

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Игора Томића

Одлуком бр. 266/40 од 10.02.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Игора Томића под насловом

**Оптимизација капацитета мобилних мрежа применом статистичке анализе и техника машинског учења**

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

### ИЗВЕШТАЈ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Игор Томић је докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао школске 2020/2021. године на модулу Телекомуникације. На основу уверења о положеним испитима са претходних магистарских студија на Универзитету у Београду – Електротехничком факултету, студенту се (одлуком Комисије за студије трећег степена на седници одржаној 1.6.2021. о признавању ЕСПБ) признаје део обавеза на уписаним докторским академским студијама (ДАС) у обиму од 60 ЕСПБ (54 ЕСПБ за положене испите са изборног подручја студента и 6 ЕСПБ за положене опште-образовне испите). Одговарајући испити су положени са просечном оценом 10,00.

Дана 28.10.2024. године, кандидат је пријавио тему за израду докторске дисертације под насловом „Оптимизација капацитета мобилних мрежа применом статистичке анализе и техника машинског учења“.

На седници одржаној 30.10.2024. године, Комисија за студије трећег степена је размотрила предлог теме за израду докторске дисертације и упутила је предлог Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду на усвајање.

Одлуком бр. 2040/29 од 5.11.2024. године Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу:

- др Александар Нешковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Драган Олћан, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Горан Марковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

За менторе докторске дисертације су предложени др Предраг Иваниш, редовни професор и др Дејан Драјић, редовни професор.

Дана 4.12.2024. године, кандидат је имао јавну усмену одбрану теме докторске дисертације пред изабраном Комисијом. Комисија је дала оцену „задовољно“.

Одлуком бр. 55/35 од 14.01.2025. године Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

На седници одржаној 24.03.2025. године, Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је дало сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Дана 21.01.2026. године, кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену под насловом „Оптимизација капацитета мобилних мрежа применом статистичке анализе и техника машинског учења“.

На седници одржаној 03.02.2026. године, Комисија за студије трећег степена је потврдила испуњеност неопходних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Одлуком бр. 266/40 од 10.02.2026. године Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу:

- др Александар Нешковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Драган Олћан, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Горан Марковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација „Оптимизација капацитета мобилних мрежа применом статистичке анализе и техника машинског учења“ кандидата Игора Томића припада научној области Електротехника и рачунарство, ужа научна област Телекомуникације, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментори докторске дисертације су др Предраг Иваниш, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду и др Дејан Драјић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Игор Томић је рођен 25. августа 1977. године у Београду, од оца Александра и мајке Милке. Основну школу „20. Октобар“ завршио је у Новом Београду 1992. године као ђак генерације, а Математичку гимназију у Београду завршио је 1996. године. Током основног и средњошколског образовања учествовао је на такмичењима из математике, физике и астрономије и освајао бројне награде на државном нивоу и био дуги низ година стипендиста Фондације за таленте при Министарству за науку и образовање Републике Србије. Електротехнички факултет у Београду је уписао 1996. године на којем је и дипломирао 2001. године на смеру Телекомуникације са просечном оценом 9.03. Током студија провео је четири месеца на међународној стручној пракси у Словачкој, где је у компанији Orange радио на пословима планирања и оптимизације мобилне радио мреже друге генерације. Дипломски рад на тему „Оптимизација ГСМ мреже“ одбранио је септембра 2001. године са оценом 10. Магистрирао је на Електротехничком факултету у Београду 2006. године на смеру Телекомуникације са просечном оценом 10 и магистарским радом на тему „Анализа утицаја меког и мекшег хендовера на перформансе мобилне мреже треће генерације“. Докторске академске студије је уписао на Електротехничком факултету у Београду, 2020. године, на модулу Телекомуникације. У паралели са докторским студијама на Електротехничком факултету, током 2021. године похађао је и успешно завршио програм „*Managing and Leading for Innovation*“ на ESMT (Европска школа за менаџмент и технологију) у Берлину, која је једна од водећих пословних школа на свету. Програм је водио проф. др Линус Даландер.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација, писана ћирилицом, обухвата 169 страна са 87 слика, 18 табела и 111 референци. Од тога, главни део дисертације, који укључује поглавља 1-7 и списак коришћене литературе, обухвата 143 стране.

Дисертација се састоји редом од: насловне стране на српском језику, насловне стране на енглеском језику, странице са подацима о менторима и члановима комисије, захвалнице, сажетка на српском језику, сажетка на енглеском језику, садржаја, седам поглавља (1. Увод, 2. Мобилни телекомуникациони системи, 3. Статистичка анализа квалитета радио канала, 4. Напредно планирање мобилних радио мрежа, 5. Машинско учење у процесу планирања мобилних мрежа, 6. Технике оптимизације капацитета радио мреже, 7. Закључак), списка коришћене литературе, списка скраћеница, списка слика, списка табела, биографије аутора и три изјаве (Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада, Изјава о коришћењу).

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Након уводног дела, у другом поглављу обрађен је развој мобилних система од друге до пете генерације, уз посебан осврт на радио интерфејс и архитектуру система. Дат је детаљан узрочно-последични преглед еволуције радио интерфејса, кроз изазове са којима су се мобилне мреже суочавале, мотивацију за унапређење и примењена техничка решења, из угла значајног за планирање капацитета радио мреже и остварену спектралну ефикасност. Овим поглављем је постављен темељ за даље разматрање теме од интереса.

У трећем поглављу, настављено је са анализом начина адаптације линка и прилагођења променљивим радио условима у системима четврте и пете генерације. Посебна пажња је посвећена утицају оптерећења мреже на перформансе адаптације линка и остварену спектралну ефикасност. Предложена је метода за оцену спектралне ефикасности у различитим деловима ћелије (областима покривености), од положаја у непосредној близини базне станице и антенских система, до границе покривања постојеће ћелије и преласка комуникације на другу базну станицу. Новом методом је анализирана значајна количина података из комерцијалних мрежа, упоређене су перформансе различитих фреквенцијских опсега, као и система четврте и пете генерације. Демонстрирана је употреба нове методе у процесу анализе утицаја примене напредних мрежних функционалности на перформансе мреже. Такође, предложени су начини детекције аномалија у понашању мреже применом ове методе, која се може користити даље као важан извор информација у процесу планирања, имплементације, одржавања и оптимизације радио мреже.

Четврто поглавље је посвећено напредном планирању мобилних радио мрежа. Предложен је нови метод естимације корисничког искуства у различитим деловима ћелије, као и начини детекције зона са лошијим перформансама. Предложен је и експертски систем за сегментацију између проблема који су узроковани самим квалитетом радио сигнала, повезаном линк адаптацијом и оствареном спектралном ефикасношћу са једне стране, и проблемима превеликог оптерећења базне станице и недовољног капацитета, са друге стране. Размотрен је и начин приоритизације проблема који води бржем поврату инвестиције. Предложен је и метод за предикцију будућих перформанси мреже и корисничког искуства, заснованог на раније представљеном моделу предикције спектралне ефикасности, која се комбинује са предикцијом понуђеног саобраћаја. Овај метод је предуслов за предиктивно планирање, и анализиран је у следећем поглављу на значајној количини података из комерцијалних мобилних мрежа. Размотрене су узрочно-последичне анализе које су важне за оцену различитих сценарија проширења мреже или прерасподеле хардвера. Уведена је метода за холистичко планирање радио покривања и капацитета мреже.

Пето поглавље је посвећено анализи примена метода машинског учења и вештачке интелигенције у процесима планирања и управљања радио мрежама. Предложена је методологија предикције саобраћаја на нивоу базне станице, односно сектора покривања. Такође, методе машинског учења су оптимизоване за кластеризацију сектора базних станица по типу понуђеног саобраћаја и обрасцима промене корисничког искуства током дана. Ова сегментација је важан предуслов за даље планирање инвестиција и оптимизацију радио мреже, и максимизацију ефеката проширења капацитета и подешавања алгоритама и параметара. На крају методе машинског учења су примењене на проблем предикције промене спектралне ефикасности у условима раста саобраћаја и мрежног оптерећења.

У шестом поглављу обрађене су различите методе унапређења капацитета мреже, попут редизајна радио мреже, примене новијих технолошких решења заснованих на напредним антенским системима са више улаза/излаза и техници управљања радио сноповима (*beamforming*), као и могућностима за оптимизацију конфигурације радио интерфејса у циљу смањења губитака капацитета због алокације референтних сигнала. Посебна пажња је посвећена оптимизацији конфигурације DMRS (*DeModulation Reference Signal*) сигнала, који користе веома значајне ресурсе са директним негативним утицајем на спектралну ефикасност и надаље капацитет. Понуђена је ревизија погледа на организацију радио интерфејса у мрежама пете генерације и предлог оптималне алокације ресурса за референтне сигнале за различите типове саобраћаја и конфигурацију мрежа. Предложене су и оптималне конфигурације, које су тестиране у комерцијалним мрежама за различите сценарије, а резултати су приказани и дискутовани.

Коначно, у седмом поглављу су сумиране предложене иновативне методологије, које

заједно чине свеобухватан модел за анализу и предикцију корисничког искуства у мобилним мрежама, који интегрише традиционалне статистичке анализе и технике машинског учења. Сумирани су и резултати бројних анализа и уочених узрочно последичних веза које су биле неопходне у процесу креирања. Дат је преглед резултата примене нове методологије на изазовима планирања и оптимизације капацитета мобилних мрежа на комерцијалним мрежама. Закључено је да дисертација поставља добре основе за трансформацију процеса планирања мобилних мрежа, а дискутовани су и могући даљи кораци истраживања.

Након закључка следи списак коришћене литературе, списак скраћеница, списак слика, списак табела и биографија аутора.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Предмет истраживања ове докторске дисертације је увођење иновативних метода планирања перформанси радио мреже и оптимизације капацитета, у мобилним системима четврте и пете генерације. Циљ је да се омогући операторима да применом традиционалних статистичких анализа као и техника машинског учења и вештачке интелигенције, паметније и ефикасније планирају своје мреже, из различитих аспеката: од инвестиција које улажу, преко начина конфигурације мреже до стратегије имплементације нових техничких решења.

Мобилне телекомуникације су у последњих тридесетак година доживеле огроман развој и темељно измениле друштво. У области комуникације, дигиталне платформе и друштвене мреже постале су доминантни канали за личну интеракцију и размену информација. Економски утицај је такође значајан: појавили су се нови модели пословања и зараде (нпр. инфлуенсери, дигитални маркетинг, *freelance* рад), док су апликације и платформе промениле традиционалне индустрије као што су превоз, туризам и смештај, забава, трговина и банкарство, где мобилни телефон све чешће постаје основно средство плаћања. Мобилне мреже су додатно убрзале дигитализацију образовања, и донеле нове могућности у домену здравства и телемедицине. Са четвртом индустријском револуцијом, мобилне мреже све више повезују не само људе већ и машине и „паметне“ уређаје, што омогућава напредна решења у саобраћају, пољопривреди, паметним домовима и аутомобилској индустрији, уз очекивани раст аутономних возила, итд.

Са успехом мобилних телекомуникација, количина мобилног саобраћаја снажно расте и у последњој деценији се у просеку удвостручавала на сваке две године. Иако саобраћај расте, захтеви за перформансама остају високи: потребне су све веће брзине преноса у оба смера и што мања латенција, посебно због доминације ТСП/Р протокола и његовог утицаја на корисничко искуство. Зато су мобилни оператори под притиском да обезбеде довољан капацитет у радио мрежи, а изазови су велики с обзиром на ограниченост фреквенцијских ресурса, што ову тему чини веома савременом и актуелном.

У почетној фази истраживања, дисертација се бави статистичком анализом перформанси мреже, са фокусом на скокове саобраћаја, раст оптерећења и њихов утицај. Анализа је заснована на великој количини података из комерцијалних 4G/5G мрежа са више локација и тржишта широм света, обухватајући различите топологије, фреквенцијске ресурсе и типове саобраћаја, чиме су постављени темељи за даљи развој предиктивних модела. Посебно су анализиране перформансе адаптације линка у променљивим радио условима, уз

утицај фреквенцијског опсега и густине изграђености за различите нивое мобилности корисника. Предложена је метода за оцену спектралне ефикасности у различитим зонама ћелије — од близине базне станице до руба покривања и хендовера. Овим приступом су упоређене перформансе по опсезима и између 4G и 5G система, процењен утицај напредних функционалности, и предложени начини детекције аномалија у понашању мреже

Резултати статистичке анализе и предложени метод оцене спектралне ефикасности проширени су у модел за анализу и предикцију корисничког искуства у мобилним мрежама. Дисертација предлаже унапређен процес планирања мреже кроз моделовање садашњег и будућег UX-а (*User Experience*), детекцију зона слабих перформанси уз класификацију по типу проблема и приоритизацију интервенција ради максимизације повраћаја инвестиције. Уведене су узрочно-последичне анализе за процену различитих сценарија и дефинисан је концепт холистичког планирања покривања и капацитета, који истовремено моделује оба аспекта уз високу тачност. Метод је допуњен техникама машинског учења. За предикцију понуђеног саобраћаја на нивоу базне станице тестирано је више модела, при чему је XGBoost постигао најбоље резултате. Машинско учење је примењено и на сегментацију зона покривања према трендовима саобраћаја, перформанси и корисничког искуства. Кластеризација по индикатору степена загушења дала је употребљивије и јасније кластере од приступа заснованог на протоку на рубу ћелије. Додатно је испитано унапређење тачности предикције спектралне ефикасности применом техника машинског учења (поново са најбољим резултатима XGBoost-а) и предложени су индикатори који одражавају тип мреже, топологију и карактеристике саобраћаја, укључујући и оптимизацију радијуса за индикатор густине изграђености.

Истраживање је заокружено техникама оптимизације капацитета радио мреже: традиционалне мере (нове локације/сектори, нови опсези, оптимизација дизајна) унапређене су кроз предложене методе оцене и предикције спектралне ефикасности и UX-а, што је потврђено на реалним примерима. Посебно су анализирани напредни антенски системи и управљање сноповима, као и могућност повећања капацитета 5G кроз оптимизацију DMRS конфигурације. Предложен је нови поглед на конфигурацију радио интерфејса, који уводи мање конзервативан приступ и стратегију, уз потенцијално значајне добитке капацитета.

Све наведено указује на веома висок степен иновативности и оригиналности ове дисертације.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Докторска дисертација користи обимну, актуелну и релевантну литературу превасходно из области мобилних телекомуникација, дизајна радио система и оптимизације перформанси радио интерфејса, предикције раста саобраћаја, планирања капацитета, анализе мобилности корисника и Доплеровог помераја, примене техника машинског учења у телекомуникацијама, којима се и бави дисертација. Наведено је 111 референци, међу којима су цитирани и радови кандидата објављени током успешне дугогодишње научноистраживачке каријере кандидата у области од интереса (укупно 23 референце), од којих је 10 референци проистекло из истраживања током његовог рада на докторској дисертацији. Већина референци су релевантни радови публиковани у реномираним међународним часописима и конференцијама, а коришћени су и извори са интернета (веб референце) за новија технолошка достигнућа, односно коришћене алате и технике машинског учења. Имајући у виду број референци, од којих је значајан број из периода последњих неколико година, може се закључити да је тема дисертације актуелна и релевантна, а такође бројност референци

потврђује да је урађена свеобухватна анализа постојећих решења што је такође битан део дисертације.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научне методе примењене у истраживањима у оквиру ове докторске дисертације обухватају:

- Анализа начина адаптације линка и прилагођења променљивим радио условима. Статистичком анализом су утврђене узрочно-последичне везе између оптерећења мреже и кључних индикатора перформанси адаптације линка. Посебна пажња је била посвећена спектралној ефикасности и њеној директној вези са перформансама мреже и потребним инвестицијама. Развијена је метода за оцену спектралне ефикасности у различитим деловима ћелије (областима покривености), од положаја у непосредној близини базне станице и антенских система, до границе покривања постојеће ћелије и преласка комуникације на другу базну станицу. Новом методом је анализирана значајна количина података из комерцијалних мрежа, анализирани су и упоређени перформансе различитих фреквенцијских опсега. Такође, предложени су начини детекције аномалија у понашању мреже, који се могу остварити овом методом и користити даље као важан извор информација у процесу планирања, имплементације, одржавања и оптимизације радио мреже.
- Развијене су методе за анализу и предикцију радио покривања и корисничког искуства. Предложени су методи за холистичко планирање радио покривања и капацитета мреже, као и за детекцију зона са незадовољавајућим квалитетом и перформансама мреже, сегментацију проблема на проблеме узроковане квалитетом сигнала и недовољним капацитетом, и начине њиховог отклањања.
- Посебна пажња посвећена је методама предикција перформанси мреже и корисничког искуства, које су предуслов за предиктивно планирање. Дат је осврт на примену метода машинског учења и вештачке интелигенције у процесима планирања и управљања радио мрежама. Предложен је начин предикције саобраћаја на нивоу базне станице, односно сектора покривања. Такође, анализирани су и предложене методе предикције еволуције спектралне ефикасности у ситуацији када се саобраћај у мобилној мрежи мења.
- Комбинацијом предикције количине понуђеног саобраћаја и промене спектралне ефикасности, заокружена је предикција корисничког искуства. Нов метод је анализиран на значајној количини података из комерцијалних мобилних мрежа, и предложене су методе за планирање проширења капацитета мобилних мрежа са оптималним утицајем и најбржим повратом уложених средстава.
- Обрађене су различите методе унапређења капацитета мреже, попут редизајна радио мреже, примене новијих технолошких решења заснованих на напредним антенским системима са више улаза/излаза и техници управљања радио сноповима, као и могућностима за оптимизацију конфигурације радио интерфејса у циљу смањења губитака капацитета због алокације референтних сигнала.

Анализом дисертације и приказаних резултата, утврђено је да су употребљаване методе адекватне за истраживања спроведена у оквиру ове докторске дисертације.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Главни резултат докторске дисертације је нов приступ проблему планирања и оптимизације капацитета радио мреже. У оквиру дисертације развијена је иновативна методологија за оцену спектралне ефикасности, и моделовање предикција будућих перформанси мреже. Овај метод је предуслов за превентивно планирање, а омогућава детекције зона са лошијим перформансама, сегментацију по типу проблема, дефинисање приоритета за решавање као и увођење узрочно-последичних анализа, које подржавају паметно доношење стратешких одлука кроз оцену различитих сценарија. Предложена методологија се већ увелико користи у процесу планирања и оптимизације капацитета радио мреже, и бројни примери из комерцијалних мрежа из различитих делова света су искоришћени за илустровање методологије где се значајно унапређује поврат инвестиција. Дисертација такође истражује потенцијалне синергије процеса планирања капацитета и планирања покривености сигналом, и предлаже концепт за холистичко планирање покривања и капацитета мреже. Посебан део је посвећен анализи могућности унапређења процеса планирања кроз примене техника машинског учења на проблеме: унапређења модела оцене спектралне ефикасности, предикције понуђеног саобраћаја на нивоу базне станице и детекције образаца понашања у зонама покривања и сегментације у смислу промене понуђене количине саобраћаја у времену, као и перформанси мреже и оствареног корисничког искуства. Истраживање је заокружено анализом техника оптимизације капацитета радио мреже. Традиционалне методе проширења капацитета, попут изградње нових базних станица или додатних сектора, увођења нових фреквенцијских опсега и оптимизације дизајна радио мреже, су унапређене предложеним иновативним напредним техникама анализе оцене и предикције спектралне ефикасности и корисничког искуства. Посебан осврт је дат на оцену увођења нових савремених решења заснованих на напредним антенским системима последње генерације и техници управљања сноповима. Методологија је тестирана у комерцијалним мрежама, где се показало да значајно унапређује процесе планирања. На крају, испитана је могућност унапређења капацитета мреже пете генерације кроз оптимизацију конфигурације DMRS сигнала. Након теоретске анализе Доплерових ефеката за кориснике који се брзо крећу, оцењена је могућност оптимизације параметара конфигурације од интереса. Предложена је мање конзервативна стратегија, која је тестирана у две комерцијалне мреже са различитим топологијама и профилима саобраћаја, уз остварене веома добре резултате унапређења капацитета између 10% и 15% без значајније деградације перформанси.

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

Кандидат је у оквиру свог рада на дисертацији обавио обимно истраживање релевантне и актуелне литературе из области дизајна радио система, предикције раста саобраћаја и планирања капацитета. На основу резултата истраживања, у комбинацији са богатим искуством из индустрије и рада на проблемима планирања и оптимизације капацитета мобилних система, кандидат је изазове у области од интереса адресирао развојем свеобухватног модела за анализу и предикцију корисничког искуства у мобилним мрежама. Предложени модел се показао веома успешним у пракси, и омогућава операторима да предвиде ефекте различитих сценарија проширења капацитета и да оптимизују инвестиције у складу са очекиваним нивоом услуге. Кандидат је такође истражио релевантну и актуелну литературу из области примене техника машинског учења у телекомуникацијама. На основу резултата истраживања урађен је преглед и анализа постојећег стања и постојећих решења, и

затим су идентификоване могућности за примену техника машинског учења на проблеме који до сада нису адресирани. Затим су тестиране различите технике, и након детаљне нумеричке анализе резултата предложене оптималне које дају најбоље резултате. Кандидат је на крају детаљно анализирао литературу из области оптимизације перформанси радио интерфејса, као и анализе мобилности корисника и Доплеровог помераја. Као резултат истраживања, кандидат је идентификовао могућности за ревизију погледа на конфигурацију радио интерфејса, који потенцијално може донети добитке у капацитету. Теоретском анализом су идентификовани сценарији код којих се мање конзервативна стратегија може имплементирати без деградације перформанси, која је затим тестирана, проверена свеобухватном анализом и потврђена у комерцијалним мрежама. Током рада на дисертацији кандидат је доказао самосталност у раду, као и способност критичког размишљања. Објављивањем постигнутих резултата истраживања у оквиру докторске дисертације кроз научне радове међу којима су и два рада у часописима са JCR листе, кандидат је показао да је способан за представљање научних доприноса у научној јавности. На основу свега наведеног, може се констатовати да је кандидат достигао адекватан степен способности за самостални научни рад.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни доприноси дисертације су следећи:

- Статистичка анализа важних индикатора перформанси адаптације радио линка и спектралне ефикасности, и њихова корелација са оптерећењем радио мреже.
- Анализа перформанси различитих модела машинског учења у процесу моделовања спектралне ефикасности и корелације са растом саобраћаја. Одабир најпогоднијег модела.
- Анализа утицаја различитих фактора на везу између спектралне ефикасности и раста саобраћаја. Обрађени су фактори попут фреквенције канала, заузетости ресурса, густине мреже и типова саобраћаја, и оцењен је значај сваког од фактора у смислу потенцијалног унапређења тачности модела.
- Ревизија погледа на организацију радио интерфејса у мрежама пете генерације и предлог оптималне алокације ресурса за референтне сигнале за различите типове саобраћаја и конфигурацију мрежа.
- Провера перформанси оптимизоване конфигурације радио интерфејса у комерцијалним мрежама различитих карактеристика и типова саобраћаја.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Кандидат је успешно идентификовао могућности за унапређење области планирања и оптимизације капацитета радио мреже у мобилним системима, и тиме потврдио исправност полазних хипотеза које су постављене на почетку истраживања везаног за израду докторске дисертације. На основу резултата истраживања и анализе одговарајуће актуелне литературе и тренутног стања области, кандидат је успешно предложио свеобухватан модел за анализу и

предикцију корисничког искуства у мобилним мрежама, који интегрише традиционалне статистичке анализе и технике машинског учења. Предложен модел, верификован у мобилним мрежама широм света, омогућава операторима да предвиде ефекте различитих сценарија проширења капацитета и да оптимизују инвестиције максимизујући поврат уложених средстава. Посебан допринос овог истраживања је ревизија погледа организације радио интерфејса у системима пете генерације. Кандидат је почевши од теоретске анализе верификовао хипотезу о сценаријима и условима за редукацију броја конфигурисаних DMRS сигнала, који негативно утичу на капацитет. Уследила је детаљна нумеричка анализа мерења у комерцијалним мрежама различите топологије и типа понуђеног саобраћаја, где је хипотеза потврђена и у пракси, уз значајне остварене добитке у капацитету радио мреже, између 10% и 15%. Дисертација такође разматра увођење холистичког планирања капацитета и покривености радио мреже, где се кроз синергију два процеса могу остварити бројни бенефити. Квалитет постигнутих резултата истраживања је верификован и публиковањем научних радова, међу којима се издвајају два рада у часописима са JCR листе.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Радове наведене у овој секцији кандидат је објавио за време докторских студија и истраживања у оквиру рада на својој дисертацији и у непосредној су вези са докторском дисертацијом. У наставку је дат списак тих радова:

##### Категорија M22:

- [1] **Tomić, I.**; Bleakley, E.; Ivanis, P. “Predictive Capacity Planning for Mobile Networks—ML Supported Prediction of Network Performance and User Experience Evolution”, *MDPI Electronics*, Vol. 11 (4), 626., Special Issue Advances in Machine Learning, February 2022, IF<sub>2022</sub> = 2.9 <https://doi.org/10.3390/electronics11040626>.
- [2] **Tomić, I.**; Drajić, D.; Ivaniš, P.; Savković, U.; Tešić, D.; Lorić, A. “Optimized DM-RS Configuration for Improved 5G New Radio Network Capacity and Performance”, *MDPI Electronics* Vol. 13 (11), 2028, May 2024, IF<sub>2024</sub> = 2.9, <https://doi.org/10.3390/electronics13112028>.

##### Категорија M33:

- [1] Savković, U.; **Tomić, I.**; Nešković, N.; Nešković, A. Optimized Scheduling and Resource Allocation in 4G/5G Carrier Aggregation Network Deployments. In Proceedings of 34th Telecommunications Forum TELFOR 2025, Belgrade, Serbia, November 2025.
- [2] Savković, U.; **Tomić, I.**; Davidovic, M.; Drajić, D. Advanced Spectral Efficiency Assessment for Expert 4G/5G RAN Network Design”, Proc. of TELSISKS 2025, Niš, Serbia, October 2025.
- [3] **Tomić, I.**; Savković, U.; Tešić, Dj.; Drajić, D. Advanced Spectral Efficiency Analytics for 5G/NR Performance Analysis, Proc. of TELSISKS 2023, Niš, pp. 147 - 150, Niš, Serbia, October 2023, ISBN 979-8-3503-4701-2.
- [4] Djurić, K.; **Tomić, I.**; Nesković, A., “On the impact of Network density on correlation between Network load and Link adaptation in MIMO-OFDM based Mobile Broadband Networks”, In Proceedings of the 29th Telecommunications Forum TELFOR 2021, Belgrade, Serbia, 23–24 November 2021; DOI: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653196



Истражене су и могућности синергије између процеса планирања капацитета и планирања покривености кроз увођење новог концепта холистичког планирања, као и примена машинског учења за побољшање модела оцене спектралне ефикасности, предикцију саобраћаја и сегментацију зона по понашању и корисничком искуству. Додатно, на примерима из комерцијалних мрежа илустровано је како предложена методологија унапређује процес анализирања различитих техника проширења капацитета (нове локације/сектори, нови опсеци, оптимизација дизајна), укључујући напредне антенске системе и управљање сноповима.

Посебан допринос ове дисертације је у домену оптимизације конфигурације радио интерфејса у 5G мрежама, са фокусом на DMRS сигнале, који највише утичу на смањење капацитета. Након свеобухватне теоретске анализе која је укључила моделовање Доплерових ефеката, предложена је мање конзервативна стратегија, за одређене сценарије који су идентификовани као погодни. Добици нове стратегије конфигурације радио интерфејса су верификовани мерењима у две комерцијалне мреже, различитих топологија и типова понуђеног саобраћаја, где је потврђено да предложена стратегија пружа могућности за озбиљно унапређење капацитета без значајне деградације перформанса мреже и корисничког искуства услед мобилности корисника. Током рада на дисертацији, кандидат је показао способност за самосталан научни рад што је потврђено објављивањем више научних радова директно везаних за тему докторске дисертације, као и резултатима оствареним у оквиру саме дисертације.

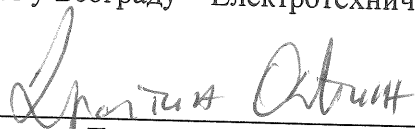
Имајући у виду све наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Оптимизација капацитета мобилних мрежа применом статистичке анализе и техника машинског учења“ кандидата **Игора Томића** прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 19.2.2026. године

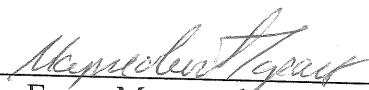
#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



др Драган Олђан, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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