

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Маје Вукасовић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 1470-29 од 10.10.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Маје Вукасовић под насловом

### Побољшање перформанси програма употребом делимично контекстно осетљивих профиле

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидаткиња Маја Вукасовић је 26.02.2023. године пријавила тему за израду докторске дисертације под насловом „Побољшање перформанси програма употребом делимично контекстно осетљивих профиле“ (енг. *Improving Program Performance with Partially Context-Sensitive Profiles*).

Катедра за рачунарску технику и информатику, на својој седници одржаној 2.03.2023. године, размотрела је пријаву теме докторске дисертације, коју је поднела кандидаткиња, и утврдила је да је надлежна за разматрање пријављене теме докторске дисертације, као и да су достављена пријава и њени прилози суштински и формално одговарајући и комплетни.

Комисија за студије трећег степена је на својој седници, која је одржана 7.03.2023. године, разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације упутила је Наставно-научном већу Електротехничког факултета на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је, на својој 884. седници, одржаној дана 14.03.2023. године, донело одлуку бр. 409/25-2 о именовању Комисије за научну заснованост теме докторске дисертације у саставу:

- др Мило Томашевић, редовни професор Универзитета у Београду, Електротехнички факултет

- др Коста Јовановић, ванредни професор Универзитета у Београду, Електротехнички факултет
- др Милена Вујошевић Јаничић, ванредни професор Универзитета у Београду, Математички факултет

За ментора докторске дисертације предложен је др Драган Бојић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације одржана је 29.03.2023. године. Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације оценила је усмену одбрану као успешну (оцене „задовољила“).

Комисија за студије трећег степена је на својој седници, која је одржана 7.04.2023. године, разматрала записник Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације са јавне усмене одбране, који је упутила Наставно-научном већу Електротехничког факултета на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је, на својој 885. седници, одржаној дана 11.04.2023. године, донело одлуку о прихватању теме докторске дисертације и усвојило извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације. За ментора докторске дисертације именован је др Драган Бојић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких факултета дало је сагласност на предложену тему докторске дисертације и именовање ментора на седници одржаној 15.05.2023. године (број одлуке 61206-1681/2-23).

Кандидаткиња је 28.09.2023. године предала докторску дисертацију на преглед и оцену.

Комисија за студије трећег степена потврдила је на својој седници, која је одржана 3.10.2023. године, испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на својој 890. седници, одржаној 10.10.2023. године, именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу:

- др Мило Томашевић, редовни професор Универзитета у Београду, Електротехнички факултет
- др Милош Цветановић, ванредни професор Универзитета у Београду, Електротехнички факултет
- др Милена Вујошевић Јаничић, ванредни професор Универзитета у Београду, Математички факултет
- др Павле Вулетић, ванредни професор Универзитета у Београду, Електротехнички факултет
- др Захарије Радивојевић, ванредни професор Универзитета у Београду, Електротехнички факултет

Кандидаткиња Маја Вукасовић уписала је докторске студије 2017. године на Електротехничком факултету у Београду на модулу Софтверско инжењерство. Положила је све испите са оценом 10 и остварила 120 ЕСПБ. У истраживачком раду усмерила се ка програмским преводиоцима, са посебним нагласком на оптимизације током превођења програма. Такође, испунила је све обавезе везане за студијски истраживачки рад, које су предвиђене наставним планом и програмом докторских студија.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада научној области Рачунарска техника и информатика, у ужем смислу научној области Софтверско инжењерство. За ове области матичан је Електротехнички факултет. Ментор дисертације је др Драган Бојић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, због научних и наставних доприноса у области теме докторске дисертације, а посебно у области програмских преводиоца.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Мјаја Вукасовић је рођена 25.05.1993. године у Београду. Основну школу завршила је у Београду, као ћак генерације и носилац дипломе „Вук Каракић”. Након тога завршава Девету гимназију „Михаило Петровић Алас”, такође у Београду као носилац дипломе „Вук Каракић”. Током школовања, освајала је награде на такмичењима из математике, физике, српског и енглеског језика.

На Електротехнички факултет у Београду уписала се 2012. године на Одсеку за софтверско инжењерство. Дипломирала је 2016. године са просечном оценом 9.98. Дипломски рад под називом „Напредни генератор програмског кода за машине стања на језику UML” одбранила је са оценом 10. Након основних студија уписала је мастер академске студије на Електротехнички факултет у Београду 2016. године. Мастер рад под називом „Симулатор векторског процесора са предикатским извршавањем у више трака” одбранила је 2017. године са оценом 10. Просечна оцена након завршених мастер академских студија је 10.00.

Докторске студије уписала је 2017. године на Електротехничком факултету у Београду на модулу Софтверско инжењерство. Положила је све испите са оценом 10 и остварила 120 ЕСПБ. У истраживачком раду усмерила се ка програмским преводиоцима, са посебним нагласком на оптимизације током превођења програма. Објавила је један рад у часопису са SCI листе, 10 радова на страним и домаћим конференцијама као и један рад у домаћем часопису. Учествовала је на међународном пројекту ISSES, четири пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја, као и пројекту Иновационог фонда „CoCos.ai”.

Током студија радила је на праксама у фирмама „SOL” и „Kudos” и била укључена на неколико пројекта компаније „Nordeus”. Школске 2013/2014. године приклучила се демонстраторском тиму на Катедри за рачунарску технику и информатику, а нешто касније и на Катедри за примењену математику. На Катедри за рачунарску технику и информатику је запослена од 2016. године, најпре као сарадник у настави, а потом као асистент. Тренутно је ангажована на шест предмета који се изводе на студијским програмима Софтверско инжењерство и Рачунарска техника и информатика. Као асистент на Електротехничком факултету била је ангажована на 11 предмета. Рецензирала је радове на конференцијама ТЕЛФОР и ЕТРАН. Од 2018. године ангажована је као истраживач у фирми „Oracle Labs”. Коаутор је три наставна материјала из области заштите података.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Побољшавање перформанси програма употребом делимично контекстно осетљивих профила” написана је на српском језику, ћириличним писмом и има укупно 134 страна. Дисертација садржи 51 слику, 8 табела, 11 листинга, 5 алгоритама и 46 једначина и подељена је на следећа поглавља:

- Увод
- Преглед области истраживања
- Екосистем *GraalVM*

- Поставка проблема
- Структуре података за представљање често извршаваног кода
- Нови алгоритам превођења
- Детаљи имплементације
- Евалуација
- Поређење алгоритма *PRINC* са релевантним решењима
- Закључак

Додатно, дисертација садржи и насловне стране на српском и енглеском језику, страну са информацијама о ментору и члановима комисије, посвету, страну са изјавом захвалности, сажетак дисертације на српском и енглеском језику, садржај, списак литературе са 150 референци наведених по редоследу навођења у тексту, биографију аутора и потребне изјаве (о ауторству, о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и о коришћењу).

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу су приказани предмет, циљ и значај истраживања као и основни појмови потребни за разумевање проблема који истраживање решава. Описана је и мотивација за истраживање са идејом да се делимично контекстно осетљиви профили могу искористити за унапређење процеса превођења програма и оптимизација, а посебно оптимизације угађивања тела позване функције на место позива, инлајновања. Дат је и преглед тренутног стања области и релевантних референци.

Друго поглавље садржи опширан преглед постојеће литературе у областима компилације, прикупљања профила, њихове употребе у различитим оптимизацијама, оптимизацији инлајновања, као и опис изазова са којима се модерни инлајнери суочавају. Такође, овде је дат и пример програма кроз који су у наставку тезе систематски илустровани детаљи имплементираног решења. На почетку овог поглавља прецизно су дефинисане структуре података које су коришћене као основа за представу често извршаваних делова кода, чијом агресивнијом оптимизацијом се постижу боље перформансе целокупног програма.

Алгоритам предложен у овом раду имплементиран је у конкретном преводиоцу *GraalVM Native Image*, који је део екосистема *GraalVM* и који омогућава превођење пре времена извршавања, АОТ. Дат је опис структуре система, са акцентом на аспекте релевантне за ово истраживање попут поступка превођења, имплементације оптимизације инлајновања, оригинални механизам прикупљања и употребе профила и међурепрезентацију компајлера, која значајно одређује улаз и импликације имплементираног решења.

Након објашњења свих појмова и конкретног окружења за имплементацију, које диктира улаз алгоритма, у четвртом поглављу приказан је интегралан опис проблема који се решава у оквиру дисертације, као и нацрт предложеног решења.

У петом поглављу дефинисан је модел којим се описују често извршавани делови кода. Модел подразумева структуре података као и математички дефинисане операције над њима. У овом поглављу, уведене структуре података су приказане на општи начин јер, упркос њиховој конкретној примени у оквиру решења, нема препрека за генералнију употребу ових структура. Све операције су илустроване једноставним примерима ради лакшег разумевања и прегледности.

Шесто поглавље садржи формалну дефиницију предложеног алгоритма *PRINC*. Алгоритам је приказан од вишег нивоа апстракције уз издвајање компоненти алгоритма за детекцију значајних секција кода, формирање скупа јединица компилације од којих превођење започиње, компилацију уз модификовани примену алгоритма за инлајновање, који користи

информације о учестаности извршавања секција кода на основу формираног модела описаног у претходном поглављу. Свака компонента је потом прецизно дефинисана, објашњена на алгоритамском нивоу и додатно илустрована примерима. У овом контексту модел је проширен додатним операцијама. Овде је описан улаз и излаз алгоритма, а дат је и концизан приказ претходне имплементације алгоритма за превођење како би се истакле разлике између унапређеног и претходног решења.

Како постоје имплементационе специфичности које допуњују предложени модел и алгоритам, значајни детаљи имплементације приказани су у седмом поглављу. Уз то, дати су и примери јединице компилације и распореда превођења на репрезентативном програму већег обима, из скупа стандардизованих проблема који служи као основа за поређење, бенчмарка, коришћеног у евалуацији.

У осмом поглављу приказана је општирна евалуација имплементираног решења кроз скуп експеримената који потврђују допринос овог истраживања. Најпре је приказана методологија експеримената и описани су коришћени скупови тестова, који представљају стандардне скупове бенчмарка за тестирање преводилаца. Експерименти садрже поређење перформанси алгоритма *PRINC* за АОТ превођење са неколико постојећих решења, која укључују различите конфигурације компјултера, виртуелних машина и алгоритама за инлајновање. С обзиром на јаку параметризацију инлајнера, спроведен је додатни експеримент који варира вредности параметара како би се показало да нови алгоритам даје боље перформансе независно од избора вредности параметра. Додатно, варирани су параметри новог алгоритма, којима се утиче на учестаност извршавања делова кода означених као значајних, количину инлајновања, количину значајних јединица компилације и сл., чиме се постиже имплементација различитих полиса алгоритма. Евалуиран је и утицај новог алгоритма на време превођења и величину компајлираног кода, имајући у виду да је веома важно да се цена алгоритма значајно не увећа. У поређењу са претходном имплементацијом алгоритма за превођење и оптимизације инлајновања у оквиру истог преводиоца, постигнуто је убрзање у опсегу од 22% до 40% на четири бенчмарка и у опсегу од 2,5% до 10% на пет бенчмарка. Алгоритам увећава величину генерисаног извршног кода између 0,8% и 9%, а време потребно за превођење програма се увећава за максимално 2,5% у случају десет бенчмарка.

Девето поглавље садржи квалитативну евалуацију у погледу прецизног поређења имплементираног решења са најрелевантнијим и најскоријим решењима у области. Додатно, истражене су могућности имплементације алгоритма у преводиоцима *LLVM* и *GCC*.

У закључку су сумирани главни аспекти и значај истраживања. Приказани су и будући правци истраживања, којима се омогућава унапређење постојећег решења.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Предност парадигме превођења пре времена извршавања, АОТ, наспрам парадигме превођења у току извршавања програма, JIT, је брзо почетно време извршавања програма захваљујући компајлирању целокупног кода док, са друге стране, након компајлирања значајних делова кода, извршавање JIT компајлираних програма може бити значајно брже. Због тога су модификације алгоритма за АОТ превођење које доприносе убрзавању преведених програма увек актуелне.

Како је једна од кључних оптимизација која доприноси побољшању перформанси програма оптимизација инлајновања, њеним унапређењем се доприноси убрзавању преведених програма. Међутим, примена ове оптимизације мора бити контролисана захваљујући високој ценама коју она уводи, а која се односи примарно на увећање генерисаног кода. Зато

инлајновање подразумева хеуристички проблем и не постоји једно решење које одговара свим окружењима. Додатно, инлајновање, као и друге оптимизације које спадају у ред агресивних, има смисла примењивати над често извршаваним деловима кода како се не би плаћала висока цена оптимизације кода који не доприноси значајно перформансама програма.

Показано је да већина оптимизација постиже боље резултате уколико за доношење одлука користи профиле, па је тако њихова употреба предмет многобројних савремених истраживања. Како се прикупљањем и чувањем делимично контекстно осетљивих профиле постиже компромис између прецизности доступних профила и цене њиховог прикупљања, значајан број актуелних истраживања покушава да пронађе најбољи начин за употребу таквих профила у складу са прецизношћу коју они носе.

У овом истраживању пројектован је и имплементиран нови, оригинални алгоритам *PRINC*, који за сваки од претходно поменутих аспекта дефинише засебан алгоритам и интегрише их у целину, која доводи до значајног побољшања перформанси програма преведених коришћењем алгоритма *PRINC*, уз занемарљиву цену његове примене.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У дисертацији је приказан детаљан преглед релевантне литературе из области превођења, прикупљања и употребе профила, идентификације често извршаваних делова кода и примена оптимизација кода. У истраживање су укључени и најновији радови у областима, што потврђује значај, релевантност и савременост теме. Списак литературе садржи 150 референци наведених по реду цитирања у тексту.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање је започело детаљном евалуацијом постојеће шеме превођења са посебним нагласком на претходно имплементирану оптимизацију инлајновања у оквиру преводиоца *GraalVM Native Image*. Како ова оптимизација подразумева алгоритам који зависи од значајног броја параметара, најпре је било потребно квантификовати утицај појединачних параметара на перформансе програма који се преводе, а потом показати да се перформансе програма не могу значајно унапредити искључиво варијацијом вредности ових параметара.

У оквиру рада је коришћен захтеван математички апарат за прецизно представљање и аналитично моделирање елемената решења, сложену нотацију као и формалне механизме доказивања теорема.

Веома је важно истаћи и примену методе квантитативне евалуације на репрезентативним реалним програмима. На скупу стандардних бенчмарка измерене су перформансе неколико релевантних конфигурација са којима је требало упоредити резултат овог истраживања. Конфигурације представљају различите комбинације виртуелних машина, компајлера и алгоритама за инлајновање. Прве две конфигурације од интереса обухватају АОТ превођење преводиоцем *GraalVM Native Image* без употребе профила и са њима. Конфигурација која се ослања на профиле током превођења користи претходно имплементиран алгоритам за укључивање профила у постојеће оптимизације и она је најзначајнија за утврђивање доприноса новог алгоритма. Трећа конфигурација представља превођење програма у току извршавања (ЛТ) употребом преводиоца *Graal* на виртуелној машини *HotSpot*. Ова конфигурација демонстрира најбоље перформансе због прецизности информација о програму који се преводи и механизама који у тренутку извођења овог истраживања нису били имплементирани у АОТ преводиоцу, и то су перформансе којима ново решење тежи.

Улаз новог алгоритма је директно одређен међурепрезентацијом преводиоца и представља делимично контекстно осетљиве профиле. Посебан сегмент анализе постојећих решења фокусира се на методе прикупљања профила овог формата и њихове употребе да би се детектовали делови кода који се често извршавају. Такође, истражене су и неке од постојећих хеуристика које користе профиле, имплементиране у различитим оптимизацијама са фокусом на оптимизацији инлајновања. Ипак, начин прикупљања профила у задатом окружењу диктира начин агрегирања и интерпретирања профила, што омогућава конструкцију специфичног решења.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултате овог истраживања могуће је применити у различитим компајлерским окружењима у којима су доступни профили који прате барем учестаност извршавања метода и учестаност извршавања базичних блокова, тј. број извршавања грана контролних структура. На основу таквих профиле, у сваком окружењу могуће је формирати структуре стабала које обухватају секције често извршаваног кода.

Сваки компајлер има специфичну међурепрезентацију, којој алгоритам мора бити прилагођен имајући у виду да је у овом истраживању он прилагођен графовској међурепрезентацији. Како оптимизације инлајновања укључују различите хеуристике, које су неретко изузетно параметризоване, пре директне примене модификација алгоритма описаног у овом раду, потребно је подесити вредности параметара тако да се за дате вредности постижу најбоље перформансе програма.

У деветом поглављу тезе дискутовано је како се имплементирани алгоритам може применити у два компајлерска окружења, који припадају тренутно најрелевантнијим и најчешће коришћеним таквим окружењима. Дискутована је прилагодљивост алгоритма у погледу међурепрезентације компајлера, детекције често извршаваних делова кода, инфраструктуре за прикупљање профила и оптимизације инлајновања. Изведени закључак је да је алгоритам погодан за имплементацију у овим окружењима уз прилагођавање конкретних аспеката алгоритма.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Ова докторска дисертација је резултат вишегодишњег истраживачког искуства у области компајлера, а посебно у домену употребе профиле у циљу унапређења перформанси програма. Искуство је формирено, у највећој мери, вишегодишњим радом у реномираној компанији „Oracle Labs“ на компајлерској инфраструктури *GraalVM*.

Кандидаткиња је током израде пројекта, чији је циљ била имплементација употребе контекстно осетљивих профиле у оптимизацији инлајновања, захваљујући систематичном прегледу значајних радова у области идентификовала препреке за постизање бољих перформанси програма преведених АОТ преводиоцем *GraalVM Native Image*. Како је један од ових разлога био недовољан број локација садржан у контекстима профила, кандидаткиња је конструисала алгоритам који продужава контексте улазних профиле и групише их у стабла која описују често извршавани код, а која се потом користе за измену процеса превођења и оптимизације инлајновања. Успешан тимски рад је омогућио кандидаткињи детаљно тестирање алгоритма, на основу чега је омогућено подешавање параметара алгоритма.

Научни доприноси верификовани су кроз објављени научни рад под називом *Exploiting Partially Context-Sensitive Profiles to Improve Performance of Hot Code* у којем су објављени су главни резултати овог истраживања у часопису *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*. На основу доприноса и методологије истраживања као и начина израде

докторске дисертације, комисија закључује да је кандидаткиња у потпуности способна за извођење самосталног научног рада.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Овај рад доноси више научних доприноса у једној активној научној области:

- Опсежан преглед релевантних подобласти у домену преводилаца, укључујући процес прикупљања профиле, оптимизације које користе профиле како би унапредиле одлуке, изазове оптимизације инлајновања и слично.
- Предложена је нова техника за превођење, која скраћује време извршавања АОТ преведених програма. Како би ово постигло, ова техника користи делимично контекстно осетљиве профиле за детекцију и ограничавање секција често извршаваног кода, за измену распореда превођења тако да оно почине од издвојених јединица компилације и за модификацију постојеће оптимизације инлајновања. За детекцију често извршаваних делова кода, алгоритам користи хеуристику за апроксимацију дужих контекста позивања на основу краћих суфикса са програмског стека.
- Алгоритам је имплементиран као саставни део АОТ компајлера *GraalVM Native Image*, а теза садржи детаље имплементације. Да би се ово постигло, у оквиру постојећег преводиоца *GraalVM* имплементирана је модификација реда за распоређивање превођења јединица компилације, дodata је нова фаза за анализу профиле, а резултати ове анализе су даље коришћени како би се побољшале одлуке оптимизације инлајновања.
- Спроведена је опсежна евалуација над шеснаест бенчмарка из склопова *DaCapo*, *Scalabench* и *Renaissance*, чији резултати су приказани и детаљно дискутовани у засебном поглављу. У поређењу са претходном имплементацијом алгоритма за превођење и оптимизације инлајновања у оквиру истог преводиоца, постигнуто је убрзање у опсегу од 22% до 40% на четири бенчмарка и у опсегу од 2,5% до 10% на пет бенчмарка. Алгоритам увећава величину генерисаног извршног кода између 0,8% и 9%, а време потребно за превођење програма се увећава за максимално 2,5% у случају десет бенчмарка. Перформансе алгоритма су поређене и са другим релевантним конфигурацијама превођења и извршавања програма попут компајлирања преводиоцем *GraalVM Native Image* без употребе оптимизација на основу профиле, стандардним *GraalVM* компајлером у JIT режиму и подразумеваним *C2* компајлером у оквиру виртуелне машине *HotSpot*. Евалуација такође приказује и процес подешавања параметара алгоритма ради постизања најбољих перформанси.
- Додатно, спроведена је и квалитативна евалуација, тј. детаљна анализа проблема које алгоритам решава и његових компонената, као и могућност имплементације ових компонената у оквиру два доминантно коришћена компајлерска окружења *LLVM* и *GCC*.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Докторска дисертација под називом „Побољшавање перформанси програма употребом делимично контекстно осетљивих профиле” пружа детаљан и обједињен преглед свих подобласти којима се истраживање бави. Ово подразумева опсежну класификацију алата за профилисање, преглед претходно предложених решења прикупљања и употребе делимично

контекстно осетљивих профила преглед и анализу постојећих решења употребе профила у оптимизацијама преводиоца са посебним нагласком на оптимизацију инлајновања и значај исправне идентификације често извршаваних делова кода.

Као исход истраживања пројектован је и имплементиран, у оквиру компајлерске инфраструктуре *GraalVM*, алгоритам *PRINC*, који обухвата алгоритам за детекцију често извршаваног кода на основу делимично контекстно осетљивих профила, алгоритам за апроксимацију метрика дужих контекста на основу парцијалних контекста, измену редоследа превођења који даје првенство често извршаваним деловима кода, измену оптимизације инлајновања тако да користи хеуристику за додавање и квантификовање смерница о често извршаваном коду у *cost-benefit* анализу и, сходно томе, модификује буџет оптимизације. Посебно треба напоменути да је инфраструктура у којој је имплементирано ново решење продукциона тако да ће ово решење бити доступно ширем кругу корисника.

У поређењу са најскорије објављеним радовима који се баве решавањем сличног проблема, алгоритам *PRINC* на улазу може да добије и профиле са значајно краћим контекстима. Како се они користе за ограничавање секција често извршаваног кода, ово подразумева претходно проширивање контекста и апроксимацију метрика који би одговарали тим контекстима да су они прикупљени у процесу профилисања. Генерално, ово чини процес реконструкције стабала која моделују сегменте често извршаваног кода значајно комплекснијим и применљивијим над скупом профила произвољне контекстне осетљивости.

Евалуацијом решења над стандардним скуповима бенчмарка утврђено је да се перформансе програма поправљају и до 40%, а да се величина генерисаног извршног кода у најгорем случају увећава само 9%, што алгоритам чини практично применљивим. Томе доприноси и значајан потенцијал за имплементацију у другим релевантним компајлерским окружењима, о чему је детаљно дискутовано у тези.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Иако ова дисертација има доволно резултата за објављивање више научних радова у часописима са фактором утицаја, сви резултати и научни доприноси су интегрално приказани и верификовани у веома обимном раду (65 страна) објављеном у веома релевантном часопису за област програмских преводилаца:

Категорија М23:

1. Maja Vukasović, Aleksandar Prokopec: Exploiting Partially Context-Sensitive Profiles to Improve Performance of Hot Code, ACM TRANSACTIONS ON PROGRAMMING LANGUAGES AND SYSTEMS, pp. 1-65, Sep, 2023. doi:10.1145/3612937, IF (2022): 1.3.

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

Докторска дисертација под називом „Побољшавање перформанси програма употребом делимично контекстно осетљивих профила” кандидаткиње Маје Вукасовић представља значајан научни допринос сложеној области програмских преводилаца. Значај рада лежи у практичној примени која омогућава брже извршавање генерисаног кода преведеног употребом алгоритма који је резултат истраживања.

У оквиру дисертације кандидаткиња се бавила истраживањем утицаја делимично контекстно осетљивих профила на перформансе извршног кода преведеног употребом ових профила. На основу тога, кандидаткиња је предложила и имплементирала алгоритам који значајно унапређује перформансе програма преведених пре извршавања употребом парцијалних контекста. Он идентификује често извршаване делове кода, модификује редослед

компилације тако да она започиње управо од ових секција и даје већи буџет за агресивнију примену оптимизација током превођења често извршаваних секција кода, а посебно оптимизације инлајновања, која је усмерена ка често извршаваним позиваоцима. Алгоритам је имплементиран као део производног АОТ преводиоца *GraalVM Native Image*, што посебно даје на значају овом истраживању имајући у виду да оно, поред научне, има и значајну практичну примену. Резултати као и реализовани циљеви истраживања су верификовани публиковањем рада у часопису са фактором утицаја. Осим конкретних доприноса перформансама програма, евидентираних у бројним изведеним експериментима, резултат истраживања представљају и закључци и као и потенцијал за даља унапређења процеса превођења.

На основу свега наведеног, Комисија констатује да је кандидаткиња Маја Вукасовић испунила све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија има посебно задовољство да предложи Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Побољшање перформанси програма употребом делимично контекстно осетљивих профиле” кандидаткиње Маје Вукасовић прихвати, изложи на јавни увид и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

#### ЧЛНОВИ КОМИСИЈЕ

др Мило Томашевић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Милош Цветановић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Милена Вујошевић Јаничић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Математички факултет

др Павле Вулетић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Захарије Радивојевић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет