

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Уроша Раденковића 2018/5014, мастер инжењера електротехнике и рачунарства

Одлуком бр. 320-21 од 20.02.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Уроша Раденковића 2018/5014 под насловом

Спекулативно извршавање инструкција са непрецизно предвиђеним операндима

(енг. *Speculative execution of instructions with imprecisely predicted operands*)

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

Докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу за Рачунарску технику и информатику, кандидат Урош Раденковић је уписао у октобру 2018. године. Кандидат је положио све испите са оценом 10 и остварио 120 ЕСПБ. Такође, испунио је све обавезе везане за студијски истраживачки рад које су предвиђене наставним планом и програмом докторских студија. Кандидат је 28.08.2023. пријавио тему за израду докторске дисертације под насловом „Спекулативно извршавање инструкција са непрецизно предвиђеним операндима” Катедри за рачунарску технику и информатику на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Катедра за рачунарску технику и информатику, на својој седници одржаној дана 29.08.2023. године, размотрила је пријаву теме докторске дисертације коју је поднео кандидат. Катедра је утврдила 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 Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на својој седници одржаној дана 05.09.2023. године разматрала пријаву теме за израду докторске дисертације и предлог састава Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације. Комисија за студије трећег степена је пријаву теме и предлог састава Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације упутила Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је, на својој 889. седници одржаној дана 12.09.2023. године, донело одлуку бр. 1290/55 о именовану Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу:

- др Милош Цветановић, ванредни професор Универзитета у Београду, Електротехнички факултет
- др Владимир Миловановић, ванредни професор Универзитета у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука
- др Драгомир Ел Мезени, доцент Универзитета у Београду, Електротехнички факултет

За ментора је предложен др Захарије Радивојевић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације је одржана дана 20.09.2023. године. Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације оценила је усмену одбрану као успешну (оцена „задовољно“).

Комисија за студије трећег степене Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на својој седници која је одржана дана 03.10.2023. године разматрала записник Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације са јавне усмене одбране, који је упутила Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је, на својој 890. седници одржаној дана 10.10.2023. године, усвојило извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата, а за ментора је именован др Захарије Радивојевић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је, на својој седници одржаној дана 20.11.2023. године, дало сагласност на предложену тему докторске дисертације и именоване ментора (бр. одлуке 61206-4276/2-23).

Кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену 06.02.2024. године.

Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду је, на седници одржаној дана 13.02.2024. године, потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду за формирање Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је, на својој 894. седници одржаној дана 20.02.2024. године, именовало Комисију за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Милош Цветановић, ванредни професор Универзитета у Београду, Електротехнички факултет
- др Бошко Николић, редовни професор Универзитета у Београду, Електротехнички факултет
- др Владимир Миловановић, ванредни професор Универзитета у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука
- др Драгомир Ел Мезени, доцент Универзитета у Београду, Електротехнички факултет
- др Живојин Шуштран, доцент Универзитета у Београду, Електротехнички факултет

1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада научној области Електротехника и рачунарство, а ужа научна област дисертације је Рачунарска техника и информатика, док у оквиру уже научне области припада области Архитектуре и организације рачунара. Ментор дисертације је др Захарије Радивојевић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, који има доприносе у наставном и научном раду у области Архитектуре и организације рачунара.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Урош Раденковић рођен је 20. августа 1993. године у Јагодини, Република Србија. Основну школу „Бошко Ђуричић” у Јагодини завршио је као ђак генерације и носилац Вукове дипломе. Гимназију у Јагодини „Светозар Марковић”, природно-математичког смера, завршио је као носилац Вукове дипломе 2012. године. Током основне и средње школе учествовао је на републичким такмичењима из физике и хемије. За успехе током школовања добио је Октобарску награду града Јагодине 2007. године.

Након завршене средње школе, уписао се на Електротехнички факултет у Београду, студијски програм Електротехника и рачунарство, а дипломирао на Модулу за рачунарску технику и информатику 2016. године са просечном оценом 9,33. Дипломски рад „Унапређење визуелног дебагера за језик *Capsules* за развој графичких корисничких интерфејса Веб апликација” под менторством проф. др Драгана Милићева, одбранио је са оценом 10. Током основних студија био је демонстратор на неколико предмета при Катедри за рачунарску технику и информатику.

Мастер академске студије на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за рачунарску технику и информатику уписао је у октобру 2016. године. Мастер рад „Алат за тестирање система за предвиђање скокова код процесора са проточном обрадом” под менторством проф. др Захарија Радивојевића, одбранио је 2018. са оценом 10. Просечна оцена на мастер студијама је 10,00.

Докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2018. године и положио је све испите са просечном оценом 10,00. У свом истраживачком раду показао је изузетно интересовање за области архитектуре и организације рачунара, са посебним акцентом на механизме предвиђања скокова и предвиђања вредности. Похађао је летњу школу ACACES (*Advanced Computer Architecture and Compilation for High-performance Embedded Systems*) 2019. године. Током мастер и докторских студија објавио је као аутор или коаутор 9 научних радова на међународним и домаћим конференцијама, као и 2 рада у истакнутим међународним часописима. Био је рецензент научних радова на конференцији *ETRAN* и у часопису *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*.

Од децембра 2016. запослен је био као сарадник у настави на Електротехничком факултету у Београду. Од децембра 2018. је запослен као асистент на истом факултету и тренутно је ангажован на предметима: Објектно-оријентисано програмирање 1, Архитектура рачунара, Оперативни системи 1, Практикум из оперативних система, Архитектура и организација рачунара 1 и Микропроцесорски системи.

Током периода у ком је запослен на Електротехничком факултету учествује или је учествовао на више научних и комерцијалних пројеката. Учесник је или је био учесник на неколико научних пројекта: 1) „Развој дигиталних технологија и умрежених сервиса у системима са уграђеним електронским компонентама” који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја; 2) „УНАР – Унапређење наставе из Архитектуре рачунара” који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја; 3) „*Advancing novel textual similarity-based solutions in software development (AVANTES)*” који финансира Фонд за науку Републике Србије; 4) „*Belgrade Data Innovation Hub (BELDIH)*” -

HORIZON 2020. 5) „Software for Text Offenses Prevention in Serbian: AI-driven Hate Speech Detection“ (*STOP*) који финансира Фонд за науку Републике Србије. На комерцијалним пројектима је сарађивао са неколико фирми (*URSA* и *NetSet*) као и са колегама са других катедри Електротехничког факултета.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на српском језику ћириличним писмом и има 127 страна од чега је 106 нумерисано. Дисертација садржи 38 слика, 6 табела, 45 једначина и 3 исечка са програмским кодом. Дисертација је подељена на 9 поглавља:

1. Увод
2. Предвиђање вредности
3. Постојећи предиктори вредности
4. Поставка проблема
5. Аналитички модели извршавања
6. Методологија и опис симулација
7. Резултати
8. Смернице за даља истраживања
9. Закључак

Додатно дисертација садржи и насловне стране на српском и енглеском језику, страну са информацијама о ментору и члановима комисије за преглед и оцену, захвалницу, сажетак на српском и енглеском језику, садржај, списак слика, списак табела, списак литературе са 75 референци наведених по редоследу појављивања 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

Осим уводног поглавља, дисертација има још осам поглавља. У уводном поглављу је представљен кратак осврт на најбитније моменте у развоју рачунарства, тј. у развоју самих процесора како би се сагледала улога области архитектуре рачунара као и ком њеном делу припада докторска дисертација. Такође, представљене су основне идеје, значај и циљ докторске дисертације.

У другом поглављу је дат опис механизма предвиђања вредности, основе рада предиктора вредности и начини на који се предиктори вредности могу користити. Такође, приказана је основна подела предиктора вредности према начину на који врше предвиђање. У другом поглављу су представљени и тренутни изазови и проблеми код механизма предвиђања вредности као што је опоравак процесора услед лошег предвиђања и кашњење које уносе предиктори вредности.

Треће поглавље докторске дисертације садржи опис најчешће помињаних предиктора вредности у научним радовима као и са светског такмичења у предвиђању вредности. За сваки предиктор приказана је принципска шема функционисања и објашњене су основне идеје на који начин врше предвиђање вредности.

У четвртном поглављу је представљена главна идеја као и мотивација за израду докторске дисертације. Представљена су решења којима се ублажавају уочени проблеми код механизма предвиђања вредности. У оквиру овог поглавља описане су инструкције, као и типови операнада који су погодни за предвиђање вредности у случајевима када је

предвиђање непрецизно. Такође, у оквиру четвртог поглавља дате су и полазне хипотезе докторске дисертације.

Пето поглавље садржи описе два развијена аналитичка модела спекулативног извршавања. Један модел описује спекулативно извршавање са тачно предвиђеним вредностима операнада. Други модел описује спекулативно извршавање које укључује и тачно и непрецизно предвиђене вредности операнада уколико се са њима добија тачан резултат инструкције. Идеја је да се предиктори вредности користе за предвиђање вредности операнада погодних инструкција. Такве инструкције могу произвести тачан резултат и са непрецизно предвиђеним операндима избегавајући губљење времена на опоравак услед лошег предвиђања.

У шестом поглављу представљена је методологија истраживања које је спроведено у оквиру докторске дисертације. У оквиру шестог поглавља описани су спроведени експерименти и коришћени тестови *SPEC* и *EEMBC*. Такође, описана је надоградња симулатора *Gem5* и развијени симулатор *VPSim*. Симулатор *Gem5* је надограђен на начин да производи траг извршавања тестова, док развијени симулатор *VPSim* користи произведене трагове над којима спроводи симулацију извршавања инструкција са предвиђањем вредности операнада (трагом вођена симулација).

У оквиру седмог поглавља представљени су добијени резултати у спроведеним експериментима. На основу добијених резултата дати су коментари у вези са важењем полазних хипотеза. Евалуацијом представљених аналитичких модела извршавања и на основу резултата симулација одређени су услови под којима модел који укључује и непрецизно предвиђене вредности може постизати боље очекивано време извршавања од модела са тачно предвиђеним вредностима.

Осмо поглавље садржи коментаре у вези са могућим правцима даљег истраживања теме ове докторске дисертације. Дата је анализа могућности развијања новог предиктора вредности који би користио феномен да није увек неопходно предвидети комплетно тачну вредност. Такође, представљен је још један модел извршавања који би укључивао још и информацију ког типа је инструкција која користи резултат инструкције за коју је извршено (непрецизно) предвиђање вредности операнда као и могућност коришћења представљених модела извршавања код процесора са *in order* и *out of order* извршавањем.

Последње, девето поглавље представља закључак ове докторске дисертације. У оквиру њега је дат кратак осврт на спроведено истраживање и сажето су представљени доприноси који су приостекли из докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Савременост дисертације огледа се у томе да отвара нове видике на пољу архитектуре и организације рачунара, пре свега у области предвиђања вредности, где се пажња искључиво обраћа на исправан резултат инструкције иако је можда операнд непрецизно предвиђен. Прецизност предиктора вредности није на високом нивоу уколико предвиђају вредности за све типове инструкција. То води ка честим опоравцима услед лоше предвиђене вредности (промашај) чиме се време извршавања програма повећава. Стога у комерцијалним процесорима и даље није имплементирано спекулативно извршавање коришћењем механизма предвиђања вредности, а ова област се и даље истражује. Такође, значај и актуелност ове теме огледа се и у тренутним истраживањима о чему сведоче прикупљене референце у дисертацији као и у постојању светског такмичења у предвиђању вредности.

Дисертација се бави спекулативним извршавањем са предвиђањем вредности са посебним акцентом на ситуације када вредност није тачно предвиђена, тј. када је вредност непрецизно

предвиђена. У дисертацији су описане ситуације (инструкције и типови операнада) у којима је могуће успешно наставити извршавање иако вредност није тачно предвиђена на начин да непрецизно предвиђена вредност не учите на коректност програма који се извршава на процесору.

За разлику од коришћења предиктора вредности за предвиђање резултата инструкције, у склопу дисертације разматра се предвиђање вредности операнада. Након тога се израчунава резултат инструкције на основу предвиђеног операнда и познатог операнда чија је вредност одмах доступна процесору. Кандидат је представио два аналитичка модела спекулативног извршавања инструкција са предвиђањем вредности операнада. Први модел представља извршавање само са тачно предвиђеним операндима и у случају непрецизно предвиђеног операнда, опоравак од промашаја је обавезан. Други модел дозвољава да се извршавање настави у неким ситуацијама иако је операнд непрецизно предвиђен, уколико је резултат инструкције исправан, чиме се избегава опоравак од промашаја. Други модел представља иновативан приступ спекулативног извршавања код којег је битно само да је резултат инструкције исправан, а не и предвиђене вредности на основу којих се формирао резултат.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У дисертацији је наведено 75 референци које су нумерисане према редоследу појављивања у тексту. Референце обухватају базичне као и најновије научне радове који су у вези са темом докторске дисертације, а који су објављени у међународним часописима и зборницима радова међународних конференција што потврђује значај, релевантност и савременост теме. Такође, међу референцама су наведени и радови које је кандидат објавио као аутор верификујући доприносе дисертације.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру дисертације прво је дата детаљна анализа постојећих механизма предвиђања вредности. Представљени су начини на који се они могу користити на процесорима, њихови доприноси, али и ограничења и сложености које уносе у архитектуру и организацију процесора. Такође, детаљно су истражени и представљени најпознатији постојећи предиктори вредности, укључујући и оне представљене на светском такмичењу у предвиђању вредности.

Након тога, идентификоване су и описане инструкције које су погодне за извршавање са непрецизно предвиђеним операндима, тј. инструкције које могу произвести исправан резултат и са непрецизном вредношћу операнда. Код таквих инструкција резултат не зависи од свих битова операнда чија се вредност предвиђа, као што су нпр. логичко ИЛИ и логичко И. На пример ако познати операнд на неким позицијама у бинарном запису има вредност један то значи да предвиђени операнд на тим позицијама може имати било које вредности код инструкције или. Такође, погодне инструкције за предвиђање операнада су инструкције чији резултат јесте само постављање индикатора у програмској статусној речи. Такве инструкције су инструкције поређења и тестирања. На пример ако се предвиђени операнд пореди са нулом и ако је његова стварна вредност већа од нуле, довољно је да предвиђена вредност буде било која вредност већа од нуле. Ово значи да постоји скуп непрецизних вредности које може имати операнд чија се вредност предвиђа, а да резултат инструкције буде исправан. Погодни типови операнада за предвиђање вредности који су идентификовани у дисертацији су они чија вредност потиче из меморије, јер они могу изазвати заустављање извршавања у случају промашаја у оквиру кеш меморије.

У оквиру дисертације су потом дефинисана два аналитичка модела извршавања са предвиђањем вредности операнада. Модели су представљени у виду усмерених графова, где сваки чвор представља једну инструкцију или стање у које процесор прелази услед опоравка

због промашаја. За оба модела је дефинисано математичко очекивање које представља очекивано време извршавања одређеног броја инструкција према том моделу. Први модел представља извршавање само са тачно предвиђеним операндима и у случају непрецизно предвиђеног операнда, опоравак од промашаја је обавезан. Други модел дозвољава да се извршавање настави у неким ситуацијама иако је операнд непрецизно предвиђен, уколико је резултат инструкције исправан, чиме се избегава опоравак од промашаја.

У оквиру истраживања коришћене су две групе тестова перформанси процесора (енгл. *benchmarks*) за евалуацију представљених модела извршавања. Једну групу тестова представља подскуп тестова који припадају групи тестова *SPEC*, док другу групу тестова чине тестови који припадају групи тестова *EEMBC*. Коришћени тестови су написани на програмским језицима *C* и *C++*. За њихово превођење до извршивих датотека коришћен је преводилац *gcc* за архитектуру *x86* на којој је спроведено истраживање. Добијене извршиве датотеке су потом коришћене као улаз симулатора *Gem5*.

Како је за извршавање тестова (извршиве датотеке) потребна и подршка оперативног система због тога што тестови користе системске услуге, одабран је симулатор *Gem5* који има могућност емулирања системских услуга и који се користи у истраживањима везаним за архитектуру рачунара, а такође има и активну заједницу која га одржава. Симулатор *Gem5* је надограђен тако да прати извршавање инструкција, приступ меморији и генерише траг извршавања са неопходним информацијама за рад симулатора *VPSim*.

Кандидат је развио симулатор *VPSim* који спроводи трагом вођену симулацију извршавања инструкција (енгл. *trace-driven simulation*) са предвиђањем вредности операнда. У оквиру овог симулатора имплементиран је механизам који извршава инструкције са предвиђањем вредности операнда и у оквиру њега је имплементирано укупно седам различитих предиктора вредности. Спроведеним симулацијама коришћењем *VPSim* симулатора прикупљена је статистика која је потом искоришћена како би се упоредили представљени модели извршавања.

На крају дисертације, на основу резултата симулација извршена је визуелизација резултата и евалуација дефинисаних модела извршавања. Дефинисани су услови када извршавање према моделу са непрецизно предвиђеним операндима постиже краће време извршавања од извршавања према моделу са тачно предвиђеним операндима на основу резултата симулације. Такође, на основу резултата симулације утврђене су полазне хипотезе дисертације и изведени су закључци као и могући правци даљег истраживања у вези са спекулативним извршавањем инструкција са непрецизно предвиђеним операндима.

Кандидат је применио потпуно адекватне научне методе које се користе у области којом се дисертација бави, а томе сведочи развијање аналитичких модела, коришћење познатог симулатора отвореног кода *Gem5*, развијање новог симулатора *VPSim* као и коришћење стандардизованих тестова перформанси процесора.

3.4. Применљивост остварених резултата

Рад на докторској дисертацији је био инспирисан идејом да се искористе механизми предвиђања вредности и у ситуацији када вредност није исправно предвиђена. На тај начин се у неким ситуацијама избегава опоравак процесора услед лоше предвиђене вредности, чиме се скраћује време извршавања програма. Како у комерцијалним процесорима и даље није имплементирано спекулативно извршавање коришћењем механизма предвиђања вредности, резултати који су представљени у дисертацији имају практичну примену. Представљени резултати могу послужити као основа за даља разматрања могуће имплементације спекулативног извршавања са непрецизно предвиђеним вредностима у конкретним постојећим архитектурама. У оквиру дисертације су описане инструкције као и њихови типови операнда који су погодни за непрецизно предвиђање вредности. Примена

представљеног модела извршавања са непрецизно предвиђеним операндима над описаним инструкцијама може убрзати извршавање програма.

У оквиру осмог поглавља дисертације, а на основу резултата дисертације, представљена је идеја о креирању новог предиктора вредности који би предвиђао само неке битове вредности, а не комплетну вредност, јер је и са непрецизном вредношћу могуће у неким ситуацијама добити исправан резултат. Такође, у осмом поглављу су прокоментарисане могућности имплементације извршавања инструкција према представљеном моделу код процесора са *in order* и *out of order* извршавањем.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током докторских студија кандидат је детаљно истражио и прегледао литературу из области спекулативног извршавања која обухвата механизме предвиђања скокова и предвиђања вредности, те је показао да је способан да сагледа тренутно стање области, предности и недостатке постојећих решења. Током истраживања теме докторске дисертације кандидат је успео да постави хипотезе истраживања и да их на ваљан начин провери и верификује, што је резултирало објављивањем научних радова кандидата на конференцијама и у истакнутом међународном часопису. Кандидат је током израде докторске дисертације успешно аналитички моделовао извршавање инструкција са непрецизно предвиђеним операндима, а потом имплементирао и спровео симулације на основу дефинисаних модела како би биле тестиране и верификоване полазне хипотезе. Треба поменути да се кандидат од почетка докторских студија бавио овом облашћу, остао истрајан и доследан у истраживању чији је коначан резултат докторска дисертација. На основу свега наведеног, можемо закључити да је кандидат Урош Раденковић показао задовољавајући степен способности за самостални научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Главни доприноси дисертације су остварени у следећим правцима:

- Преглед и исцрпна анализа постојећих механизма предвиђања вредности који обухвата начине њихових функционисања као и начине опоравка процесора услед лошег предвиђања.
- Идентификација и опис карактеристика инструкција и њихових операнада који су погодни за предвиђање у случајевима непрецизно предвиђених вредности.
- Дефинисана два аналитичка модела извршавања инструкција са предвиђањем операнада, једног који представља извршавање само са тачно предвиђеним операндима и другог који представља извршавање и са тачно и са непрецизно предвиђеним операндима уколико је резултат инструкције исправан.
- Надоградња симулатора *Gem5* модулом за генерисање трагова извршавања као и скуп трагова извршавања који су формиран.
- Имплементација новог симулатора за потребе извршавања инструкција на основу дефинисаних аналитичких модела. У склопу симулатора су имплементирани постојећи механизми предвиђања, четири опште позната и три најбоље пласирана са светског такмичења у предвиђању вредности.
- Евалуација дефинисаних модела извршавања и дефинисање услова када извршавање према моделу са непрецизно предвиђеним операндима постиже боље време извршавања од извршавања према моделу са тачно предвиђеним операндима на основу прецизности постојећих предиктора вредности.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Главни изазов приликом примене механизма предвиђања вредности јесте постизање високе прецизности како би се ређе дешавали временски скупи опоравци услед лошег предвиђања. Дисертација предлаже решење за искоришћење механизма предвиђања вредности при предвиђању вредности операнда инструкција чији резултати могу бити тачни чак и када предвиђени операнди имају непрецизне вредности. На тај начин у ситуацијама када је резултат инструкције на основу непрецизно предвиђене вредности операнда тачан, избегава се опоравак услед лошег предвиђања јер је резултат инструкције исправан. Предложено решење представља унапређење научних знања доступних у литератури јер на оригиналан начин представља могућност искоришћења механизма предвиђања вредности који може убрзати извршавање програма.

Представљени резултати симулација у дисертацији показују да је прецизност тачно погођеног резултата инструкције на основу предвиђене вредности операнда већа од прецизности тачно погођене вредности операнда. Та разлика се креће од 0,8% до 44% у зависности од предиктора. Евалуацијом представљених аналитичких модела извршавања и на основу резултата симулација одређени су услови под којима модел који укључује и непрецизно предвиђене вредности може постизати боље очекивано време извршавања од модела са тачно предвиђеним вредностима. Услови су дефинисани у виду неједнакости која мора бити задовољена, а која укључује просечно време извршавања инструкције, време потребно за опоравак услед нетачног предвиђања, време потребно да се дохвати податак из меморије (кашњење меморије) и поменути разлику прецизности. За неке вредности поменутих параметара неједнакост увек важи, што значи да модел са непрецизним вредностима постиже краће очекивано време извршавања. Такође, на основу резултата симулација закључено је да модел са непрецизно предвиђеним вредностима постиже краће очекивано време извршавања уколико је однос времена потребног за опоравак услед лошег предвиђања и просечног трајања једне инструкције већи од десет.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Урош Раденковић је објавио следеће радове који су у непосредној вези са докторском дисертацијом:

Категорија M22:

1. **U. Radenković, M. Mićović, Z. Radivojević, Evaluation and Benefit of Imprecise Value Prediction for Certain Types of Instructions, Electronics , Vol. 12, No. 17, pp. 1 - 23, Aug, 2023. [ISSN: 2079-9292, M22, IF₂₀₂₂=2.9] DOI: 10.3390/electronics12173568**

Категорија M33:

1. **U. Radenkovic, M. Micovic, Z. Radivojević, A mechanism for mitigation of branch prediction calculation latency, ICIST 2020 - 10th International Conference on Information Society and Technology, pp. 146 - 149, Society for Information Systems and Computer Networks, Kopaonik, Serbia, Mar, 2020. [ISBN: 978-86-85525-24-7, ISSN: 2738-1447]**

Категорија M63:

1. **У. Раденковић, М. Мићовић, Ф. Хаџић, З. Радивојевић, Алат за тестирање система за предвиђање скокова, Зборник радова 25. научне конференције "YU INFO 2019", pp. 77 - 82, Информационо друштво Србије, Копаноник, Србија, Мар, 2019. [ISBN: 978-86-85525-23-0]**

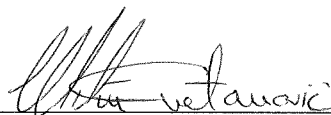
5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Дисертација предлаже оригинално решење како се могу искористити механизми предвиђања вредности приликом предвиђања вредности операнада одређених типова инструкција чији резултати могу бити исправни у неким ситуацијама чак и са непрецизно предвиђеним вредностима операнада. Операнди који се предвиђају јесу они који нису одмах доступни процесору, а то су операнди који потичу из меморије, чиме се сакрива кашњење меморије. Дефинисана су два аналитичка модела спекулативног извршавања инструкција са предвиђањем вредности операнада. Први модел представља извршавање само са тачно предвиђеним операндима, док други модел дозвољава да се извршавање настави иако је операнд непрецизно предвиђен уколико је резултат инструкције исправан, чиме се избегава опоравак од промашаја. Предложено решење и дефинисани модели извршавања су евалуирани коришћењем стандардизованих тестова перформанси процесора, а за потребе евалуације развијен је и нови симулатор на основу дефинисаних модела спекулативног извршавања. На крају су дефинисани услови када извршавање према моделу са непрецизно предвиђеним операндима постиже боље време извршавања од извршавања према моделу са само тачно предвиђеним операндима. Дисертација приказује потенцијал који има спекулативно извршавање са непрецизно предвиђеним операндима, а резултати изложени у дисертацији су верификовани објављеним научним радовима кандидата. Кандидат је спроведеним истраживањем показао способност за даљи самостални научно-истраживачки рад.

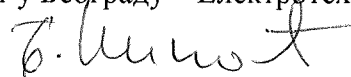
На основу свега наведеног, Комисија констатује да је кандидат Урош Раденковић испунио све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија има задовољство да предложи Наставном-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Спекулативно извршавање инструкција са непрецизно предвиђеним операндима” кандидата Уроша Раденковића прихвати, изложи на јавни увид и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 29.02.2024.

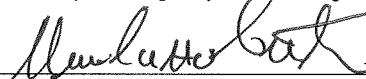
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



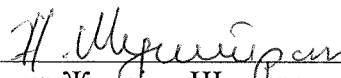
др Бошко Николић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Владимир Миловановић, ванредни професор
Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука



др Драгомир Ел Мезени, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Живојин Шуштран, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет