

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

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

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5012/09-3 од 25.4.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Ненада Мунића** под насловом  
**„Одређивање карактеристика електромагнетске емисије уређаја мерених у  
Фарадејевом кавезу помоћу технике обраде ретких сигнала“**

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

Кандидат је пријавио тему за израду докторске дисертације 26.05.2016. године.

Комисија за студије трећег степена је разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата 31.05.2016. године. Позитивна одлука је упућена Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће, на седници бр. 800 од 21.06.2016. године, донело је одлуку о именовану Комисије за оцену теме и кандидата (одлука број 5012/09-1 од 21.06.2016. године) у саставу:

1. др Драган Олћан, ванредни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
2. др Александар Ковачевић, научни сарадник, Технички опитни центар,
3. др Златан Стојковић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

За ментора докторске дисертације предложена је др Марија Стевановић, доцент Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Усмена одбрана теме кандидата Ненада Мунића је одржана 23.06.2016. године на Електротехничком факултету, уз присуство свих именованих чланова Комисије и ментора. На основу одбране сачињен је Извештај.

На седници Наставно-научног већа одржаној 05.07.2016. усвојен је Извештај Комисије о подобности теме и кандидата и исти упућен Већу техничких наука на усвајање (одлука број 5012/09-2).

На седници одржаној 19.09.2016. године, Веће техничких наука Универзитета у Београду је дана дало сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Одређивање карактеристика електромагнетске емисије уређаја мерених у Фарадејевом кавезу помоћу технике обраде ретких сигнала“ (одлука број 61206-4369/2-16 од 19.09.2016. године).

Кандидат је предао дисертацију и предлог Комисије за преглед дисертације 30.03.2017. године.

Дана 4.4.2017. 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.

Наставно-научно веће Факултета је на седници одржаној 11.04.2017. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације Ненад Мунића (одлука број 5012/09-3 од 25.04.2017. године) у саставу:

1. др Марија Стевановић, ванредни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
2. др Драган Олћан, ванредни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
3. др Александар Ковачевић, научни сарадник, Технички опитни центар,
4. др Златан Стојковић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
5. др Антоније Ђорђевић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Студијски програм докторских студија кандидат је започео школске 2009/2010. године. 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 Статуту Универзитета у Београду, као и додатно продужење за годину дана на основу Одлуке бр. 24-06/25-2009/5012 од 11.10.2016. године.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Ненада Мунића под насловом „Одређивање карактеристика електромагнетске емисије уређаја мерених у Фарадејевом кавезу помоћу технике обраде ретких сигнала“ припада научној области Техничке науке - електротехника, а ужа научна област теме је Електромагнетика, антене и микроталаси (подобласт Електромагнетска компатибилност), за коју је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан.

Дисертација је урађена под менторством др Марије Стевановић, ванредног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду, која је квалификована за менторство овог доктората, што је потврђено њеним релевантним радовима који су наведени приликом пријаве теме докторске дисертације кандидата.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Ненад Мунић је рођен 26.05.1982. године у Сјеници, Србија. Основну школу Светозар Марковић завршио је у Сјеници 1997. године. Војну гимназију завршио је у Београду 2001. године. Дана 16. септембра 2006. године завршио је школовање на Војној академији, Одсеку логистика, смеру ваздухопловнотехничке службе - специјалност радарско рачунарска. Војну академију завршио је са просеком 9,24 и са оценом 10 одбранио дипломски рад на тему „Упоредна анализа мерења фактора шума“.

По завршетку школовања на Војној академији промовисан је у чин потпоручника са службом на аеродрому Лађевци код Краљева. Јануара 2010. године прешао је у војну научно-стручну установу Технички опитни центар Војске Србије. Тренутно ради у Сектору за електронику на формацијском месту виши истраживач. Учествовао је као руководиоца радног тима или члан радног тима на пословима завршних, хомологационих и верификационих испитивања, као и испитивања средстава наоружања и војне опреме из радарских области (модернизовани радар П-12, ЦВОЈ М-11, супституција магнетрона, малешумни претпојачавач и 3Д радар), ракетних система (модернизација НЕВА М1Т и КУБ М1), радио-гониометара за ВФ опсег (ХЕРА-1) и ВВФ/УВФ опсег (ВЕРА-1) итд.

Учествовао је на више пројеката, међу којима је аутоматизација мерења имуности на кондукционе сметње и на поље сметњи, као и пројекат реализације антенског полигона. Учествовао је у раду бројних комисија за усвајање војних стандарда и докумената о квалитету производа.

До сада је објавио 15 радова из области електромагнетске компатибилности, дигиталне обраде сигнала, мерења и поузданости.

Служи се енглеским и руским језиком.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је написана на 125 страна текста куцаног латиничним писмом и садржи 89 слика, 13 табела и 56 библиографских референци. Такође, дисертација садржи насловну страну на српском и енглеском језику, страну са подацима о ментору и члановима Комисије, кратак резиме на српском и енглеском језику, садржај, увод и седам тематских поглавља, преглед коришћене литературе, биографију аутора и прилог. Тематска поглавља дисертације су насловљена на следећи начин: 1. Дефинисање алгорита за одређивање параметара еквивалентних извора, 2. Израда уређаја који ће се користити за експерименталну потврду методе, 3. Израда симулационог модела Фарадејевог кавеза, 4. Мерење испитиваног уређаја у Фарадејевом кавезу и анехоишној соби, 5. Прорачун параметара зрачења уређаја новом методом, 6. Упоредивање резултата добијених различитим мерним техникама и 7. Закључак. Прилог се састоји од три дела: Прилог 1. Изјава о ауторству, Прилог 2. Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторске дисертације и Прилог 3. Изјава о коришћењу.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу објашњен је значај Фарадејевог кавеза као алтернативног места за испитивања електромагнетске емисије уређаја, као и циљеви истраживања и полазне хипотезе.

У првом поглављу је дефинисан алгоритам за одређивање параметара еквивалентних извора којима се моделује испитивани уређај, на основу мерења у Фарадејевом кавезу. Процењени параметри омогућавају да се одреди зрачење испитиваног уређаја у произвољној средини.

Развој и моделовање уређаја који ће се користити за експерименталну потврду методе описан је у другом поглављу. Такође, у истом поглављу напон напајања побуде извора је измерен анализатором спектра и капацитивним разделником напона. Ниво електричног поља извора у слободном простору, на растојању од 3 m, одређен је симулационо, користећи претходно измерен напон побуде. За та мерења је одређен буџет мерне несигурности.

У оквиру трећег поглавља описан је поступак развоја симулационог модела Фарадејевог кавеза. До задовољавајућег модела кавеза се дошло поступно, кроз побољшања модела, поредећи резултате симулација и резултате мерења. Такође, за потребе тачног модела Фарадејевог кавеза, експериментално су утврђени површински губици плоча кавеза и детектована места цурења на саставима плоча.

Четврто поглавље обухвата мерења испитиваног уређаја у Фарадејевом кавезу и анехоишној соби. Мерењем у анехоишној соби су добијени резултати нивоа електричног поља, на растојању од 3 m од извора. Мерења у Фарадејевом кавезу су приказана кроз три серије мерења, којима одговарају различите мерне поставке, тј. методе мерења.

Приказ струјних одзива еквивалентних дипола индукованих на пријемној антени добијених коришћењем реалистичког модела Фарадејевог кавеза дат је у петом поглављу. При томе, напони побуде еквивалентних дипола су одређени применом технике обраде ретких сигнала, односно применом  $I_1$  регуларизације, која умањује неодређеност решења инверзних електромагнетских проблема. Коефицијент регуларизације је одређен тако да одговара колону L-криве.

У шестом поглављу је дат упоредни приказ резултата добијених различитим мерним техникама. При томе, идентификовани су бројни извори мерне несигурности и дат је буџет мерне несигурности (енг. uncertainty budget).

Закључна разматрања и коначна анализа истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације изложени су у завршном седмом поглављу.

## **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 3.1. Савременост и оригиналност

У складу са стандардима из области електромагнетске компатибилности (ЕМК), отворен простор или полуанехоишна соба су места где се врше испитивања електромагнетске емисије уређаја, као и имуности уређаја на електромагнетске сметње. Међутим, често није могуће или је економски неисплативо реализовати испитивања на наведеним местима. Због тога су развијене бројне мерне технике које омогућавају да се испитивања електромагнетске компатибилности реализују на алтернативним местима, као што су TEM коморе, GTEM коморе и реверберационе собе. Предмет ове дисертације је дефинисање нове методе која омогућава да се Фарадејев кавез користи као економски повољно место за испитивање електромагнетске емисије уређаја

Циљ овог истраживања је био развој нове методе која корелише резултате мерења у Фарадејевом кавезу са одговарајућим мерењима на отвореном простору. Да би се то постигло, морали су се превазићи проблеми при мерењима у Фарадејевом кавезу који су последица рефлексија од зидова, пода и плафона кавеза. Наиме, резултати мерења знатно зависе од положаја испитиваног уређаја у Фарадејевом кавезу, посебно при резонантним учестаностима кавеза. Нова метода користи управо те рефлексије, уместо да покушава да их анулира, и на тај начин постиже задовољавајућу поновљивост и тачност мерења, без обзира на положај уређаја у Фарадејевом кавезу. Нова метода даје могућност поређења тако добијених резултата са мерењима на отвореном (референтном) мерном месту, што је од кључног значаја за испитивања уређаја у пракси.

Старији приступ, који се користи при реализацији мерења у Фарадејевим кавезима и који је још увек присутан у неким стандардима, у потпуности занемарује постојање утицаја кавеза на резултате мерења. Актуелни приступ, који се последњих деценија користи у мерењима, подразумева коришћење „мешача модова“ (тзв. реверберационе коморе). При томе, статистичком анализом резултата мерења, за различите угловне положаје мешача, добијају се процене нивоа електромагнетске емисије уређаја. Ограничење ове методе се огледа у постојању најниже употребљиве учестаности (LUF – енг. Low Usable Frequency) реверберационе коморе, која је увек виша од прве (најниже) резонантне учестаности Фарадејевог кавеза. За разлику од старог и од актуелног приступа, метода која се предлаже омогућава прецизна мерења електромагнетске емисије без занемаривања утицаја кавеза на резултате мерења, као и да се мерења реализују на учестаностима које су не само ниже од најниже употребљиве учестаности, већ ниже и од минималне резонантне учестаности датог Фарадејевог кавеза. Применом нове методе, која електромагнетску емисију уређаја одређује обрадом података мерења у Фарадејевом кавезу, добијамо резултате чија се тачност не деградира са смањивањем фреквенције мерења, за разлику од мерења у анехоичним и полуанехоичним собама. То је омогућено коришћењем свих предности сложеног простирања сигнала у Фарадејевом кавезу (енг. multipath). Додатно, нова метода омогућава да мерења у Фарадејевим кавезима могу да замене мерења на отвореном мерном месту.

### 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 кандидат имао темељан увид у досадашње доприносе у овој и блиским научним областима. Наведено је укупно 56 библиографских референци. Листа укључује и три рада која је кандидат објавио током израде докторске дисертације, а који су директно проистекли из рада на дисертацији.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У истраживању се пошло од хипотезе да се поље зрачења испитиваног уређаја може апроксимирати помоћу поља ортогоналних електрички кратких дипола. Тако описан уређај има једнозначно одређено поље (односно електромагнетску емисију) у произвољном окружењу, као, на пример, изнад проводне равни или у слободном простору. Одређивање параметара еквивалентних дипола представља инверзни електромагнетски проблем који је решаван применом технике обраде ретких сигнала. Мерни модел укључује електромагнетско расејање од зидова, пода и плафона Фарадејевог кавеза. Сложеност простирања сигнала у срединама као што је Фарадејев кавез повољно утиче на тачност решења. Овај ефекат је нашао примену у различитим областима, као што су гледање кроз зид и естимација правца напласка таласа.

Еквивалентни диполи су коришћени још у анализи извора помоћу мерења у ТЕМ и ГТЕМ коморама. У том случају параметри извора се одређују на основу веза између измерених напона и момената дипола. Слично томе, еквивалентни диполи су нашли примену у карактерисању емисије штампаних плоча. Моменти дипола су одређивани решавањем инверзног проблема који је базиран на мерењима блиског поља, где се, поред магнитуде поља, мери и фаза (векторска мерења). Нажалост, у мерењима у Фарадејевом кавезу, када се мери једном пријемном антенном, није могуће одређивање фазе, већ само магнитуде поља (скаларна мерења).

У овом раду се пошло од претпоставке да је број еквивалентних дипола потребан за карактерисање извора мали, зато што се моделују електрички мали уређаји. Наиме, на основу теорије мултипола, произвољан електрични мали извор зрачења може се заменити са 6 дипола: 3 ортогонална електрична дипола и 3 ортогонална магнетска дипола. У случају извора који је посматран у овој дисертацији, довољна је апроксимација са 3 ортогонална електрична дипола. Међутим, проблем може да се лако генерализује тако да се укључе оба типа еквивалентних извора. Одзив дипола се одређује на основу реалистичног модела Фарадејевог кавеза.

С обзиром на то да је информација о фази недоступна, не могу се користити уобичајене технике за регуларизацију, као што су Тихонов метод или крња сингуларна декомпозиција (TSVD – енг. truncated singular value decomposition). Уместо тога, коришћена је  $l_1$  регуларизација, односно, техника обраде ретких сигнала. У општем случају, ова техника такође захтева познавање фазе. Међутим, примена технике обраде ретких сигнала када није позната информација о фази, реализује се одабиром коефицијента регуларизације тако да он одговара колелу L-криве, чиме се издваја један доминантни дипол. За одређивање осталих чланова мора се извршити нелинеарна оптимизација, зато што није позната информација о фази.

Предложена метода је верификована скаларним мерењима извора у Фарадејевом кавезу. Резултати обраде су упоређени са онима добијеним у анехоичној соби и резултатима процене параметара извора коришћењем анализатора спектра и нумеричке обраде.

#### 3.4. Применљивост остварених резултата

Нова методологија омогућава да се Фарадејеви кавези користе као јефтинија алтернатива анехоичној соби или полуанехоичној соби. Додатно, мерења у постојећим Фарадејевим кавезима моћи ће да послуже као валидна замена мерењима на отвореном месту. Такође, нова метода, у односу на стандардизовани мерни поступак у реверберационим собама, омогућава успешно мерење уређаја на фреквенцијама које су испод најниже употребљиве фреквенције реверберационе коморе, као и испод најниже резонантне фреквенције кавеза. То је омогућено коришћењем свих предности у простирању сигнала у Фарадејевом кавезу.

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

На основу прегледане дисертације Комисија процењује да је кандидат Ненад Мунић показао способност за самостални научни рад, почевши од систематичног прегледа постојеће научне литературе и стандарда, преко уочавања практичних проблема и потреба за усавршавањем мерења електромагнетске емисије уређаја у Фарадејевом кавезу, развоја и моделовања уређаја који ће се користити за експерименталну потврду методе, осмишљавања експерименталних мерења, при чему је развијена оригинална метода мерења у Фарадејевом кавезу, као и алгоритма за одређивање параметара еквивалентних извора користећи мерења у

Фарадејевом кавезу. У прилог поменутом је и чињеница да је кандидат објавио низ научних радова који су се 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 докторске дисертације огледају се у следећем:

- Развој нове методе, која омогућава да се на основу скаларних мерења, помоћу еквивалентних дипола, применом технике обраде ретких сигнала у Фарадејевом кавезу, одреди електрично поље које тај извор зрачи у слободном простору.
- Могућност да се мерења у Фарадејевом кавезу могу успешно корелисати са одговарајућим мерењима на отвореном мерном месту.
- Употреба Фарадејевог кавеза као јефтине алтернативе стандардизованим мерним местима за испитивање електромагнетске компатибилности (ЕМК), као што су (полу)анехоишне собе и отворени мерни простор.
- Нова метода, у односу на стандардизовани мерни поступак у реверберационим собама, омогућава успешно мерење уређаја на фреквенцијама које су испод најниже употребљиве фреквенције реверберационе коморе, као и испод најниже резонантне фреквенције кавеза

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и остварених резултата констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва релевантна питања везана за решавање проблема дефинисаног предметом истраживања. Систематичан преглед постојеће научне литературе и стандарда, дефинисање алгорита за одређивање параметара еквивалентних извора, израда уређаја који ће се користити за експерименталну потврду методе, израда симулационог модела Фарадејевог кавеза, мерења испитиваног уређаја у Фарадејевом кавезу и анехоишној соби, прорачун параметара зрачења уређаја новом методом и упоређивање резултата добијених различитим мерним техникама представљају значајан научни допринос у области електромагнетске компатибилности, што је верификовано објављивањем резултата истраживања у врхунском међународном часопису, као и на признатим конференцијама од међународног значаја.

### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је објавио више радова у вези са темом докторске дисертације, чији су резултати проистекли из дисертације или су тесно везани са истраживањем спроведеним у оквиру ње:

#### Категорија M21:

1. Nenad Munic, Marija Stevanovic, Antonije Djordjevic, Aleksandar Kovacevic: "Evaluation of Radiating-Source Parameters by Measurements in Faraday Cages and Sparse Processing", *Measurement*, Vol. 104, pp. 105-116, 2017, DOI 10.1016/j.measurement.2017.03.008 (IF=1.742, M21) (ISSN 0018-9359).

#### Категорија M33:

1. Н. В. Мунџић, А. М. Ковачевић, А. Р. Ђорђевић: „Моделовање Фарадејевог кавеза за испитивање електромагнетске компатибилности“, *Зборник радова IX Конференције ТЕЛФОР 2011*, стр. 965-968, Београд, Србија, 2011,

2. **Н. В. Мунић**, М. М. Николић, А. М. Ковачевић, А. Р. Ђорђевић: „Побољшано моделовање Фарадејевог кавеза за испитивање електромагнетске компатибилности“, *Зборник радова XX Телекомуникационог форума, ТЕЛФОР 2012*, 20-22. новембар, 2012, Београд, Србија, стр. 1115-1118, ISBN: 978-1-4673-2984-2.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Ненада Мунића под насловом „Одређивање карактеристика електромагнетске емисије уређаја мерених у Фарадејевом кавезу помоћу технике обраде ретких сигнала“ 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.

Остварени научни допринос ове дисертације се огледа у развоју нове методе која омогућава да се на основу скаларних мерења, помоћу еквивалентних дипола, применом технике обраде ретких сигнала у Фарадејевом кавезу, одреди електрично поље које тај извор зрачи у слободном простору. То ствара могућност да се мерења у Фарадејевом кавезу могу успешно корелисати са одговарајућим мерењима на отвореном мерном месту. Тиме нова метода омогућава употребу Фарадејевог кавеза као јефтине алтернативе стандардизованим мерним местима за испитивање електромагнетске компатибилности, као што су (полу)анехоичне собе и отворени мерни простор. Нова метода, у односу на стандардизовани мерни поступак у реверберационим собама, омогућава успешно мерење уређаја на фреквенцијама које су испод најниже употребљиве фреквенције реверберационе коморе, као и испод најниже резонантне фреквенције кавеза. То је омогућено коришћењем свих предности сложеног простирања сигнала у Фарадејевом кавезу (енг. multipath).

Резултате проистекле из истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у врхунском међународном часопису и презентовао стручној јавности на конференцијама од међународног и националног значаја. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија констатује да дисертација представља оригиналан и савремен научни допринос у области електромагнетске компатибилности.

Кандидат Ненад Мунић показао је способност за самостални научни рад, што потврђује и чињеница да је објавио низ научних радова који су проистекли из дисертације, а у којима се појављује као први аутор. Комисија констатује да је кандидат Ненад Мунић, дипломирани инжењер електротехнике, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду, као и Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.



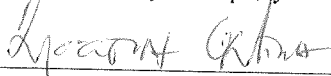
Имајући у виду наведено, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Одређивање карактеристика електромагнетске емисије уређаја мерених у Фарадејевом кавезу помоћу технике обраде ретких сигнала“ кандидата Ненада Мунића прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 04.05.2017. године.

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Марија Стевановић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Драган Олћан, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Александар Ковачевић, научни сарадник  
Технички опитни центар (спољни члан)



др Златан Стојковић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Антоније Борђевић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет