ниске које се користе при дебаговању, у сектору података у асемблерској датотеци

У коду 28 приказана је функција која се користи при генерисању ниски које се користе при дебаговању: „string\_редни\_број\_ниске” и „print\_reg”. Ниска „string\_редни\_број\_ниске” представља лабелу која се записује у сектору података, иза које следи „asciiz”, што представља тип податка, и на крају сам податак, односно број. Ова ниска се користи при исписивању редног броја функције у интерпретатору која се тренутно извршава. Ниска „print\_reg” користи се се исписивању садржаја регистра, што се може видети у коду 27. Ова

## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

ниска такође представља лабелу у сектору података, иза које следи тип „.asciiz”, и на крају вредност податка, односно садржај регистра који се исписује. Више о запису у сектору података у МИПС асемблерском језику може се прочитати у поглављу РЕФЕРЕНЦА\_НА\_ПОГЛАВЉЕ\_У\_МИПСУ.

### 5.4 Тестирање и резултати

Упоредо са имплементацијом интерпретатора, писани су мали тест примери. Примери неких тестова дати су у опису имплементације. Овде ће бити наведени још неки од тестова који су помогли у решавању највећих багова.

Један од проблема који се јавио у току имплементације је функција *signalfd*, која у QEMU емулатору за МИПС није била имплементирана. То је установљено тест примером који је приказан кодом 29.

```
int fd = signalfd(-1, &signal_mask, SFD_CLOEXEC);
if (fd == -1) {
    FATAL1("signalfd failed: %s", strerror(errno));
}
```

Код 29: Позив функције *signalfd*, који је производио грешку при извршавању

Након тога је направљен тест у програмском језику Ц, у ком се такође користи функција *signalfd*, и преведен за МИПС, како би се утврдило да ли разлог због ког не пролази тест има везе са интерпретатором. При извршавању тог теста јављала се грешка неподржане функције. Када је подршка за функцију додата у оквиру КЕМУ емулатора, тест је прошао.

Приликом тестирања рада са сокетима јавила се грешка при позиву функције *Socket.connect*, односно функције *sys.socket* која се налази у оквиру ње. Пример позива те функције дат је кодом 30.

```
fd = sys.socket(sys.AF_INET, sys.SOCK_STREAM, 0);
```

Код 30: Позив функције *sys.socket*, који је производио грешку при извршавању

## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

Утврђено је да унутар Дартина вредност макроа `SOCK_STREAM` није прилагођена МИПС архитектури, која користи различите вредности неких системских макроа у односу на остале архитектуре.

Направљено је и неколико тест примера у којима је уочен проблем при позиву функције `sys.setsockopt`, којој су прослеђиване погрешне вредности макроа `SOL_SOCKET` и `SO_REUSEADDR`. Пример позива те функције представљен је кодом 31.

```
int _setReuseaddr(int fd) {
    int result =
        sys.setsockopt(fd, sys.SOL_SOCKET, sys.SO_REUSEADDR, FOREIGN_ONE);
    return result;
}
```

Код 31: Позив функције `sys.setsockopt`, који је производио грешку при извршавању

Сличан проблем уочен је при прављењу теста у ком се генерише нова датотека. Проблем је био у макроима који се користе при системском позиву `open`: `O_CREAT`, `O_APPEND` и `O_NONBLOCK`.

Кодом 32 представљен је део Дартино датотеке „*system\_linux.dart*”, док је кодом 33 представљен део датотеке „*system\_posix.dart*” (које се налазе у оквиру библиотеке за приступ оперативном систему) у којима су исправљене вредности одговарајућих макроа, тако да зависе од архитектуре. Исправне вредности макроа за МИПС платформу добијене су читањем одговарајућих датотека у оквиру МИПС тулчејна (енг. *toolchain*).

На крају имплементације, покренут је скуп тестова који је део Дартино пројекта. Тестови се покрећу помоћу пајтон (енг. *python*) скрипте *tools/test.py*, а пример покретања тестова на платформи МИПС представљен је кодом 34. Неопходно је навести на којој се платформи покрећу тестови. Пошто је за неке тестове потребно мало више времена од подразумеваног, потребно је навести временско ограничење (енг. *timeout*) од 1200 секунди. Разлог зашто се неки тестови извршавају дуже него на АРМ платформи је што на МИПС32Р2 не постоје неке инструкције које постоје на АРМ архитектури, па је било неопходно имплементирати их помоћу већег броја инструкција. Убрзање би се постигло уколико би нам референтна платформа била МИПС64Р6, јер је уведен нови,

## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

```
static final bool isMips = sys.info().machine == 'mips';
int get AF_INET6 => 10;

int get O_CREAT => isMips ? 256 : 64;
int get O_TRUNC => 512;
int get O_APPEND => isMips ? 8 : 1024;
int get O_NONBLOCK => isMips ? 128 : 2048;
int get O_CLOEXEC => 524288;

int get FIONREAD => isMips ? 0x467f : 0x541b;
int get SOL_SOCKET => isMips ? 65535 : 1;
int get SO_REUSEADDR => isMips ? 4 : 2;
```

Код 32: Део датотеке „system\_linux\_dart” у ком су одговарајући макрои, тако да им вредности зависе од архитектуре

```
int get SOCK_STREAM => isMips ? 2 : 1;
int get SOCK_DGRAM => isMips ? 1 : 2;
```

Код 33: Део датотеке „system\_posix\_dart” у ком су одговарајући макрои, тако да им вредности зависе од архитектуре

богатији, скуп инструкција.

```
tools/test.py -axmips -t1200
```

Код 34: Команда за покретање тестова на платформи МИПС

Постојећим скуповима тестова тестиране су следеће карактеристике језика:

1. Корутине
2. Влакна
3. Изолате
4. Коришћење функција неких других програмских језика
5. Конекција на ХТТПС сервер коришћењем ТЛС протокола
6. Рад са уграђеним библиотекама

## ГЛАВА 5. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИНТЕРПРЕТАТОРА ЗА ПЛАТФОРМУ МИПС

Резултат тестирања на платформи МИПС може се видети на слици 5.1. Тестови се у просеку извршавају за 45 минута, при навођењу временског ограничења од 1200 секунди. На плаформи АРМ се тестови извршавају за око 50 минута, при временском ограничењу од 600 секунди. То се може видети на слици 5.2. Тестови се на платформи Интел x86 извршавају за 20 минута, без потребног временског ограничења. То је представљено на слици 5.3.

```
[00:05 | --% | + 2 | - 0]Debug print from dartino_tests works.
[00:12 | --% | + 17 | - 0]Total: 5298 tests
* 7 tests will be skipped (1 skipped by design)
* 1 tests are expected to be flaky but not crash
* 4021 tests are expected to pass
* 4 tests are expected to fail that we won't fix
* 1251 tests are expected to fail that we should fix
* 4 tests are expected to crash that we should fix
* 3 tests are allowed to timeout
* 0 tests are skipped on browsers due to compile-time error

[46:21 | 100% | + 5291 | - 0]
--- Total time: 46:21 ---
```

Слика 5.1: Резултати тестирања на платформи МИПС

```
[00:04 | --% | + 2 | - 0]Debug print from dartino_tests works.
[00:09 | --% | + 16 | - 0]Total: 5298 tests
* 49 tests will be skipped (1 skipped by design)
* 2 tests are expected to be flaky but not crash
* 3978 tests are expected to pass
* 4 tests are expected to fail that we won't fix
* 1251 tests are expected to fail that we should fix
* 4 tests are expected to crash that we should fix
* 3 tests are allowed to timeout
* 0 tests are skipped on browsers due to compile-time error

[00:52 | 1% | + 70 | - 0]Attempt:1 waiting for 1 threads to check in
[53:55 | 100% | + 5249 | - 0]
--- Total time: 53:55 ---
```

Слика 5.2: Резултати тестирања на платформи АРМ

```
[00:03 | --% | + 1 | - 0]Debug print from dartino_tests works.
[00:11 | --% | + 17 | - 0]Total: 5298 tests
* 6 tests will be skipped (1 skipped by design)
* 2 tests are expected to be flaky but not crash
* 4020 tests are expected to pass
* 4 tests are expected to fail that we won't fix
* 1251 tests are expected to fail that we should fix
* 4 tests are expected to crash that we should fix
* 3 tests are allowed to timeout
* 0 tests are skipped on browsers due to compile-time error

[20:21 | 100% | + 5292 | - 0]
--- Total time: 20:21 ---
```

Слика 5.3: Резултати тестирања на платформи x86-64

## 5.5 Пример апликације у програмском језику

Дарт

## Глава 6

## Закључак

# Библиографија

- [1] Yuri Gurevich and Saharon Shelah. Expected computation time for Hamiltonian path problem. *SIAM Journal on Computing*, 16:486–502, 1987.
- [2] Petar Petrović and Mika Mikić. Naučni rad. In Miloje Milojević, editor, *Konferencija iz matematike i računarstva*, 2015.