

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

1	Увод	1
2	МИПС	3
2.1	ЦИСК и РИСК	3
2.2	Проточни систем (pipeline)	3
2.3	Специфичности МИПС платформе	3
2.4	Поређење МИПС платформе и Интел x86-64	3
2.5	Поређење МИПС платформе и АРМ	3
2.6	Архитектура МИПС32	3
2.7	Значај и употреба МИПС платформе у системима са уграђеним рачунаром	3
3	Програмски језик Дарт	5
3.1	Уопштено	5
3.2	Приватност	5
3.3	Конкурентност	5
3.4	Грешке и упозорења	5
3.5	Променљиве	5
3.6	Функције	5
3.7	Оператори	5
3.8	Класе	5
3.9	Интерфејси	5
3.10	Енумерације	5
3.11	Генерици	5
3.12	Уграђени типови	5
3.13	Библиотеке	5
3.14	Специфичности у односу на јаваскрипт	5

3.15 Платформе	5
4 Дартино	6
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 помоћу Дартино ВМ	15
5 Имплементација интерпретатора за платформу МИПС	18
5.1 Имплементација у програмском језику Ц++	18
5.2 Нумерички алгоритам у програмском језику Дарт	18
6 Закључак	19
Библиографија	20

Глава 1

Увод

Појам „Интернет ствари” (енг. *IOT- Internet of things*) се све чешће среће, и он представља модел повезаности објеката који чине огроман систем у оквиру којег објекти међусобно комуницирају. Дефиниција „ствари” у оквиру појма „Интернет ствари” варира, али се може рећи да је то 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. 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.

Писање апликација за системе са уграђеним рачунаром се обично своди на писање у програмском језику C, коришћење ГЦЦ (енг. *GCC*) или ЛЛВМ (енг. *LLVM*) компилатор, и коришћење неког алата за дебаговање, обично ГДБ (енг. *GDB*) који се налази на другом рачунару. Разлог због ког је окружење такво је то што микроконтролер садржи малу количину РАМ меморије, малу количину флеш меморије, па се на овако малом уређају не може покренути ниједан регуларни оперативни систем, а и микролинукс често захтева више РАМ меморије од оне којом микроконтролер располаже. Често се програмира у асемблерском језику. Због наведених услова, процес развоја апликација је доста успорен.

Пошто се Веб апликације много брже развијају од апликација за системе са

уграђеним рачунаром, дошло се на идеју да се 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. 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 С, 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 биле су подржане само Интел и Арм архитектуре процесора. Због широке распрострањености МИПС процесора у системима са уграђеним рачунаром, развијен је интерпретатор за платформу МИПС који је у међувремену 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

2.2 Проточни систем (pipeline)

2.3 Специфичности МИПС платформе

2.4 Поређење МИПС платформе и Интел x86-64

2.5 Поређење МИПС платформе и ARM

2.6 Архитектура МИПС32

2.7 Значај и употреба МИПС платформе у системима са уграђеним рачунаром

Глава 3

Програмски језик Дарт

3.1 Уопштено

3.2 Приватност

3.3 Конкурентност

3.4 Грешке и упозорења

3.5 Променљиве

3.6 Функције

3.7 Оператори

3.8 Класе

3.9 Интерфејси

3.10 Енумерације

3.11 Генерици

3.12 Уграђени типови

3.13 Библиотеке

3.14 Специфичности у односу на јаваскрипт

Глава 4

Дартино

У овом поглављу биће описана Дартино виртуелна машина. На почетку је описано чему служи Дартино и које су компоненте виртуелне. 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. Требало би омогућити 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. Особине микроконтролера постављају велика додатна ограничења при развоју виртуелне машине која ће на њима радити. Обично се под виртуелном машином подразумева нешто што преводи изворни код у некакав међукод, и извршава га. Према томе, виртуелна машина садржи некакву компоненту за извршавање, сакупљач отпадака, омогућује препознавање класа и објеката, и има подршку за дебаговање.

Компоненте Дартино виртуелне машине:

1. Компонента за извршавање
2. Објектни модел
3. Сакупљач отпадака

Ове три компоненте су неопходне када је у питању виши програмски језик као што је Дарт. ЈИТ (енг. *JIT - Just in time*) компилатор изворног кода је избачен из виртуелне машине, и направљен је систем у коме су компилатор и окружење за извршавање раздвојени, као што је случај код ГЦЦ-а или ЛЛВМ-а. Систем за дебаговање је поједностављен и смањен.

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. 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 ствари. Испод тога се заправо налази стек машина, тако да се може поставити ново стање на стек окружења за извршавање, могу се правити класе, дефинисати објекти и методе путем овог АПИ-ја. Компилатор је Дарт програм, а окружење за извршавање је Дартино виртуелна машина. Више о извршним фајловима **dart**, **dartino-vm** и **dartino** написано је у одељку 4.5.

Како би компилатор знао где је која класа завршила у систему, и доделио им симболичка имена, омогућено му је да свакој класи придружи одређени идентификатор. Ови идентификатори окружењу за извршавање не значе ништа,



Слика 4.1: Комуникација ЈИТ компилатора и окружења за извршавање

али компилатор при примању објекта назад, зна да је инстанца одређене класе. 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 упрошћава.

Помоћу овог протокола се може постављати структура програма, што обухвата:

1. Додавање нових класа на стек
2. Додавање нових метода на стек

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:

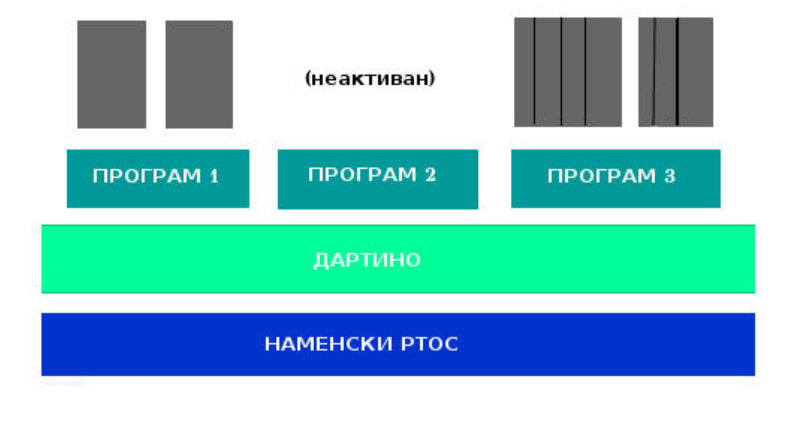
- а) Покретање дебагера
- б) Постављање зауставних тачака

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 са уграђеним рачунаром, 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 4.3 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

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. Паралелизам

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

```
main() {
    for (int i = 0; i < 40000; i++) {
        Process.spawn(factoriel, 12);
    }
}

int factoriel(n) {
    if (n == 1) return 1;
    return n * factoriel(n-1);
}
```

Код 1: Креирање паралелних процеса

Код 1 приказује покретање 40000 независних процеса, који ће бити распо-
ређени на одређени број језгара и извршавати се паралелно. **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,
клијент(**socket**) шаље серверу(**server**) поздравну поруку.

4. Комуникација


```
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 надолazeћим конекцијама

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: Блокирање слањем порука

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

5. Дељено непроменљиво стање између процеса

- а) Сваки непроменљиви објекат се може слати као порука, без копирања
- б) Више процеса могу користити исти објекат истовремено
- с) Нема потребе за експлицитним примитивима за синхронизацију

6. Изолате

Изолате (енг. *Isolates*) су независни воркери (енг. *Worker*¹), 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, покретањем две независне изолате.

7. Влакна

Влакна (енг. *Fibers*) представљају нити извршавања у оквиру једног процеса, које деле спољну меморију, али не деле непроменљиву меморију. 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** 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

¹Појам 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: Употреба влакана

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.

```
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

9. Динамичко отпремање метода

Динамичко отпремање метода се односи на позивање преклопљених метода класа, при чему се проблем преклапања разрешава у фази преводјења, а не у фази извршавања. Табела отпремања се имплементира као низ, у који се сваки метод, сваке класе, смешта на своју позицију. Позиција метода се рачуна помоћу редног броја класе и позиције метода.

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. 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 прављења табеле отпремања

Класама редом придружимо бројеве: 0, 1, 2 и 3. Методима придружимо позиције на мало компликованији начин. Метод **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. 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 дати пример

4.4 Најзначајније библиотеке

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 C.
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 помоћу Дартино ВМ

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.

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

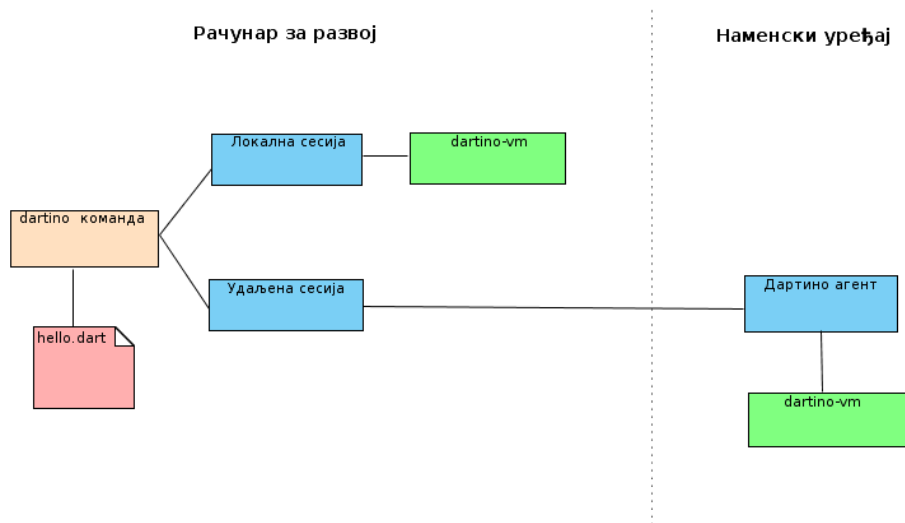
```
./out/DebugXMIPS/dartino create session my_session
```

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.



Слика 4.4: Процес извршавања програма

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

5.1 Имплементација у програмском језику Ц++

5.2 Нумерички алгоритам 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.