

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње **Тамаре Мушкатиновић-Зекић**

Одлуком бр. 997-16 од 04.07.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње **Тамаре Мушкатиновић-Зекић** под насловом

**„Модел дигиталне предисторије за хибридне масивне вишеантенске предајнике са формирањем снопа применом неуралних мрежа“**

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

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

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

Кандидаткиња Тамара Мушкатиновић-Зекић уписала је докторске студије школске 2011/2012. године на Електротехничком факултету у Београду, модул Телекомуникације. На докторским студијама је положила све испите, са просечном оценом 9.9, и испунила све обавезе предвиђене планом докторских студија сакупивши предвиђених 120 ЕСПБ.

26.01.2023. године пријавила је тему за израду докторске дисертације под називом „Развој ефикасних модела дигиталне предисторије за хибридне *beamforming* mMIMO предајнике применом неуралних мрежа“

14.02.2023. 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. За ментора је предложена др Наташа Нешковић, редовни професор.

03.03.2023. године Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлуком бр. 336 од 03.03.2023. године) у саставу:

- др Александар Нешковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Никола Томашевић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин

- др Милан Илић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Ђурађ Будимир, гостујући професор, Универзитет у Београду.

07.03.2023. године кандидаткиња је полагала јавну усмену одбрану докторске дисертације. У циљу уклањања енглеског термина у наслову теме на српском језику, као и скраћенице, комисија се усагласила да наслов теме буде: „Модели дигиталне предисторије за хибридне масивне вишеантенске предајнике са формирањем снопа применом неуралних мрежа”.

11.04.2023. године Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватања теме докторске дисертације (Одлука бр. 551/23 од 24.04.2023. године).

15.05.2023. године Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације „Модели дигиталне предисторије за хибридне масивне вишеантенске предајнике са формирањем снопа применом неуралних мрежа“ (Одлука бр. 61206-1680/2-23 од 15.05.2023. године).

07.06.2023. године кандидаткиња је предала докторску дисертацију на преглед и оцену.

27.06.2023. 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.

04.07.2023. године Наставно-научно веће именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлуком бр. 997-16 од 04.07.2023. године) у саставу:

- др Александар Нешковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Никола Томашевић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин
- др Милан Илић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Ђурађ Будимир, гостујући професор, Универзитет у Београду.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева студенткиње, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

Студенткиња је у току школске 2014/2015, 2017/2018 и 2021/2022 била у статусу мировања.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Електротехника и рачунарство и ужој области Телекомуникације за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. За ментора докторске дисертације одређена је др Наташа Нешковић, редовна професорка Електротехничког факултета у Београду. Професорка др Наташа Нешковић је аутор већег броја релевантних радова у истакнутим међународним и домаћим часописима који су приложени приликом пријаве теме докторске дисертације.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Тамара Мушкатиновић-Зекић рођена је 22. септембра 1982. године у Београду. Основну школу „Исидора Секулић“ у Београду је завршила 1997. године као ђак генерације и носилац Вукове дипломе. Током школовања освојила је бројне награде на општинским и градским такмичењима из математике и физике. Завршила је „Математичку гимназију“ у Београду 2001. године као носилац Вукове дипломе. Основне студије на Електротехничком факултету у Београду уписала је 2001. године. Дипломирала је на одсеку за Електронику, телекомуникације и аутоматику, смер Телекомуникације 2006. године, са просечном оценом 9.50 и оценом 10 за Дипломски рад на тему „Адаптивни антенски низови“. Током студирања је радила као демонстратор на предмету Теорија електричних кола и у лабораторији при катедри за Телекомуникације.

Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Телекомуникације, уписала је 2011. године. На докторским студијама је положила све испите и испунила све обавезе предвиђене планом докторских студија сакупивши предвиђених 120 ЕСПБ.

Од 2007. године запослена је у Регулаторној агенцији за електронске комуникације и поштанске услуге (тада Републичка агенција за телекомуникације). Током професионалне каријере радила је на пословима оцењивања усаглашености радио и телекомуникационе терминалне опреме, прегледа пројектне документације телекомуникационих мрежа, изради техничке документације, општих законских и подзаконских аката из области електронских комуникација, као и на пословима техничког прегледа телекомуникационих објеката. Учествовала је у раду међународних органа и организација за стандардизацију ради остваривања регулаторних циљева при изради и развоју стандарда, као и у сертификацији телекомуникационе опреме у лабораторијама разних светских произвођача. Тренутно обавља послове вишег саветника за фиксне и сателитске радио-комуникације, у оквиру којих врши анализу захтева за нове доделе фреквенција и издавање/одузимање појединачних дозвола за коришћење радио-фреквенција, учествује у раду државних и међународних организација и институција из области телекомуникација (ITU, CEPT, ETSI) и сарађује са регулаторним и стручним телима држава чланица Европске уније и других држава ради усаглашавања праксе примене прописа из области фиксних и сателитских радио-комуникација.

Члан је Инжењерске коморе Србије од 2010. године, када је положила стручни испит из електротехничке струке са радом: „Главни пројекат РР система преноса у приступној GSM мрежи јавних мобилних телекомуникација на подручју нишког и пиротског округа“, и поседује лиценцу одговорног пројектанта телекомуникационих мрежа и система.

У току досадашњег научно-истраживачког рада Тамара Мушкатиновић-Зекић је била аутор или коаутор 18 радова, од којих је 1 рад објављен у часопису међународног значаја (категорија М22), 2 рада у часописима националног значаја, 14 радова на конференцијама међународног значаја и 1 рад на конференцији националног значаја.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација по својој форми и структури у потпуности одговара Упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду. Дисертација је написана на српском језику, латиничним писмом, и има укупно 152 стране. Текст дисертације је организован у осам поглавља и садржи 73 слике, 20 табела и 141 референцу. Наслови поглавља су:

1. Увод
2. Појачавачи снаге
3. МИМО
4. Неуралне мреже
5. NN DPD модели за SU HBF mMIMO предајнике
6. NN DPD за MU HBF mMIMO предајнике
7. Проширен NN DPD модел
8. Закључак

Поред основних поглавља дисертација садржи насловну страну на српском и енглеском језику, страницу са подацима о ментору и члановима Комисије, сажетак са кључним речима и подацима о научној области на српском и енглеском језику, захвалницу, списак коришћене литературе, прилоге, биографију аутора, изјаву о ауторству, изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље представља уводно поглавље и пружа основне информације о проблематици која је предмет докторске дисертације, очекиваном научном доприносу и структури саме дисертације.

У другом поглављу су описани појачавачи снаге, њихови основни параметри, параметри квалитета сигнала, нелинеарне карактеристике појачавача и изобличења која они уносе. Извршен је преглед основних техника линеаризације појачавача и описани су најзначајнији модели коришћени за моделовање понашања појачавача, које представља основни корак у дигиталној предисторзији (*Digital Predistortion - DPD*). Такође, извршен је преглед и поређење постојећих DPD модела са ограниченом ширином пропусног опсега, коришћених за дигиталну предисторзију широкопојасних сигнала.

У трећем поглављу су описани *Multiple Input Multiple Output* (МИМО) системи, укључујући и опис основних карактеристика радио канала и механизма пропагације. Дана је класификација модела канала, као и математичка формулација најзначајнијих модела радио канала. Описана је техника хибридног *beamforming*-а и изложени су математички алгоритми за одређивање коефицијената хибридног *beamforming*-а. Анализиран је проблем линеаризације сигнала код МИМО система и дат је преглед и поређење постојећих модела за дигиталну предисторзију сигнала код МИМО предајника.

У четвртм поглављу су описане неуралне мреже. Представљен је модел неурона и архитектура неуралних мрежа, и извршена је њихова класификација. Изложени су основни алгоритми учења и тренирања неуралних мрежа и истакнут је значај анализе перформанси неуралне мреже.

У петом поглављу су предложени различити модели дигиталне предисторзије реализовани применом неуралних мрежа (NN DPD модели) за линеаризацију сигнала код потпуно повезаног хибридног масивног вишеантенског предајника са формирањем снопа са једним корисником (*Single User Fully Connected Hybrid Beamforming Massive MIMO - SU FC HBF mMIMO*). Описано је формирање више различитих модела неуралних мрежа и извршен је избор оптималних параметара за предложене архитектуре неуралних мрежа. Приказани су и анализирани резултати добијени имплементацијом и симулацијом модела у програмском пакету *Matlab*. Извршено је поређење модела са становишта комплексности, посматрањем броја коефицијената, као и броја *floating-point* операција (FLOPs). Такође, извршена је процена перформанси модела, поређењем спектралне густине снаге излазног сигнала,

нормализоване средње квадратне грешке (*Normalized Mean-Squared Error* - NMSE) и амплитуде вектора грешке (*Error Vector Magnitude* - EVM).

У шестом поглављу је анализирана могућност примене предложеног *Real-Valued Time-Delay Neural Network with 2 hidden Layers* (RVTDNN2L) DPD модела за компензацију нелинеарне дисторзије код потпуно повезаног хибридног масивног вишеантенског предајника са формирањем снопа са више корисника (*Multi User Fully Connected Hybrid Beamforming Massive MIMO* - MU FC HBF mMIMO). Предложена су два типа архитектуре RVTDNN2L DPD модела и анализирани су резултати симулација предложених архитектура. Испитане су перформансе и комплексност предложених архитектура и изведени закључци о ефикасности предложених решења.

У седмом поглављу је предложен нов проширен RVTDNN2L DPD модел, код кога се у циљу постизања бољих перформанси за потребе тренирања неуралне мреже доводи још један сигнал са RF грана. Анализирани су резултати добијени након имплементације и симулација предложеног модела у програмском пакету *Matlab*, и потврђена је ефикасност проширеног RVTDNN2L DPD модела.

У осмом поглављу су изложена закључна разматрања и још једном истакнути доприноси докторске дисертације. Такође, дати су предлози за даљи истраживачки рад у области дигиталне предисторзије сигнала код mMIMO система.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под насловом „Модели дигиталне предисторзије за хибридне масивне вишеантенске предајнике са формирањем снопа применом неуралних мрежа“ представља оригиналан научно-истраживачки рад у области дигиталне предисторзије сигнала. Тема дисертације је веома актуелна, на шта указује велики број објављених радова у којима је истакнуто да у модерном друштву са интензивним развојем мобилних система нове генерације постоји потреба за развијањем што ефикаснијег и софистициранијег модела за линеаризацију сигнала код савремених бежичних предајника.

У оквиру дисертације су на прегледан и конзистентан начин представљени нови модели за дигиталну предисторзију сигнала код хибридног *beamforming* mMIMO предајника применом неуралних мрежа. Оригиналност истраживања се огледа у развоју нових модела који доприносе смањењу нелинеарне дисторзије и побољшању квалитета сигнала код предајника у бежичним системима нове генерације. Остварени резултати, приказани у оквиру дисертације, могу наћи широку примену у модерним бежичним системима.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру ове докторске дисертације наведена је 141 референца из следећих области: бежични системи, појачавачи, дигитална предисторзија сигнала и неуралне мреже. Списак литературе обухвата савремене научне радове, као и референтне уџбенике из области којом се бави дисертација, и указује на то да је кандидаткиња извршила детаљну анализу постојећих истраживања у предметној области. У оквиру наведене литературе садржани су и релевантни радови кандидаткиње, који су резултат истраживачког рада на дисертацији.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Током истраживања везаног за докторску дисертацију изабране су и коришћене адекватне научно-истраживачке методе, а сам процес истраживања је спроведен у неколико фаза.

Прва фаза истраживања заснована је на систематичном и детаљном прегледу и анализи научно-стручне литературе из области дигиталне предисторзије. У оквиру ове фазе кандидаткиња је детаљно сагледала постојећа решења за дигиталну предисторзију сигнала у савременим бежичним предајницима и идентификовала неке од могућих проблема при примени предложених техника дигиталне предисторзије у широкопојасним системима нове генерације.

У другој фази истраживања извршена су проучавања релевантне научно-стручне литературе из области неуралних мрежа и анализа могућности примене неуралних мрежа за решавање проблема линеаризације сигнала у широкопојасним системима нове генерације. Током ове фазе извршено је формирање теоријских основа за предметно истраживање.

Трећа фаза истраживања обухватила је дефинисање различитих модела за дигиталну предисторзију код хибридног *beamforming* mMIMO предајника применом неуралних мрежа и поређење њихових могућности линеаризације сигнала. У оквиру ове фазе формулисани су параметри за процену перформанси модела.

У четвртој фази истраживања спроведена је имплементација предложених модела у програмском пакету *Matlab*. Током ове фазе одрађен је велики број софтверских симулација и анализа добијених резултата.

У петој фази истраживања извршена је свеобухватна анализа добијених резултата и обављено је њихово поређење са постојећим резултатима добијеним прегледом релевантне литературе.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Тематика којом се бави ова докторска дисертације је веома актуелна и у константном и интензивном развоју последњих година. Са глобалним порастом броја мобилних корисника и њиховим потребама за поузданом и брзом комуникацијом расте комплексност примопредајних система и повећава се дисторзија сигнала. Стога је од суштинског значаја постао истраживачки рад на проналажењу и развијању ефикасних и јефтних модела за линеаризацију сигнала.

Резултати остварени у оквиру спроведених истраживања доприносе унапређењу ефикасности и поузданости дигиталне предисторзије сигнала код предајника у савременим бежичним системима и као такви представљају полазну основу за даљи развој и истраживање у области дигиталне предисторзије.

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

Током својих докторских студија кандидаткиња Тамара Мушкатиновић-Зекић показала је све особине неопходне за самостално обављање научно-истраживачког рада. Кроз свој вишегодишњи истраживачки рад, показала је да је упозната са актуелним светским трендовима у области телекомуникација, да уме да препозна проблеме, као и да има систематичан приступ решавању истих. Такође, стручни и научно-истраживачки рад кандидаткиње потврђен је низом радова публикованих у часописима од међународног и националног значаја.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни доприноси у оквиру дисертације су следећи:

- Предложени су и оптимизовани нови модели за компензацију нелинеарне дисторзије код хибридног *beamforming* mMIMO предајника применом неуралних мрежа.
- Извршене су софтверске имплементације предложених модела и валидација смањења нелинеарне дисторзије коју уносе појачавачи код хибридног *beamforming* mMIMO предајника.
- Предложени су и оптимизовани нови модели за компензацију нелинеарне дисторзије код хибридног *beamforming* mMIMO предајника са више корисника применом неуралних мрежа.
- Извршене су софтверске имплементације предложених модела и валидација смањења нелинеарне дисторзије коју уносе појачавачи код хибридног *beamforming* mMIMO предајника са више корисника.
- Извршен је детаљан и систематичан преглед постојеће научно-стручне литературе из области дигиталне предисторзије сигнала.
- Извршен је детаљан и систематичан преглед постојеће научно-стручне литературе из области неуралних мрежа.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и остварених резултата, Комисија са задовољством констатује да је кандидаткиња Тамара Мушкатиновић-Зекић успешно одговорила на сва релевантна питања из области која је предмет докторске дисертације. Побројани научни доприноси су од великог значаја за област дигиталне предисторзије код савремених бежичних система. Кандидаткиња је извршила анализу релевантних DPD модела, уочила недостатке постојећих решења за компензацију нелинеарне дисторзије код модерних mMIMO предајника и предложила ефикаснија решења заснована на примени неуралних мрежа, чиме је остварено побољшање у линеаризацији сигнала. Сви резултати су верификовани софтверским симулацијама, а научни допринос дисертације је потврђен и публиковањем остварених резултата у релевантном међународном часопису, што доказује да се научним истраживањем у оквиру дисертације дошло до нових сазнања и резултата од међународног значаја.

### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси који су резултат истраживања у оквиру докторске дисертације публиковани су у следећим радовима, класификованим по категоријама М по Правилнику Министарства просвете и науке Србије:

Категорија M22:

1. **Muškatirović-Zekić T.**, Nešković N., Budimir Dj. „Efficient Neural Network DPD Architecture for Hybrid Beamforming mMIMO“, *Electronics*, 12 (3), 597, Januar 2023, <https://doi.org/10.3390/electronics12030597> (IF=2.690) (ISSN 2079-9292).

#### Kategorija M33:

1. **Muškatirović-Zekić T.**, Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Kompenzacija nelinearne distorzije kod hybrid beamforming MIMO predajnika“, *21st International Symposium INFOTEH-Jahorina*, pp. 72-76, Mart 2022.
2. **Muškatirović-Zekić T.**, Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Pregled rešenja digitalne predistorzije za hybrid beamforming MIMO predajnike“, *29. Telecommunication Forum (TELFOR) 2021*, pp. 1-4, Novembar 2021, DOI: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653422.
3. **Muškatirović-Zekić T.**, Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Pregled postojećih DPD modela sa ograničenom širinom propusnog opsega“, *Zbornik radova - 65. Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2021*, pp. 604-609, Septembar 2021, ISBN 978-86-7466-894-8.

#### Kategorija M63:

1. **Muškatirović-Zekić T.**, Nešković N., Budimir Dj. „Primena neuralnih mreža za kompenzaciju nelinearne distorzije u mobilnim sistemima nove generacije“, *PosTel 2022 - XL Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Novembar 2022.

#### Kategorija M53:

1. **Muškatirović-Zekić T.**, Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Compensation of nonlinear distortion in hybrid beamforming MIMO transmitters“, *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, Vol. 6, No. 1, pp. 26-30, Septembar 2022, e-ISSN: 2566-3682, DOI: 10.7251/IJEEC2206026Z, Kategorija: M53.

Поред претходно наведених радова, кандидаткиња је аутор/коаутор и у радовима из шире области Телекомуникација:

#### Kategorije M31 и M33:

1. **Muškatirović-Zekić T.** „Analiza mogućnosti realizacije backhaul sistema sa velikom gustinom linkova u E-bandu“, *25. Telecommunication Forum (TELFOR) 2017*, pp. 1-4, Novembar 2017, DOI: 10.1109/TELFOR.2017.8249322, Kategorija: M33.
2. **Muškatirović-Zekić T.**, Panajotović B., Bašić A. „Interfejsi i protokoli komunikacije u NFC“, *INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 13, pp. 512-517, Mart 2014, ISBN 978-99955-763-3-2, Kategorija: M33.
3. **Muškatirović-Zekić T.**, Bašić A., Panajotović B. „NFC tehnologija“, *7. INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, pp. 254-266, Decembar 2013, ISBN 978-86-88065-29, Kategorija: M31 (rad po pozivu).
4. Bašić A., **Muškatirović-Zekić T.**, Panajotović B. „Upravljanje rizikom po modelu ISO 31000 u pružanju telekomunikacionih usluga“, *7. INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, pp. 80-91, Decembar 2013, ISBN 978-86-88065-29, Kategorija: M31 (rad po pozivu).



5. **Muškatirović-Zekić T.**, Simić M. „Neparametarske metode nadgledanja spektra“, *21. Telecommunication Forum (TELFOR) 2013*, pp. 244-247, Novembar 2013, Kategorija: M33.
6. **Muškatirović-Zekić T.** "Monitoring radio frekvencijskog spektra," *20th Telecommunications Forum (TELFOR) 2012*, pp. 448-451, Novembar 2012, DOI: 10.1109/TELFOR.2012.6419243, Kategorija: M33.
7. **Muškatirović-Zekić T.** „Migracija ka all-IP u mobilnim sistemima“, *INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 11, pp. 273-276, Mart 2012, ISBN 978-99938-624-8-2, Kategorija: M33.
8. **Muškatirović-Zekić T.**, Janković M. „SC-FDMA as the uplink access technology in LTE“, *4. INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, Decembar 2011, Kategorija: M33.
9. **Muškatirović-Zekić T.**, Janković M., Odadžić B. „potential LTE application in 2.6 GHz band“, *3. INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, pp. 336-344, Jun 2011, ISBN 978-86-88065-16-0, Kategorija: M33.
10. **Muškatirović-Zekić T.** „LTE radio interfejs“, *INFOTEH-Jahorina*, Vol. 10, ref. B-II-1, pp. 129-133, Mart 2011, ISBN 978-99938-624-6-8, Kategorija: M33.
11. **Muškatirović-Zekić T.**, Panajotović B. „LTE as technology for next-generation mobile networks“, *2. INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, pp. 429-438, Decembar 2010, ISBN 978-86-88065-15-3, Kategorija: M33.

#### Категорија M53:

1. Janković M., Tintor V., Rašković J., **Muškatirović-Zekić T.** „Tržište telekomunikacija u republici Srbiji u 2006. godini“, *Stručno-naučni časopis Republičke agencije za telekomunikacije TELEKOMUNIKACIJE*, Decembar 2007, Kategorija: M53.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под насловом „Модели дигиталне предисторзије за хибридне масивне вишеантенске предајнике са формирањем снопа применом неуралних мрежа“ кандидаткиње Тамаре Мушкатировић-Зекић написана је у складу са образложењем наведеним у пријави теме и испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

У докторској дисертацији су предложени, развијени и верификовани модели дигиталне предисторзије применом неуралних мрежа, при чему су спроведена истраживања из две области: области дигиталне предисторзије и области неуралних мрежа. Имајући у виду да је линеаризација сигнала од изузетне важности у бежичним системима нове генерације, резултати ове докторске дисертације су од великог теоријског и практичног значаја.

Кандидаткиња Тамара Мушкатиновић-Зекић, дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства, је овим истраживањем показала научну и инжењерску зрелост и способност за самосталан научно-истраживачки рад.

На основу свега наведеног Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Модели дигиталне предисторије за хибридне масивне вишеантенске предајнике са формирањем снопа применом неуралних мрежа“ прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 29.08.2023. године

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



др Никола Томашевић, виши научни сарадник  
Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин



др Милан Илић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Ђурађ Будимир, гостујући професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет