

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Ненада Королије

Одлуком Наставно-научног већа бр. 915/3 од 21.12.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ненада Королије под насловом „Убрзавање извршавања временски захтевних софтверских апликација конфигурисањем наменског хардвера у време извршавања програма на вишепроцесорским рачунарима”.

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

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија олобравања и израде дисертације

18.05.2009. године кандидат Ненад Королија је магистрирао на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на смеру Архитектура и организација рачунарских система и мрежа са просечном оценом 10.0, одбравивши магистарску тезу под насловом „Прављење распореда извршавања нити DTA архитектуре”.

4.4.2013. године кандидат је пријавио тему за израду докторске дисертације под насловом „Убрзавање извршавања временски захтевних софтверских апликација конфигурисањем наменског хардвера у време извршавања програма на вишепроцесорским рачунарима”.

9.4.2013. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање.

16.4.2013. године Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр 915/1) у саставу:

др Вељко Милутиновић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Милош Цветановић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Душан Старчевић, редовни професор, Универзитет у Београду – Факултет организационих наука

11.7.2013. године Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 915/2).

16.9.2013. године Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број одлуке 61206-3931/2-13).

30.11.2016. године кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену.

6.12.2016. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

21.12.2016. године Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (број одлуке 915/3) у саставу:

др Вељко Милутиновић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Милош Цветановић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Душан Старчевић, редовни професор, Универзитет у Београду – Факултет организационих наука

др Захарије Радивојевић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Милан Поњавић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација мр Ненада Королије припада научној области „Техничке науке – Електротехника и рачунарство” и ужој научној области „Архитектура и организација рачунарских система” за које је Електротехнички факултет у Београду матичан. Ментор је др Вељко Милутиновић, редовни професор у пензији Електротехничког факултета у Београду. Професор Милутиновић је Fellow of the IEEE, члан Academia Europaea и аутор и коаутор више од 50 радова у страним стручним часописима и преко 20 стручних књига објављених од стране већих страних издавачких кућа из области архитектуре и организације рачунарских система, пројектовања VLSI система и других.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Ненад Королија је рођен 16.02.1978. у Београду, Република Србија, где је завршио основну и средњу школу са одличним успехом. Уписао је основне студије на Електротехничком факултету, Универзитета Београду, 1997. године. Дипломирао је 2002. године на смеру за рачунарску технику и информатику.

Од 2003. године ради као виши лабораторијски инжењер на катедри за Рачунарску технику и информатику Електротехничког факултета у Београду, а такође је учествовао и у реализацији више интернационалних пројеката, међу којима је и пројекат „Cache implications of non-blocking thread execution in a multithreaded architecture“, у трајању од 12 месеци, финансиран од стране ФП7 пројекта HiPEAC (High-Performance Embedded Architectures and Compilers). Као лабораторијски инжењер, био је ангажован на предметима из области рачунарства. Последипломске студије на Електротехничком факултету у Београду, смер Софтверски системи, уписао је 2002. године и положио све испите предвиђене Наставним планом и програмом магистарских студија, са просечном оценом 10 (десет). Магистарски рад под

насловим „Прављење распореда извршавања нити DTA архитектуре” је одбранио 2009. код проф. др Вељка Милутиновића.

Аутор је више радова у часописима, од чега су три часописа на СЦИ листи, као и више радова објављених на домаћим и интернационалним конференцијама у областима архитектуре рачунара, софтвера и дистрибуираних рачунарских система.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на српском језику, ћириличним писмом, на 140 страна и садржи 41 слику, 11 табела и 105 библиографских референци. Састоји се од насловне стране на српском и енглеском језику, стране са информацијама о метору и члановима Комисије, захвалнице, кратког резимеа на српском и енглеском језику, садржаја, списка слика, списка табела, списка скраћеница и 9 поглавља:

1. Увод
2. Употреба реконфигурабилног хардвера
3. Паралелизација извршавања апликација употребом парадигме засноване на протоку података (енг. *dataflow*)
4. Алгоритми за прављење распореда извршавања послова
5. Резултати поређења алгоритама
6. Анализа резултата
7. Претње валидности резултата
8. Закључак
9. Литература

Поред тога, дисертација садржи и прилог, биографију аутора, изјаву о ауторству, изјаву о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводно поглавље даје основне информације о месту и улози реконфигурабилног хардвера у модерним рачунарским системима, затим описује проблем прављења распореда извршавања послова на хетерогеном систему који се састоји од процесора заснованих на контроли тока (енг. *control-flow*) и реконфигурабилног хардвера заснованог на употреби VLSI технологије. Затим су укратко описане методе истраживања, а затим дати очекивани научни доприноси и структура самог рада.

У другом поглављу је дата кратка историја реконфигурабилног хардвера, а затим и преглед постојећег реконфигурабилног хардвера уз описивање главних карактеристика.

Трећа глава описује начин на који се убрзава извршавање апликација коришћењем реконфигурабилног хардвера заснованог на протоку података. Парадигма заснована на протоку података је упоређена са Feynman парадигмом. Дат је преглед начина програмирања једнопроцесорских и вишепроцесорских рачунара заснованих на контроли тока, као и рачунара заснованих на протоку података. Након тога су описане постојеће методе за трансформисање алгоритама за рачунаре засноване на контроли тока на алгоритме за рачунаре засноване на протоку података. При томе су посматрана решења из области које

укључују систоличке низове, развој програмских преводаца, као и решења из доступних алата за развој апликација за рачунаре засноване на протоку података. Затим је дат пример имплементације Lattice-Boltzmann алгоритма употребом постојећих алата.

Четврто поглавље је посвећено алгоритмима прављење распореда извршавања послова на рачунару који се састоји из процесора заснованог на контроли тока и реконфигурабилног хардвера. Дат је преглед постојећих алгоритама за прављење распореда извршавања послова, након чега су предложена два нова алгоритма за распоређивање послова на предложеној организацији рачунара заснована на хеуристици.

У петој глави су дати резултати поређења алгоритама. Моделована је организација рачунара која комбинује процесор заснован на контроли тока и харвер заснован на протоку података. Затим су моделовани послови које је потребно извршавати, а затим је за сваки од алгоритама за хардвер заснован на протоку података дат график убрзања извршавања и смањења потрошње електричне енергије у односу на рачунаре који поседују само процесоре засноване на контроли тока. На крају су дати графици убрзања за случај комбиновања претходно описаних послова за случаје када меморија јесте или није ограничавајући фактор.

Резултати су анализирани у шестој глави. Указује се на потенцијалну грешку која се може направити уколико се искључиво посматра једна метрика за прављење распореда извршавања послова на предложеној организацији рачунара. Анализирани су фактори убрзања и исплативост коришћења предложене организације рачунара у зависности од односа количине послова за процесоре засноване на контроли тока и хардвер заснован на протоку података.

У седмој глави су критички посматрани резултати поређења алгоритама за прављење распореда извршавања послова, као и употребе самог предложеног хардвера. Наводе се услови који морају бити задовољени да би се предложени алгоритам за прављење распореда могао употребити. Затим су описана ограничења меморије при употреби алгоритама који захтевају обраду великих количина података.

У оквиру осмог, закључног, поглавља је дат преглед доприноса употребе реконфигурабилног хардвера, као и предложених алгоритама за прављење распореда извршавања послова. У овом поглављу су дати и предлози за даље правце истраживања.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Побољшавање перформанси модерних рачунара се и даље претежно заснива на повећању броја језгара процесора, чиме се намеће проблем програмирања алгоритама који ће се извршавати на више процесорских јединица, било да су то језгра процесора, чворови кластера, или рачунари повезани мрежом. Овај проблем се у случају специфичних апликација које захтевају униформну обраду великих количина података може решити употребом реконфигурабилног хардвера који се заснива на протоку података. Овим приступом се може знатно убрзати извршавање одговарајућих апликација, али и смањити потрошња електричне енергије. Услед тога, реконфигурабилни хардвер заснован на протоку података све више добија на значају.

Предложени алгоритми за прављење распореда извршавања послова на реконфигурабилном хардверу заснованом на протоку података нису одговарајући за прављење распореда послова процесора који по правилу могу да имају велики број послова на располагању за распоређивање у сваком тренутку када је потребно направити распоред. Са друге стране, број послова за реконфигурабилни хардвер као што је Maxeler картица је по правилу релативно мали, док је убрзање које се може постићи веће приликом прављења квалитетног распореда овакве организације рачунара него што је у случају извршавања послова на процесорима

заснованим на контроли тока, јер се послови на хардверу заснованом на протоку података по правилу знатно дуже извршавају. Услед свега наведеног, предложени алгоритми употребом хеуристике уз релативно велику сложеност праве довољно боље распореде од постојећих алгоритама, што њихову употребу чини исплативом.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У овој дисертацији је коришћена литература која броји више од 100 библиографских референци. Цитирани су и радови из релевантних области из којих су искоришћене методе које се могу применити на реконфигурабилних хардвер и актуелни радови из угледних међународних часописа. Наведени списак литературе указује да је кандидат прегледао и цитирао референтне изворе из области архитектуре рачунарских система, реконфигурабилног хардвера и прављења распореда извршавања послова, који су релевантни за тему дисертације. У дисертацији су такође цитирани и радови самог кандидата.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Приликом израде докторске дисертације, анализирани су принципи функционисања Lattice-Voltzmann алгоритма, а затим је утврђено који делови представљају уско грло система када је извршавање алгоритма у питању. Након имплементације алгоритма и израчунавања перформанси на конвенционалном рачунару, са процесором заснованим на контроли тока, идентификовани су они делови кода који могу представљати уско грло система. Анализом метода доступних из теорије систоличких низова, али и модерних програмских преводаца, изабране су оне методе којима се може решити проблем који доводи до ограничавања протока података у уском грлу система. Затим је алгоритам модификован тако да се може извршити на рачунару заснованом на протоку података. Предложен је и анализиран алгоритам за прављење распореда извршавања послова на предложеној реконфигурабилној организацији рачунара. Затим су аналитичким методама и на примеру показане могућности убрзавања извршавања послова употребом предложеног алгоритма за прављење распореда извршавања послова.

Примењене методе у потпуности одговарају постављеним циљевима, као и стандардима научноистраживачког рада у овој области. Примена неких од метода по први пут у овој области, попут хеуристике за смањивање броја претрага најбољег распореда у рекурзивном алгоритму за прављење распореда извршавања послова, дала је нов квалитет добијеним резултатима у области убрзавања извршавања алгоритама употребом реконфигурабилног хардвера заснованог на протоку података, што додатно потврђује адекватност примењених метода.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Дисертација се бави реалним и актуелним проблемима у модерним архитектурама рачунара заснованих на употреби реконфигурабилног хардвера, чиме су остварени услови за применљивост остварених резултата. У самој тези је описана примена ових резултата на прављење распореда извршавања послова који укључују алгоритме који се могу убрзати уколико се извршавају на хардверу заснованом на протоку података.

Имплементиран је Lattice-Voltzmann алгоритам за симулацију динамике флуида, који је тестиран и на процесору заснованом на контроли тока и на хардверу заснованом на протоку података. Овај алгоритам је често коришћен за симулације протока крви кроз крвоток, воде и уља кроз цеви, итд. Коришћењем овог алгоритма, у великој мери се убрзава извршавање симулација, уз истовремено смањење потрошње електричне енергије.

Затим је имплементиран алгоритам за прављење распореда извршавања оваквих послова, као и послова који се не могу убрзати употребом хардвера заснованог на протоку података. Извршено је поређење времена извршавања у ова два случаја. Дат је однос броја послова за процесор заснован на контроли тока и хардвер заснован на протоку података за који се употребом предложене организације рачунара може убрзати извршавање извршавања послова.

Важан допринос представља предложени модел рачунара који представља спој процесора заснованих на контроли тока и хардвера заснованог на протоку података. Применљивост овакве организације рачунара је заснована на претпоставци да ће будући рачунари све више и више извршавати временски захтевне апликације. Ова претпоставка се може сматрати оправданом имајући у виду како су се временом апликације које се на рачунарима извршавају усложњавале, као и чињеницу да постоји потреба за 3D симулацијама, али да се и даље оваква рачунања углавном не могу довољно брзо извршавати.

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

Од почетка истраживања до реализације дисертације, кандидат је прошао кроз неколико фаза, показавши способност за самосталан научноистраживачки рад.

Изабрана је актуелна тема архитектуре и организације рачунара, чије истраживање доприноси различитим областима, преко парадигме засноване на протоку података, прављења распореда извршавања послова, до предлагања нове организације рачунара као потенцијалног будућег персоналног рачунара.

Наведена литература указује да је кандидат пажљиво прегледао и проучио релевантне и савремене изворе из области архитектуре рачунара везане за проточну обраду података употребом реконфигурабилног хардвера, као и литературу из области систоличких низова, чији се концепти могу применити на модерне рачунаре засноване на реконфигурабилном хардверу и проточној обради, а затим и релевантну литературу за прављење распореда извршавања послова који одговарају оваквим организацијама рачунара.

Реализација алгоритма на рачунару заснованом на протоку података је захтевала посебно програмерско умеће, као и примену савремених рачунарских система високих перформанси. За то је било потребно не само програмерско умеће, већ и одлично познавање архитектуре и организације рачунара, као и реконфигурабилног хардвера.

Поред тога, кандидат је предложио модификације организације рачунара, које би решиле одређене проблеме убрзавања разноврсних алгоритама на једном рачунару, дељењем хардвера заснованог на протоку података од стране више послова, при чему би се одређени послови извршавали истовремено, у зависности од тога колико који посао захтева којег критичног ресурса.

Добијени резултати су резултовали радовима у међународним часописима на СЦИ листи и презентовани на међународној конференцији. Сама докторска дисертација је обликована у складу са добром праксом у светској научној заједници. На основу свега наведеног, комисија сматра да је кандидат показао висок степен способности са самосталан научни рад.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Из резултата приказаних у дисертацији, могу се издвојити следећи оригинални научни доприноси:

- Развијен је модел организације персоналног рачунара који садржи и процесор на бази контроле тока и хардвер заснован на протоку података
- Идентификовани су делови кода Lattice-Boltzmann алгоритма који представљају уско грло система, када је у питању његово извршење на рачунарима високих перформанси.
- Имплементиран је Lattice-Boltzmann алгоритам за хардвер заснован на протоку података који убрзава извршавање извршавања алгоритма употребом оваквог хардвера у односу на време извршавања на процесору заснованом на протоку података између 17 и преко 100 пута
- Предложен је нови модел распоређивања послова између процесора заснованог на контроли тока и хардвера заснованог на протоку података
- Анализирани су алгоритми који се често извршавају на рачунарима високих перформанси, као и фактори убрзања оних алгоритама, који се могу убрзати коришћењем хардвера заснованог на протоку података.
- Утврђени су критеријуми под којим се предложеном организацијом рачунара може убрзати извршавање апликација. Добијена фактори убрзања су у зависности од односа количине послова за хардвер базиран на протоку података и процесор базиран на контроли тока у опсегу између 1 и 100.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Развијени модел организације персоналног рачунара који садржи и процесор на бази контроле тока и хардвер заснован на протоку података отвара нове могућности када је у питању примена персоналних рачунара за израчунавања која су се до сада претежно вршила на рачунарима високих перформанси. Поред могућности извршавања временски захтевних алгоритама, отварају се и нове могућности када је у питању развој програмских преводаца, разних апликација, оперативних система, итд.

Lattice-Boltzmann је један од најзаступљенијих алгоритама коришћених ради симулације динамике флуида. Идентификовањем делова кода који представљају уско грло система, када је у питању његово извршење на рачунарима високих перформанси, могуће је даље оптимизовати овај алгоритам, како за извршавање на рачунарима заснованим на хардверу заснованом на протоку података, тако и за извршавање на другим рачунарима високих перформанси, уз модификовање алгоритма такво да се постижу боље перформансе, без ремећења прецизности самог алгоритма.

Самом имплементацијом Lattice-Boltzmann алгоритма за хардвер заснован на протоку података, реализована је нова имплементација алгоритма, који је даље могуће побољшавати. Израчуната су времена потребна за извршавање појединих делова овог алгоритма, а процењено је и време потребно за пренос података између процесора и хардвера заснованог на протоку података.

Предложени модел распоређивања послова између процесора заснованог на контроли тока и хардвера заснованог на протоку података се заснива на рекурзивном алгоритму који је применљив само под одговарајућим условима. Идентификовани су ови услови, а затим је процењена и остварљивост ових услова у реалном рачунарском систему. Такође је предложена и имплементирана хеуристика која решава проблеме који се могу јавити у

случају да се релативно велика количина послова налази на располагању алгоритму за прављење распореда извршавања послова.

У последње време, потрошња електричне енергије рачунара високих перформанси и загревање све више добијају на значају. Употребом предложене организације рачунара могуће је не само убрзати извршавање апликација, већ уједно и смањити потрошњу електричне енергије, загревање и потребан простор за саме рачунаре. Анализиране су апликације које се често извршавају на рачунарима високих перформанси, а које се могу убрзати коришћењем хардвера заснованог на протоку података. На основу дате анализе и библиографских референци, могуће је даље унапређење постојећих апликација за одговарајуће реконфигурабилне системе, као и комбиновање извршавања више алгоритама истовремено или секвенцијално на дељеном хардверу.

Иако хардвер заснован на протоку података може убрзати извршавање одговарајућих алгоритама, сам хардвер ради на мањим фреквенцијама од процесора заснованог на контроли тока. Поред тога, овакав хардвер проузрокује додатну потрошњу струје. Самим тим, једино се пажљивом употребом оваквог хардвера могу остварити убрзања и уштеде у потрошњи електричне енергије. Утврђени критеријуми под којим се предложеном организацијом рачунара може убрзати извршавање апликација јасно указују на главне разлоге из којих се употребом предложене организације рачунара може десити да се убрзање не постигне. Што се тиче потрошње електричне енергије, могуће је искључивати хардвер заснован на протоку података када он није употребљив за убрзавање извршавања апликација, али сама чињеница да постоји цена оваквог хардвера оправдава процену услова под којима се може остварити убрзање.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси дисертације верификовани су следећим радом:

##### Категорија M23:

1. Korolija, N., Popović, J., Cvetanović, M., Bojović, M.: Dataflow Based Parallelization of Control-Flow Algorithms, Creativity in Computing and Dataflow Supercomputing, Advances in Computers, Vol. 104, pp. 73-124, DOI: 10.1016/bs.adcom.2016.09.003, 2017, Print ISBN 9780128119556.

Milutinović, V., Furht, B., Obradović, Z., Korolija, N.: Special Issue on Advances in High Performance Computing and Related Issues, editorial, Mathematical Problems in Engineering, Hindawi, 2016, pp. 1-3, DOI: 10.1155/2016/2632306.

##### Категорија M53:

1. Korolija, N., Djukic, T., Milutinovic, V., Filipovic, N.: Accelerating Lattice-Boltzman Method Using the Maxeler DataFlow Approach, Transactions on Internet Research, Vol. 9, No. 2, July 2013, pp. 5-10, ISSN 1820 - 4503.

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

Дисертација се бави проблемом убрзавања извршавања временски захтевних алгоритама употребом реконфигурабилног хардвера заснованог на протоку података. Оваква архитектура се разматра као архитектура будућих персоналних рачунара. Током истраживања и рада на дисертацији, кандидат је показао висок степен способности за самосталан научноистраживачки рад и успео да реши неке од најважнијих проблема рачунара високих перформанси који се односе на модификовање алгоритама тако да буду погодни за предложену организацију рачунара, која омогућава већу брзину извршавања одређених алгоритама уз уштеду електричне енергије.

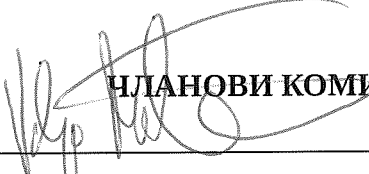


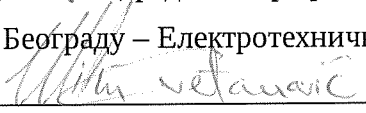
Узимајући у обзир наведене научне доприносе и применљивост добијених оригиналних резултата, научноистраживачко и стручно искуство, као и висок степен потребног знања кандидата и показану зрелост за самосталан научноистраживачки рад, Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Ненада Королије садржи оригиналне научне доприносе који имају доказану практичну применљивост у области архитектура рачунарских система.

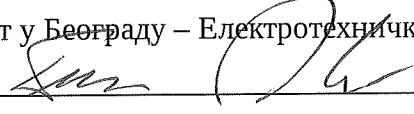
Имајући у виду наведено, предлажемо Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторске дисертација под називом „Убрзавање извршавања временски захтевних софтверских апликација конфигурисањем наменског хардвера у време извршавања програма на вишепроцесорским рачунарима” кандидата Ненада Королије прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

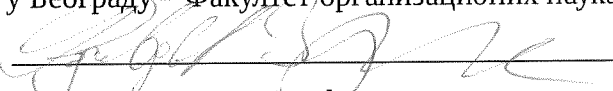
У Београду, 25.12.2016.

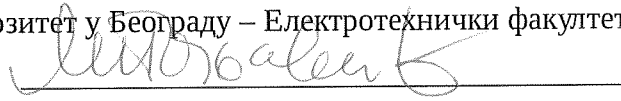
**ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ**

  
др Вељко Милутиновић, редовни професор у пензији  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Милош Цветановић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Душан Старчевић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Факултет организационих наука

  
др Захарије Радивојевић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Милан Поњавић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет