

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марије Малнар, дипл. инж.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5004/07-3 од 14.01.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марије Малнар под насловом

„Оптимизација протокола и метрика рутирања за вишеканалне вишеинтерфејсне бежичне *mesh* мреже”

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 Марија Малнар уписала се школске 2007/2008. године на докторске академске студије, студијски програм Електротехника и рачунарство, модул Телекомуникације и информационе технологије. Тему докторске дисертације под насловом „Оптимизација протокола и метрика рутирања за вишеканалне вишеинтерфејсне бежичне *mesh* мреже” пријавила је 21.10.2013. године. На седници Комисије за студије трећег степена Електротехничког факултета, одржаној 30.10.2013. године, дата је сагласност на предлог теме за израду докторске дисертације и у складу са Правилником о докторским студијама, Наставно-научном већу предложена је Комисија за оцену услова и прихватање теме у саставу: др Наташа Нешковић (ванредни проф. Електротехничког факултета у Београду), др Ирини Рељин (редовни проф. Електротехничког факултета у Београду) и др Горан Марковић (ванредни проф. Саобраћајног факултета у Београду). За ментора дисертације предложена је др Наташа Нешковић.

На 768. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 05.11.2013. године прихваћен је предлог Комисије за студије трећег степена и комисија је допуњена професорима др Александром Нешковићем (ванредни проф. Електротехничког факултета у Београду), и др Александром Смиљанић (ванредни проф. Електротехничког факултета у Београду). Наставно-научно веће потврдило је предложену Комисију за оцену услова и прихватање теме, као и предложеног ментора. На основу извештаја Комисије и пратеће документације, предложена тема је прихваћена на седници Наставно-научног већа, одржаној 21.01.2014. године, а 24.02.2014. године прихваћена је и на Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду (број одлуке 61206-705/2-14 од 24.2.2014. године).

Кандидаткиња је урађену дисертацију поднела на преглед и оцену 27.11.2014. године. На седници Комисије за трећи степен, одржаној 16.12.2014. године, констатовано је да је кандидаткиња предала урађену дисертацију, па је на основу увида у дисертацију и пратећих докумената, а у складу са Правилником о докторским студијама, Комисија за трећи степен студија потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену дисертације у саставу: др Наташа Нешковић (ванредни проф. Електротехничког факултета у Београду), др Ирини Рељин (редовни проф. Електротехничког факултета у Београду) и др Горан Марковић (ванредни проф. Саобраћајног факултета у Београду). На 781. седници Наставно-научног

већа Електротехничког факултета, одржаној 23.12.2014. године (број одлуке 5004/07-3 од 14.01.2015. године) прихваћен је предлог Комисије за трећи степен студија и комисија допуњена др Александром Нешковићем (ванредни проф. Електротехничког факултета у Београду) и др Александром Смиљанић (ванредни проф. Електротехничког факултета у Београду).

На основу одлуке Наставно–научног већа бр. 2944/2 од 11.10.2007. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2007/2008, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета.

По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду, као и додатно продужење за годину дана на основу Одлуке бр. 24-06/02-2007/5004.

1.2. Научна област дисертације

Тема докторске дисертације је оптимизација протокола и метрика рутирања за вишеканалне вишеинтерфејсне бежичне *mesh* мреже. У оквиру дисертације предложене су три нове метрике рутирања које се заснивају на праћењу нивоа снаге сигнала на сваком појединачном линку у мрежи. Поред тога, развијен је и нов протокол за слој линка који у вишеканалне вишеинтерфејсне бежичне *mesh* мреже, по први пут, уводи подршку квалитету сервиса. У ширем смислу дисертација припада научној области Техничких наука – електротехнике, а у ужем смислу области Телекомуникација и информационих технологија. За ментора докторске дисертације одређена је проф. др Наташа Нешковић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, због својих научних доприноса у области радио система.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Марија Малнар рођена је 18.09.1983. године у Београду. Основну школу „Ђура Јакшић” у Београду завршила је 1998. године са максималном просечном оценом (5.00), као носилац Вукове дипломе и ђак генерације. У периоду од 1998. до 2002. године била је ученик Математичке гимназије, коју је завршила, такође, са максималном просечном оценом и била носилац Вукове дипломе. Електротехнички факултет у Београду, смер Телекомуникације, уписала је 2002. године и дипломирала је 28. јуна 2007. године са просечном оценом 9.55. Дипломски рад, под менторством проф. др Наташе Нешковић, „Анализа хардвера и софтвера *Siemens*-ове базне станице BS240” оцењен је максималном оценом 10.

Током студија је, на основу изузетног успеха, била носилац следећих стипендија: 2003-2006 – стипендија Министарства науке и технологије Републике Србије, 2006-2007 – стипендија Министарства просвете и спорта Републике Србије и 2006-2007 – стипендија Града Београда. Током претходног школовања освајала је више награда и диплома од којих се могу издвојити следеће: 1999 године – треће место на Међународном турниру градова; 1998 године – сребрна медаља на Другој јуниорској балканској математичкој олимпијади у Атини, друго место на савезном и треће место на републичком такмичењу из математике.

Почетком 2008. године уписала је Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, смер Телекомуникације и информационе технологије – Телекомуникације, под менторством проф. др Наташе Нешковић. Испите на Докторским студијама положила је са просечном оценом 9.90.

У току досадашњег истраживачког рада Марија Малнар била је аутор или коаутор једног техничког решења у оквиру пројекта Министарства науке и технолошког развоја

(категорија M85), два рада у часописима од међународног значаја (категорија M23), затим два рада на конференцијама од међународног значаја (категорија M33) и седам радова на конференцијама од националног значаја (три рада категорије M61 и четири рада категорије M63). Добитник је награде за најбољи рад младог истраживача на конференцији ТЕЛФОР 2011. Од поменутих радова два рада у часописима од међународног значаја, два рада на конференцијама од међународног значаја, шест радова на конференцијама од националног значаја и једно техничко решење проистекли су из истраживачког рада у оквиру докторске дисертације.

Од 2008. године запослена је на Саобраћајном факултету у Београду. У периоду од 2008. до 2009. радила је као Сарадник у настави на ужој научној области Електротехника са елементима електронике. У мају 2009. изабрана је у звање асистента за ужу научну област Експлоатација телекомуникационог саобраћаја и мрежа, у оквиру Одсека за поштански и телекомуникациони саобраћај, Катедре за телекомуникациони саобраћај и мреже. У настави је ангажована за држање рачунских и лабораторијских вежби из предмета Електротехника, Основе телекомуникација 1, Основе телекомуникација 2, Основе радио комуникација, и Бежични комуникациони системи на Основним студијама, као и Бежичне мреже и Рутирање у комуникационим мрежама на Мастер студијама.

Марија Малнар учествовала је на два пројекта: „Оптичке мреже наредне генерације – истраживање могућности унапређења транспортне мреже Србије”, Пројекат бр. 11013, на коме је била ангажована од 2009. до 2010. и „Развој нових метода и алата за унапређење перформанси, мрежне и економске ефикасности телекомуникационих мрежа наредне генерације”, Пројекат бр. 32025, који финансира Министарство просвете и науке Републике Србије и на коме је ангажована од 2010. године.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на 173 стране куцаног текста латиничним писмом и садржи 51 слику, 14 табела и 144 библиографске референце. Такође, дисертација садржи насловну страну, кратак резиме дисертације на српском и енглеском језику, предговор, садржај, и осам тематских глава. На крају сваке главе налази се списак коришћене литературе у оквиру те главе. Главе дисертације су следеће: 1. Увод, 2. Протоколи рутирања за бежичне *mesh* мреже, 3. Рутирање у вишеканалним бежичним *mesh* мрежама, 4. Метрике рутирања, 5. Развој нових метрика рутирања заснованих на нивоу снаге сигнала на пријему, 6. Подршка квалитету сервиса у WMN, 7. Предложени QoS-NMCP протокол за слој линка, и 8. Закључак.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

План и методологија спроведеног истраживања састоји се од теоријског и практичног дела који су изложени у оквиру докторске дисертације. Наставак докторске дисертације организован је по следећим главама.

У првој глави дата су уводна разматрања, преглед методологије докторске дисертације и структура дисертације. Поред тога, објашњен је значај обрађене теме.

У другој глави дате су основне карактеристике и класификација протокола рутирања у бежичним *mesh* мрежама – WMN (*Wireless Mesh Networks*). У овој глави дат је преглед захтева које протоколи рутирања треба да задовоље. Осим тога, дата је класификација протокола рутирања у WMN по начину проналажења оптималне путање на основу које се протоколи деле на: протоколе засноване на топологији мреже (у које спадају три основне категорије: реактивни, проактивни и хибридни, али и специфични протоколи засновани на топологији мреже у које спадају: *multipath*, хијерархијски и мултикастинг протоколи),

протоколе засноване на позицији чворова (локацијске протоколе), географске мултикаст протоколе (*geocast*) који комбинују особине протокола заснованих на топологији мреже и позицији чворова, и протоколе рутирања засноване на потрошњи снаге. За сваку од наведених категорија протокола дате су основне карактеристике, као и опис карактеристичних представника те категорије и њихова упоредна анализа.

У трећој глави уведено је рутирање у вишеканалним WMN. Дата је класификација протокола рутирања и алгоритама доделе канала у вишеканалним WMN на основу динамике доделе канала. Протоколи су подељени у четири категорије: протоколи за једноинтерфејсне вишеканалне мреже, и три категорије протокола за вишеканалне вишеинтерфејсне – MCMF (*Multi-Channel Multi-Interface*) мреже (протоколи са статичком, динамичком и хибридном доделом канала). За сваку од наведених категорија протокола дате су основне карактеристике, опис карактеристичних представника те категорије и њихова упоредна анализа.

У четвртој глави описане су метрике рутирања за WMN. Наведени су критеријуми креирања метрика рутирања: интерференција, количина информација, оптерећење линка, агилност, изотоничност, проток и стабилност. Осим тога, дат је преглед најзначајнијих метрика рутирања доступних у литератури. На крају ове главе дата је упоредна анализа наведених метрика рутирања на основу критеријума за формирање метрика.

У петој глави описане су нове метрике рутирања засноване на чињеници да сваки чвор у WMN има информацију о нивоу снаге сигнала на улазу у пријемник (док прима пакете од њему суседних чворова) и да у мрежама нису потребна никаква додатна мерења да би се до те информације дошло. Дат је кратак опис коришћеног MCR (*Multi Channel Routing*) протокола рутирања, HMCP (*Hybrid Multi Channel Protocol*) протокола за слој линка и оригиналних ETX (*Expected Transmission Count*), WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*) и MIC (*Metric of Interference and Channel-switching*) метрика, као и развој идеје за формирање нових метрика. Затим је дат опис пропагационог модела који је развијен са циљем добијања прецизних података о пропагационом окружењу који су, потом, коришћени за имплементацију нових метрика, као и проверу њихових перформанси. У наставку поглавља описане су предложене метрике: *powerETX*, *powerWCETT* и *powerMIC*, које укључују утицај нивоа снаге сигнала на пријему у цену линка, а самим тим и у избор оптималне путање. Осим тога, у овој глави, дата је анализа резултата симулација остварених у *GlomoSim* симулатору у коме су имплементирани, како постојеће, тако и нове метрике. Метрике су међусобно упоређене према оствареном протоку корисничких података и кашњењу у мрежи, и образложене предности и мане сваке од њих.

У шестој глави описано је увођење квалитета сервиса у WMN. Укратко је дат преглед 802.11 стандарда и свих његових амандмана, од увођења, до данас. Осим тога детаљније су описана два механизма приступа медијуму за пренос: основни, DCF (*Distributed Coordination Function*), као и EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) механизам приступа којим се уводи диференцирање сервиса у зависности од приоритета и типа саобраћаја. Иако постоји више механизма приступа, предложених 802.11 стандардом, описани су само DCF и EDCA механизам јер су они коришћени у оквиру симулација у *GlomoSim* симулатору за потребе верификације резултата истраживања и развоја новопредложеног QoS-HMCP протокола.

У седмој глави описан је нови QoS-HMCP (*Quality of Service Hybrid Multi Channel Protocol*) протокол за слој линка, заснован на MCR протоколу рутирања и HMCP протоколу за слој линка, који подразумева коришћење једне од претходно дефинисаних нових метрика рутирања (*powerMIC*) и води рачуна о захтевима по питању квалитета сервиса за различите категорије саобраћаја. Дефинисане су четири варијанте QoS-HMCP протокола (SW1-TX1, SW1-TX2, SW2-TX1 и SW2-TX2) за које су дефинисани различити критеријуми промене канала. Дата је анализа резултата симулација QoS-HMCP протокола у *GlomoSim* симулатору, са становишта кашњења и протока у мрежи. Резултати су класификовани на основу типа

сервиса (*voice, video, best-effort* и *background*) и варијанте протокола. Поред тога, приказано је побољшање по питању кашњења и протока корисничких података које се остварује увођењем приоритета за различите категорије саобраћаја у МСМ мреже у односу на основни НМСП протокол. На крају, на основу међусобног поређења предложених варијанти протокола, донети су закључци која варијанта QoS-НМСП протокола даје оптималне резултате (највећи проток и најмање кашњење), за које саобраћајне категорије и под којим мрежним условима.

У осмој глави изложена су закључна разматрања и коначна анализа истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације, као и предлози будућих истраживања у оквиру тематике рутирања и комуникације међу суседима у бежичним *mesh* мрежама.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација припада модерној и атрактивној области бежичних радио мрежа. Савремено друштво било би готово незамисливо без постојања бежичних комуникација чија примена расте сваким даном. Потребу за све већим капацитетима бежичних комуникационих мрежа повећавају лаптоп уређаји, WLANs (*Wireless Local Area Networks*) уређаји, таблет рачунари, мобилни телефони и сл. Услед пораста популарности бежичних мрежа, дошло је до потребе за све већим протоцима података, до смањења цена бежичних уређаја и до све веће размене података бежичним путем. Бежичне *mesh* мреже – WMN представљају новији тренд у бежичним комуникацијама који обезбеђује већу флексибилност, поузданост и боље перформансе у поређењу са стандардним WLAN мрежама. Као и све бежичне мреже, и бежичне *mesh* мреже, имају све ширу примену у јавним мрежама, мрежама за безбедност и сл.

Најзначајнији изазов у пројектовању бежичних *mesh* мрежа представља повећање протока и унапређење квалитета сервиса, QoS (*Quality of Service*), уз одржање ниске енергетске потрошње мрежних уређаја. Имајући у виду све веће захтеве корисника за великим протоцима и брзим и ефикасним преносом података, мреже које раде са једним радио интерфејсом (примопредајником) и на једном радио каналу не могу више да задовоље те захтеве. Стога се последњих година све већа пажња посвећује развоју тзв. вишеканалних вишеинтерфејсних мрежа у оквиру којих сваки чвор има више радио интерфејса који могу да раде на више радио канала.

Осим тога, анализе протокола и метрика рутирања од великог су практичног и теоријског значаја за процену перформанси бежичних комуникационих система. Протоколи рутирања имају важну улогу у проналажењу оптималне путање, креирању мрежне топологије, конфигурацији и одржавању мреже. За одређивање оптималне путање од извора до одредишта протоколи рутирања користе различите метрике рутирања (правила на основу којих се од више формираних путања одређује оптимална). Приликом формирања метрике рутирања узимају се обзир различити параметри линка: вероватноћа губитка пакета, интерференција, кашњење, потрошња снаге и сл. Како се докторска дисертација кандидаткиње бави проблемом оптимизације протокола и метрика рутирања у вишеканалним вишеинтерфејсним бежичним *mesh* мрежама, може се констатовати да је тема веома актуелна. Оригиналност рада презентованог у докторској дисертацији огледа се у предлогу нових метрика рутирања које прате брзе промене на сваком појединачном линку у бежичној мрежи, а које су показале боље резултате у поређењу са постојећим метрикама рутирања. Осим тога, презентован је и нов протокол за слој линка, који у оквиру вишеканалних вишеинтерфејсних *mesh* мрежа, по први пут, уводи диференцирање сервиса, тј. подршку квалитету сервиса. С обзиром на значај истраживања који проистиче из савремености и актуелности описане проблематике, сматрамо да дисертација кандидаткиње задовољава све прописане стандарде за израду докторске дисертације.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература коришћена у дисертацији пажљиво је одабрана и садржи најважније радове који покривају посматрану научну област. Велики број радова новијег је датума што указује на актуелност одабране проблематике. На основу обима коришћене литературе може се закључити да је кандидаткиња имала темељан увид у досадашње доприносе у овој и блиским научним областима. Постојећи протоколи рутирања, стратегије доделе канала и метрике рутирања коришћене за верификацију предложеног протокола и метрика рутирања претежно су објављене у реномираним и врхунским међународним часописима. Део референци упућује на радове објављене на најзначајнијим међународним конференцијама из ове области.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру докторске дисертације предложена је нова метрика, названа *powerETX*, која се базира на често коришћеној *ETX* метрици, и која у цену линка, поред вероватноће губитка пакета, урачунава и утицај нивоа снаге сигнала на пријему, чиме је цену линка могуће формирати на основу стања линка у сваком тренутку. Посматране су још две познате метрике *WCETT* и *MIC*, које у оквиру формирања својих цена линкова и цена путања, поред других важних параметара, укључују и *ETX* метрику. Узимајући у обзир ту чињеницу, предложене су још две нове метрике *powerWCETT* и *powerMIC*. Метрике су имплементирани у оквиру вишеканалног вишеинтерфејсног *MCR* протокола који на слоју линка користи *HMCP*. У циљу међусобног поређења метрика по питању протока корисничких података и средњег кашњења с краја на крај, све претходно поменуте метрике, *MCR* протокол рутирања и *HMCP* пртокол за слој линка имплементирани су у оквиру *GlomoSim* мрежног симулатора. Да би се омогућила детаљна анализа утицаја нивоа снаге сигнала на пријему на сваком појединачном линку и формирала ефикасна метрика, која обезбеђује повећање протока корисничких података и смањење кашњења у мрежи, реализован је прецизан пропагациони модел, оптимизован да одговара условима анализираног окружења.

За потребе анализе и развоја мрежа које воде рачуна о сервисима осетљивим на кашњења (*voice* и *video*), имплементиран је нови протокол за слој линка, *QoS-HMCP*, уз коришћење претходно дефинисаних нових метрика рутирања. Протокол се заснива на *HMCP* протоколу за вишеканалне вишеинтерфејсне бежичне *mesh* мреже. У циљу оптимизације протокола, комуникација између суседних чворова у мрежи базирана је на *EDCA* механизму приступа уз неопходне модификације предложене од стране кандидаткиње. Укупан мрежни саобраћај дефинише четири категорије приступа, за различите типове саобраћаја (*voice*, *video*, *best-effort* и *background*) који имају различите приоритете. Свака категорија користи за њу специфичан придружени сет параметара (*EDCA* параметре) на основу којих се свака од четири категорије надмеће за медијум. Имајући у виду комплексност процедуре доделе канала, која је присутна у вишеканалним вишеинтерфејсним мрежама, као и комплексност надметања за медијум сваке од четири категорије саобраћаја, предложене су четири варијанте новог *QoS-HMCP* протокола. Варијанте су међусобно упоређене, и упоређене су са постојећим *HMCP* протоколом. Резултати симулација показали су да се новим протоколом значајно смањује кашњење при преносу корисничких пакета за приоритетизоване категорије саобраћаја.

Истраживање је спроведено у шест корака. У првом кораку одређени су параметри пропагационог модела. У другом кораку, пропагациони модел, дефинисан за одговарајуће окружење, вишеканални вишеинтерфејсни *MCR* протокол рутирања са *HMCP* протоколом за слој линка, *ETX*, *WCETT* и *MIC* метрике имплементирани су у *GlomoSim* симулатор. У трећем кораку, на основу анализе резултата симулација одређене су оптималне вредности коефицијената који се узимају у обзир приликом формирања цене линкова предложених

нових метрика (*powerETX*, *powerWCETT* и *powerMIC*), а који зависе од нивоа снаге сигнала на пријему. У четвртном кораку извршена је верификација добијених резултата упоређивањем нових метрика са постојећим, чиме су истакнуте предности сваке метрике понаособ. Метрике су упоређене по оствареном протоку и кашњењу у мрежи. У петом кораку имплементирани су и четири варијанте новог QoS-HMCP протокола за слој линка (назване SW1-TX1, SW1-TX2, SW2-TX1 и SW2-TX2), засноване на MCR и HMCP протоколима, које подразумевају коришћење претходно дефинисаних нових метрика рутирања и које воде рачуна о оствареном квалитету сервиса за различите категорије саобраћаја. Шести корак представља верификацију добијених резултата. С обзиром да у литератури не постоји протокол за слој линка који укључује QoS подршку у вишеканалне вишеинтерфејсне WMN, све четири предложене варијанте QoS-HMCP протокола упоређене су са основним HMCP протоколом како би се приказале предности увођења QoS подршке у MCM мреже. Резултати су показали да све предложене варијанте QoS-HMCP протокола дају много боље резултате од основног HMCP протокола по питању протока и средњег кашњења с краја на крај, за сервисе осетљиве на кашњења, што је и оправдало увођење подршке QoS у MCM мреже. Осим тога, међусобно поређење варијанти QoS-HMCP протокола показало је која варијанта даје најбоље резултате, за које категорије саобраћаја и под којим условима.

На основу изложеног Комисија констатује да примењене научне методе у потпуности одговарају проблему и циљевима докторске дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Бежичне *mesh* мреже, као и све друге бежичне мреже, карактерише велика динамика сигнала на улазу у пријемник, посебно када се реализују унутар објеката. У већини симулација протокола рутирања обично се о очекиваној, великој, динамичности сигнала не води рачуна и пропагација електромагнетног таласа у сложеним срединама, у којима се ове мреже реализују, описује се најједноставнијим пропагационим моделима. Овакав приступ за последицу може имати да спроведена анализа не даје реалну слику перформанси мреже. У литератури доступне метрике рутирања не урачунавају утицај нивоа снаге сигнала на пријему у цену линка, па самим тим ни у избор оптималне путање. Поред тога, међу доступним протоколима рутирања за бежичне *mesh* мреже нема протокола за вишеканалне вишеинтерфејсне мреже који воде рачуна о квалитету сервиса. Тиме се баве неки протоколи, али само у оквиру једноканалних једноинтерфејсних мрежа.

Супротно постојећим метрикама рутирања, основна идеја предложених метрика је праћење брзих промена на сваком појединачном линку у бежичној мрежи и ефикасно формирање руте сигнала од извора до одредишта. На основу анализе резултата добијених симулацијама може се донети закључак да се предложеним метрикама рутирања селекују путање преко којих се остварује већи проток и мање кашњење у мрежи. Предложене метрике могуће је лако имплементирати у конкретним бежичним мрежама, с обзиром да се мерење нивоа снаге сигнала на пријему већ остварује у сваком чвору. Самим тим, практична реализација ове модификације могућа је без хардверских измена на постојећој опреми, што практично значи без великих трошкова и додатних улагања у мрежу. Поред тога, новоразвијени QoS-HMCP протокол је први протокол који уводи диференцирање сервиса у вишеканалну вишеинтерфејсну мрежу. То као последицу има да се, осим повећања протока, остварује и значајно смањење кашњења за мултимедијалне апликације.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледане дисертације Комисија процењује да је кандидаткиња показала способност за самостални научни рад, почевши од систематизације и критичког осврта на постојеће протоколе рутирања, алгоритме доделе канала и метрике рутирања, па до развоја

оригиналних метрика рутирања и оригиналног протокола за слој линка. У прилог поменутом је и чињеница да је кандидаткиња објавила и низ научних радова који су проистекли из дисертације, а у којима се појављује као први аутор.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси који су остварени у оквиру ове докторске дисертације огледају се у следећем:

- Предложене су нове метрике рутирања које у цену линка укључују параметар који зависи од нивоа сигнала на улазу у пријемник, и на тај начин воде рачуна о брзим променама пропагационих услова на сваком појединачном линку у бежичној мрежи, што је од посебне важности за реализацију мрежа унутар објеката.
- Предложене метрике рутирања унапредиле су постојеће на основу чега је могућ избор бољих и квалитетнијих путања од извора података до њиховог одредишта, што се огледа кроз веће оствариве протоке и мања кашњења с краја на крај. Поред тога, за практичну реализацију ових метрика нису потребна додатна улагања у мрежу (у смислу измене постојећих хардверских решења).
- Предложен је нов протокол за слој линка који у вишеканалне вишеинтерфејсне бежичне *mesh* мреже укључује подршку квалитету сервиса, чиме се остварују мања кашњења за мултимедијалне апликације осетљиве на кашњења (говорне и видео апликације).
- Као посредан допринос дисертације може се навести и систематична и детаљна класификација протокола рутирања, стратегија доделе канала и метрика рутирања.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и остварених резултата, констатујемо да је кандидаткиња успешно одговорила на сва релевантна питања за решавање проблема дефинисаног предметом истраживања. Систематичан и детаљан приказ имплементације предложених метрика и протокола рутирања, темељна анализа резултата, као и поређење са постојећим метрикама и протоколима по питању основних перформанси мреже (протока и кашњења с краја на крај), представљају значајан научни допринос у области телекомуникација и информационих технологија, што је и верификовано објављивањем резултата у часописима од међународног значаја, као и на признатим конференцијама од међународног и националног значаја.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидаткиња Марија Малнар аутор је једног техничког решења у оквиру пројекта Министарства науке и технолошког развоја (категорија M85), два рада у часописима од међународног значаја (категорија M23 за 2013. годину, M22 за петогодишњи период, област телекомуникације), као и више радова на конференцијама од међународног (2) и националног значаја (6). Радови који су у вези са темом докторске дисертације, односно резултати објављени у оквиру њих проистекли су из истраживања спроведених у оквиру дисертације, су:

Категорија M23:

1. **Malnar M.**, Nešković N., Nešković A.: "A new quality of service aware multi-channel multi-interface link layer protocol for wireless mesh networks," - *Wireless Networks, The Journal of Mobile Communication, Computation and Information, Springer*, Available online 21. Sep. 2014, doi: 10.1007/s11276-014-0818-7, **IF₂₀₁₃=1.055**, ISSN: 1022-0038.
2. **Malnar M.**, Nešković N., Nešković A.: "Novel power-based routing metrics for multi-channel multi-interface wireless mesh networks," - *Wireless Networks, The Journal of Mobile Communication, Computation and Information, Springer*, vol. 20, no. 1, pp. 41-51, 2014, doi: 10.1007/s11276-013-0587-8, **IF₂₀₁₃=1.055**, ISSN: 1022-0038.

Категорија M33:

1. **Malnar M.**, Nešković N.: "An Analysis of Performances of Multi-Channel Routing Protocol Based on Different Link Quality Metrics," - *Proceedings of the IEEE International conference on telecommunications in modern satellite, cable ad broadcasting services, Telsiks 2011*, pp. 737-740, Niš, Serbia, 2011.
2. **Malnar M.**, Nešković N.: "Comparison of ETX and HOP Count Metrics Using Glomosim Simulator," - *Proceedings of the IEEE International conference on telecommunications in modern satellite, cable ad broadcasting services, Telsiks 2009*, pp. 85 – 88, Niš, Serbia, 2009.

Категорија M61:

1. Nešković N., **Malnar M.**, Jevtić N.: „Strategije dodele kanala u višekanalnim bežičnim mesh mrežama,” - *Zbornik radova sa simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju, Postel 2013*, pp. 85 – 88, Beograd, Srbija, 2013.
2. Nešković N., **Malnar M.**, Jevtić N.: „Pregled protokola rutiranja u bežičnim mesh mrežama,” - *Zbornik radova sa simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju, Postel 2011*, strane 213 – 222, Beograd, Srbija, 2011.
3. Nešković N., Nešković A., **Malnar M.**: „Analiza ETX metrike u realnom propagacionom okruženju mesh mreže,” - *Zbornik radova sa simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju, Postel 2009*, strane 268 – 276, Beograd, Srbija, 2009.

Категорија M63:

1. **Malnar M.**, Nešković N.: „Uparedna analiza Hop counting, ETX, ETT i MIC metrike u realnom propagacionom okruženju jednokanalne mesh mreže,” - *Zbornik radova sa telekomunikacionog foruma, TELFOR 2010*, strane 467 – 470, Beograd, Srbija 2010.
2. **Malnar M.**: „Metrika slučajnog izbora putanja u bežičnim mesh mrežama sa primenom u Dynamic Source Routing protokolu,” - *Zbornik radova sa konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ETRAN 2009*, Vrnjačka Banja, Srbija 2009 .
3. **Malnar M.**: „Pregled metoda rutiranja u Wireless mesh mrežama,” - *Zbornik radova sa telekomunikacionog foruma, TELFOR 2008*, strane 286 – 289, Beograd, Srbija 2008.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидаткиње Марије Малнар, под насловом „Оптимизација протокола и метрика рутирања за вишеканалне вишеинтерфејсне бежичне *mesh* мреже” у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све битне елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У дисертацији су предложене нове метрике рутирања које имају за циљ да прате брзе промене пропагационих услова на сваком појединачном линку у бежичној мрежи и, у складу са тим, формирају цену линка и оптимизују руту од извора до одредишта података. Практична реализација нових метрика у реалној мрежи може се извршити без измене постојећих хардверских решења, а захтеване софтверске измене су минималне. Поред тога, у оквиру дисертације, предложен је и нов протокол за слој линка, који, за разлику од постојећих (у литератури предложених) протокола за вишеканалне вишеинтерфејсне *mesh* мреже, води рачуна и о подршци квалитету сервиса, и на тај начин смањује кашњење мултимедијалних апликација осетљивих на кашњења. Резултате проистекле из истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације кандидаткиња је објавила у водећим међународним часописима у овој области и презентовала стручној јавности на конференцијама од међународног и националног значаја. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидаткиње, Комисија констатује да дисертација представља оригиналан и савремен научни допринос у домену Телекомуникација и информационих технологија.

На основу наведеног, Комисија констатује да је кандидаткиња Марија Малнар, дипломирани инжењер електротехнике, испунила све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду, те, са задовољством, предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду, да се докторска дисертација под називом „Оптимизација протокола и метрика рутирања за вишеканалне вишеинтерфејсне бежичне *mesh* мреже” кандидаткиње Марије Малнар прихвати, и у складу са законском процедуром, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду и давање одобрења кандидаткињи да приступи усменој одбрани.

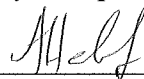
У Београду, 05.03.2015. године

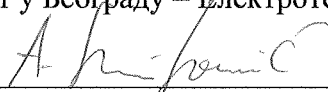
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Наташа Нешковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Ирини Рељин, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Горан Марковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет


др Александар Нешковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Александра Смиљанић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет