

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Слободана Тодосијевића**

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5063/11-3 од 22. септембра 2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Слободана Тодосијевића** под насловом

**Развој фотоакустичког мерног система за термичку карактеризацију танких узорака**  
**Development of photoacoustic measurement system for thermal characterization of thin samples**

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

Слободан Тодосијевић је пријавио тему за израду докторске дисертације 2.2.2017. године. Комисија за студије трећег степена је на својој седници дана 7.2.2017. године разматрала поднету пријаву теме докторских студија и свој предлог о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање. Наставно-научно веће је на својој седници дана 24.2.2017 године именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме ове докторске дисертације. Наставно-научно веће на седници одржаној дана 14.3.2017. године усвојило је поднети извештај Комисије (одлука бр. 5063/11-2). Веће научних области техничких наука својом одлуком број 61206-1185/2-17 од 27.3.2017. године дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом: „Развој фотоакустичког мерног система за термичку карактеризацију танких узорака“.

Кандидат је дана 31.8.2017. године предао урађену докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена на својој седници одржаној дана 5.9.2017. године потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. На основу тога Наставно-научно веће Факултета својом одлуком бр. 5063/11-3 од 22.9.2017. године именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу који је наведен на крају овог извештаја.

## 1.2 Научна област дисертације

Докторска дисертација припада области Електроника, телекомуникације и информационе технологије, ужа научна област Наноелектроника и фотоника. За ментора је одређен др Милан Тадић, редовни професор.

Он је изабран у звање редовног професора за област Наноелектроника и фотоника и сви његови публиковани радови га квалификују за ментора из те области.

## 1.3 Биографски подаци о кандидату

Слободан Тодосијевић, дипломирани инжењер електротехнике, рођен је 21.5.1983. године у Новом Пазару. Завршио је Гимназију у Краљеву 2002. године. Дипломирао је 2008. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Електроника, са просечном оценом 8,31, одбравивши дипломски рад под називом „Реализација УАРТ модула са ФИФО меморијама у VHDL-у за Xilinx Spartan – 3А FPGA чип“.

Током израде дипломског рада провео је три месеца на пракси у Институту „Михајло Пупин“, а након дипломирања 2009-2010. године радио је као пројектант система у предузећу „High Tech Engineering Center“ у Београду, а затим као електроенергетски пројектант у предузећу „Grafix“ у Београду 2010-2011. године. У периоду 2011-2012. године био је запослен као инжењер сарадник у Заводу за заваривање у Београду.

Докторске студије на Модулу за наноелектронику и фотонику Електротехничког факултета Универзитета у Београду уписао је 2011. године, а 2012. године запослио се као истраживач-приправник на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву, где је ангажован на пројекту МПНТР Републике Србије „Развој методологија и средстава за заштиту од буке урбаних средина“. У звање истраживач сарадник изабран је 2013. године на Факултету за машинство и грађевинарство, а 2016. године изабран је у звање асистента на предметима Физика, Техничка физика и Електротехника са електроником, на истом факултету.

Област истраживања Слободана Тодосијевића обухвата фототермичке појаве и фотоакустику, пренос топлоте кроз материјале, термичку карактеризацију материјала, као и појаву топлотне меморије у материјалима. Аутор је два рада у међународним часописима, девет радова на међународним конференцијама штампаним у целости, два рада на међународним конференцијама штампаним у изводу, пет радова у домаћим часописима и једног техничког решења.

## 2. **Опис дисертације**

### 2.1 Садржај дисертације

Докторска дисертација Слободана Тодосијевића је написана на 219 страна на српском језику. Дисертација садржи 125 слика, 18 табела и 81 нумерисану једначину. По форми и структури одговара Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14. децембра 2011. године. Садржи насловну страну на српском и енглеском језику, резиме на српском и енглеском језику, садржај, 13 глава, изјаву о ауторству, изјаву о коришћењу, изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и кратку биографију. Главе дисертације су насловљене као:

1. Увод (5 страна)
2. Принципи фототермичких метода и фотоакустике (12)
3. Теоријски модел (4 стране)
4. Фотоакустички мерни системи – преглед стања (10 страна)
5. Преносна функција фотоакустичког мерног система (8 страна)
6. Фотоакустички мерни систем развијен у оквиру дисертације (55 страна)
7. Експерименталне технике и процедуре за карактеризацију и примену развијеног ФАМС (31 страна)
8. Резултати експерименталних процедура за одређивање преносне функције ФАМС (9 страна)
9. Примена развијеног ФАМС за термичку карактеризацију (36 страна)
10. Дискусија (11 страна)
11. Закључак (4 стране)
12. Литература (11 страна)
13. Прилози (23 стране)

## 2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

Докторска дисертација је подељена у 13 поглавља.

Након Увода, који представља прво поглавље, у другом поглављу се говори о принципима фототермичког (ФТ) и фотоакустичког (ФА) ефекта. Описују се појаве које настају услед ФТ ефекта и мерне методе, класификоване на основу параметара који се мењају услед ФТ ефекта. Објашњавају се две најбитније технике за ову дисертацију, а то су ФА спектроскопија и фреквенцијска ФА техника и даје се предлог методе која би користила обе поменуте технике ради истовременог одређивања оптичких и термичких параметара. Понаособ се дефинишу термички параметри и даје се објашњење топлотне меморије.

Треће поглавље се односи на теоријски модел који је коришћен у оквиру ове дисертације. Приказује се модел са апроксимацијама за линеарно фитовање у одређеним подопсезима у којима је доминантна по једна компонента ФА одзива, термоеластична (на високим модулационим фреквенцијама), односно термодифузиона (на ниским модулационим фреквенцијама). Поред тога, укратко је приказан теоријски модел који описује ефекте топлотне меморије.

Четврто поглавље представља преглед стања у области фотоакустичких система за термичку карактеризацију. Описане су две основне конфигурације, рефлексiona и трансмисиона. Поред тога, наведени су примери у литератури који користе ове конфигурације, као и одређене врсте ФА ћелија које се ређе срећу, као што су диференцијална и резонантна ФА ћелија.

Почевши од петог поглавља, у овој дисертацији се приказују резултати.

Пето поглавље приказује теорију и прорачун функције преноса ФА мерног система (ФАМС). Укупна функција преноса ФАМС се може представити као производ функција преноса компоненти које чине систем, па су стога описане функције преноса ФА ћелије, појачавача и микрофона.

Шесто поглавље заузима централно место ове тезе, како према приказаном материјалу, тако и по детаљном опису делова који чине ФАМС развијен у оквиру докторске дисертације. Описан је мерни систем, његови побудни и детекциони делови, као и компоненте које чине те делове.

Седмо поглавље представља експерименталне процедуре и технике коришћене у оквиру дисертације. Најважнији резултати у овом поглављу су успостављање процедуре за експериментално одређивање функције преноса ФАМС у изолованој просторији, као и процедура за одређивање излазне импедансе и осетљивости микрофона.

У осмом поглављу су приказани резултати експерименталног одређивања функција преноса за различите микрофоне. За неке од њих су мерења обављена како у анехоичној комори, тако и у изолованој просторији.

Девето поглавље приказује верификацију резултата мерења ФАМС развијеног у оквиру докторске дисертације поређењем са резултатима мерења референтним ФАМС на пет различитих узорака. Овде се отишло и корак даље, па су развијене и примењене процедуре за одређивање термичких параметара на основу добијених експерименталних резултата, применом линеарног и нелинеарног фитовања, нормализације мерења на узорцима различитих дебљина и усаглашавања резултата добијених експерименталним одређивањем зависности амплитуде и фазног кашњења ФА одзива од фреквенције модулације. Одређена је и приказана поновљивост система. Вариране су одређене хардверске компоненте и њихове карактеристике и приказани су резултати мерења са таквим системима. На крају су приказани резултати мерења на узорку графита, који показују одступања од предвиђања класичне теорије провођења топлоте и дата су поређења са моделом који укључује ефекте топлотне меморије.

Десето поглавље садржи дискусију која је извршена на основу свих резултата, групишући их и повезујући у једну целину.

У једанаестом поглављу су дати закључци и предлози за будућа истраживања.

Дванаесто поглавље садржи литературу.

Тринаесто поглавље чине прилози. У првом прилогу овог поглавља приказани су програми написани за софтверски пакет Матлаб. У другом прилогу је приказан детаљан прорачун спектралних густина струја шума за микрофон и појачавач, на основу којих се одређивао утицај појачавача на однос сигнал - шум са микрофона. Трећи прилог представља извођење једначина за *lock-in* детекцију, које се користе за реконструисање амплитуде и фазе ФА одзива.

### 3. Оцена дисертације

#### 3.1 Савременост и оригиналност

Фотоакустички мерни системи засновани на гас-микрофонској детекцији су намењени за бесконачно недеструктивно испитивање термичких карактеристика танких узорака.

Трендови минијатуризације у савременој електроници, који све више користе танкослојне структуре, чине овај систем актуелним, јер нуде технику комплементарну стандардним техникама термичке карактеризације, које се по правилу тешко могу применити на танкослојне узорке. Мерење термичких својстава танких слојева се данас интензивно користи и у биологији, где се примењује за термичку карактеризацију ткива инсеката и биљака, која је важна при одређивању њихове структуре и истраживањима функционалности ових ткива, у циљу биомиметичких примена.

Не постоје комерцијално доступни системи овог типа, па развој сваког фотоакустичког система представља оригиналан подухват. Иако заснован на концепцијама које су приказане у литератури, развој система представљеног у дисертацији је оригиналан допринос кандидата, који је у потпуности самостално пројектовао и конструисао сваку од компонената система.

Кандидат је оригиналан допринос дао у домену карактеризације развијеног мерног система, јер је развио метод за експериментално одређивање преносне функције фотоакустичког мерног система. Овако одређену преносну функцију система кандидат је даље искористио да развије оригиналан метод одређивања фотоакустичког одзива система у фреквенцијском опсегу у коме преносна функција није константна, чиме је постигао значајно проширење фреквенцијског опсега за термичку карактеризацију материјала, што је главни задатак дисертације. Теоријске основе термичке карактеризације применом фотоакустичког ефекта показују да тачност одређивања термичких параметара критично зависи од ширине фреквенцијског опсега мерења, па оригинални поступак који је развио кандидат (експериментално одређивање преносне функције мерног система и њена примена за одређивање фотоакустичког одзива), којим се фреквенцијски опсег шири са 10 Hz - 1 kHz на 50 Hz - 10 kHz, има велики практични значај.

Генерализовани фотоакустички теоријски модел представљен у овој дисертацији подразумева постојање топлотне меморије у материјалима. У односу на класичну теорију фотоакустике, овде се укључује још један термички параметар, а то је време релаксације топлоте. На основу овог параметра се може прорачунати брзина просторања топлоте кроз материјале. Развој система у оквиру докторске дисертације је, једним делом, усмераван ка одређивању брзине преноса топлоте, што се огледа у модуларности система и могућности да се врло лако промене и прилагоде одређене хардверске компоненте, а развијене софтверске процедуре примене.

Минијатуризација и могућност детектовања топлотне меморије чине овај систем савременим и оригиналним, чему доприноси и термичка карактеризација материјала на основу развијених процедура описаних у дисертацији.

### 3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је детаљно истражио релевантну литературу и у 12. поглављу дисертације навео 118 извора, који подразумевају књиге, научне радове, прописане стандарде и интернет везе као доказе својих навода. Наведени извори покривају области фотоакустике, фототермичких метода, мерних техника које се заснивају на промени одређених физичких параметара услед фототермичког ефекта, мерних система развијених у фотоакустици, структуре микрофона, вредности термичких параметара материјала, као и оног дела електронике који је био неопходан за изградњу фотоакустичког мерног система. Поред навода других аутора, кандидат се у датој литератури позива и на своје радове.

### 3.3 Опис и адекватност примењених научних метода

Због природе проблема којим се бави ова докторска дисертација, а то је развој мерног система, већина метода примењених у оквиру дисертације су експерименталне. Поре тога, при пројектовању одређених компоненти система су вршене симулације којима је одређиван оптималан режим рада тих компоненти.

Експерименталним методама које су развијене у оквиру дисертације је извршена карактеризација микрофона као носиоца детекционог дела система. Развијене експерименталне методе укључују експериментално одређивање преносних функција ФАМС (микрофонских карактеристика) у изолованој просторији, одређивање осетљивости микрофона и одређивање излазне импедансе микрофона.

Поред тога, експерименталним методом је извршена и верификација развијеног мерног система. То је учињено мерењем термичких параметара узорака алуминијума, бакра, полиамида, АБС (акрилонитрил бутадиеен стирен) пластике и графита. Резултати су упоређени са резултатима добијеним другим мерним системом овог типа и поређењем са литературним вредностима за поменуте материјале. Овим поступком су уједно експериментално верификоване и развијене софтверске процедуре за обраду експерименталних података, што укључује методе линеарног и нелинеарног фитовања амплитудских и фазних зависности од фреквенције модулације, као и метод нормализације ових зависности добијених на узорцима различитих дебљина начињеним од истог материјала.

Симулацијама рада је оптимизован рад дигиталног *lock-in* детектора, што је учињено писањем одговарајућих процедура за софтверски пакет Матлаб. Поред тога, применом симулација је извршена оптимизација рада електричних кола појачавача сигнала и модулације светлосних извора, применом софтверског пакета *OrCad*.

#### 3.4 Применљивост остварених резултата

Систем развијен у оквиру дисертације се може применити за одређивање топлотне дифузивности и коефицијента линеарног ширења материјала. Теорија предвиђа и могућност одређивања трећег параметра – топлотне проводности, али је за одређивање овог параметра потребно познавање амплитуде притиска фотоакустичког одзива, што је принципијелно могуће учинити са фотоакустичким системом који је развијен, мада та могућност није искоришћена. Највећи проблем представља поступак постављања узорка у мерни систем пре мерења, који не обезбеђује поновљивост резултата при мерењу на једнаким узорцима. Овај недостатак онемогућава калибрацију мерног система, Међутим, треба истаћи да мерења на истом узорку који није уклањан из мерног система показују високу поновљивост, што потврђује да је остатак система осмишљен тако да омогући калибрацију, односно мерење вредности амплитуде фотоакустичког притиска, што би за последицу имало могућност мерења топлотне проводности танких слојева.

Од посебног интереса је то што је мерни систем развијен користећи генерализовани фотоакустички теоријски модел, који подразумева постојање топлотне меморије у материјалима. Услед тога је систем пројектован тако да омогући мерење времена релаксације топлоте. На основу овог параметра се може прорачунати брзина просторања топлоте кроз материјале.

Развијени фотоакустички систем је у могућности да изврши мерења у фреквенцијском опсегу где се очекују резонантне фреквенције топлотних таласа у материјалима са ниским степеном уређења као што су полимери и ткива. С обзиром да у фотоакустичким мерним системима заснованим на гас-микрофонској детекцији постоје резонантне појаве везане за простирање фотоакустичког таласа притиска, као и резонанце микрофона као електромеханичког система, фотоакустички мерни систем у овом раду, коме су експериментално одређене резонантне фреквенције свих резонанци које постоје у систему, представља први систем који има могућност да детектује топлотне резонанце.

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

Кандидат Слободан Тодосијевић је самостално осмислио дизајн и компоненте фотоакустичког система, развио га, успоставио експерименталне методе за карактеризацију делова система, као и процедуре за обраду експериментално одређених података у циљу добијања термичких параметара. Треба напоменути да је услове за извођење експеримената самостално обезбеђивао, а највећи део опреме која је коришћена у развоју овог система самостално проналазио и набављао. Његова самосталност се огледа и у излагању резултата на научним скуповима и конференцијама. То је чинио десет пута, од чега је осам пута излагао на енглеском језику.

## 4. Остварени научни допринос

### 4.1 Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни доприноси ове дисертације су:

- развој недеструктивног експерименталног система за карактеризацију термичких параметара танких материјала;
- развој процедуре за експериментално одређивање преносне функције фотоакустичког мерног система;
- развој поступка за термичку карактеризацију танких узорака развијеним фотоакустичким мерним системом применом преносне функције система;
- развој експерименталне технике која омогућава детекцију топлотних резонанци и проверу постојања топлотне меморије;
- предложена је мерна техника заснована на фотоакустичком ефекту која омогућава симултано одређивање оптичких и термичких параметара.

### 4.2 Критичка анализа резултата истраживања

Резултати истраживања које је кандидат изложио у својој докторској дисертацији су у складу са Извештајем о подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације, а посебно у складу са дефинисаним предметом, планом и циљем истраживања.

Уобичајено је да се мерни системи примењују у фреквенцијским областима у којима је амплитуда њихове преносне функције константна, а фаза преносне функције линеарно зависи од фреквенције, и такве фреквенцијске области се називају пропусним опсезима мерних система. Код таквих мерних система излазни сигнал је пропорционалан улазном сигналу, а фреквенцијска зависност фазе доводи до кашњења сигнала који систем преноси. Та стандардна концепција примене мерних система ограничава примену фотоакустичких мерних система заснованих на гас-микрофонској детекцији на фреквенцијски опсег у коме је амплитудска карактеристика микрофона константна. Микрофони малих димензија, какви се користе у мерењима заснованим на фотоакустичком ефекту, имају електромеханичку резонанцу у фреквенцијском опсегу 1-5 kHz, услед чега се фотоакустичка мерења заснована на гас-микрофонској детекцији изводе у фреквенцијском опсегу 50 Hz-1 kHz. С обзиром да је ширина фреквенцијског опсега у коме се мерења врше од кључног значаја за примену фотоакустичког ефекта за термичку карактеризацију материјала, а да су теоријска истраживања показала да је за потпуну термичку карактеризацију танких узорака потребно вршити мерења у фреквенцијском опсегу ширине најмање три декаде, јасно је да је за примену фотоакустичких мерења за термичку карактеризацију танких узорака потребно унапредити технику фотоакустичких мерења. Као једна алтернатива се јавља развој микрофона са проширеним пропусним опсегом, док се кандидат определио за неконвенционалан приступ, који подразумева мерења фотоакустичког одзива у области где амплитудска карактеристика микрофона није константна. Овакав приступ се састоји у претходном експерименталном одређивању преносне функције фотоакустичког мерног система, која се затим користи да се на основу излазних сигнала, применом теорије система, реконструише фотоакустички одзив, који представља улаз фотоакустичког мерног система.

Приступ који је кандидат замислио је теоријски оправдан, јер је креативно искористио чињеницу да се зависност фотоакустичког одзива од модуларне фреквенције применом фреквенцијске фотоакустичке технике реализује као серија узастопних мерења у којима побуду представља хармонијски модулисани светлосни сигнал једне фреквенције. Дакле, иако се фреквенција модуларне мерења од мерења до мерења, фотоакустички мерни систем, у линеарној апроксимацији, преноси током сваког од мерења искључиво хармонијски сигнал једне фреквенције. Из тог разлога, сигнал који се

преноси фотоакустичким мерним системом током мерења не трпи дисторзију, већ само кашњење, а излазна амплитуда сигнала је пропорционална улазној. Ако се експерименталним путем одреди преносна функција мерног система, онда је на основу ње могуће познавати однос амплитуда излазног и улазног сигнала, као и фазно кашњење на фреквенцији побуде, па је заиста могуће мерењем излазног сигнала одредити улазни, односно фотоакустички сигнал за сваку од примењених модулационих фреквенцији. Предност приступа који је кандидат замислио се састоји у ниској цени фотоакустичког система, који не захтева употребу електричних компоненти високих перформанси. Са друге стране, овај приступ захтева експерименталну карактеризацију фотоакустичког мерног система, која није једноставан, нити стандардизован поступак.

У циљу развоја фотоакустичког мерног система са познатом преносном функцијом, кандидат је најпре пројектовао, а затим конструисао фотоакустички мерни систем. Концепција фотоакустичког мерног система који је кандидат пројектовао није нова, она се заснива на *open-ended* фотоакустичкој ћелији коју формира са једне стране микрофон, а са друге узорак који замењује поклопац микрофона. Узорак се осветљава са спољашње стране формиране фотоакустичке ћелије, а микрофон детектује фотоакустички сигнал који се емитује са супротне стране узорака. Основни недостатак ове конфигурације извора, узорака и детектора, која се назива трансмисионом, је низак интензитет фотоакустичког сигнала, који цео мерни систем чини веома осетљивим на шум. Са друге стране, ова концепција је једноставна и јефтина, па је стога веома популарна код истраживања фотоакустичког ефекта и најчешће се среће у литератури. Мада је концепција фотоакустичког мерног система који је кандидат развио позната, конструкција је оригинална, јер је у потпуности резултат рада кандидата, а посебно оригиналну ноту систему даје избор компоненти који је извршен тако да приоритет буде проширење мерног опсега, а не повећање осетљивости мерења, како је уобичајено случај. У том смислу, развијени фотоакустички мерни систем представља један од првих система који је у основи намењен термичкој карактеризацији танких узорака, чиме је кандидат успешно остварио први задатак постављен пред истраживање које је предмет докторске дисертације.

Експериментално одређивање преносне функције фотоакустичког мерног система у овој дисертацији представља први покушај одређивања преносне функције фотоакустичког мерног система уопште. Као припрему за експериментално одређивање преносне функције фотоакустичког мерног система кандидат је најпре теоријски размотрио све аспекте који могу да утичу на њу и убедљиво образложио да је могуће конструисати, а затим и конструисао, фотоакустички мерни систем чија је преносна карактеристика у акустичком фреквенцијском опсегу пропорционална преносној функцији микрофона. С обзиром да се на овом степену развоја фотоакустичка мерења не изводе ни у целом акустичком фреквенцијском опсегу, одлука кандидата да усмери проширење мерног опсега фотоакустичких мерења најпре на акустички фреквенцијски опсег, односно да експериментално одређивање преносне функције фотоакустичког мерног система сведе на експериментално одређивање преносне функције микрофона и, затим, експериментално одређивање појачања фотоакустичког мерног система у преносном опсегу, је оправдана.

У сврху експерименталног одређивања преносне функције микрофона, кандидат је истраживао методе засноване на побуди фотоакустичког мерног система белим шумом и *sweep*-сигналом, и то у окружењима анехоичне коморе и изоловане просторије. С обзиром да се при побуди белим шумом не може одредити фазно-фреквенцијска карактеристика микрофона, која у термичкој карактеризацији танких узорака може бити од великог значаја, коначна одлука кандидата да се експериментално одређивање преносне функције микрофона изврши *sweep*-сигналом је лако разумљива. Са друге стране, одлука да експериментално одређивање преносне функције микрофона изврши у акустички изолованој просторији, уместо у анехоичној комори, је донесена после дуготрајног истраживања и развијања експериментално верификоване мерне процедуре којом се омогућава добијање задовољавајућих резултата под одговарајућим условима. Узимајући у обзир ограничену доступност и велике трошкове изградње и одржавања анехоичне коморе, развој процедуре за експериментално одређивање преносне



функције микрофона у акустички изолованој просторији има практичан значај за даљи развој фотоакустичких система.

Приказани резултати показују да је кандидат успео да одреди амплитудско-фреквенцијску карактеристику микрофона који се користе у фотоакустичком мерном систему. Међутим, кандидат није успео да у раду развије поступак за експериментално одређивање фазно-фреквенцијске карактеристике микрофона, односно фазног кашњења фотоакустичког мерног система. Мада је на основу амплитудско-фреквенцијске карактеристике у принципу могуће реконструисати фазно-фреквенцијску карактеристику, такав поступак не представља потпуно експериментално одређивање преносне функције микрофона, односно фотоакустичког мерног система.

Кључне методе за примену фотоакустичког мерног система у термичкој карактеризацији су одређивање функције преноса у изолованој просторији и одређивање осетљивости и импедансе микрофона. Без информација о осетљивости и импеданси микрофона, не би било могуће израчунати појачање трансимпедансног појачача, који је примењен у овој дисертацији. Разлог примене ове врсте појачавача је мање појачање шума у односу на сигнал, за разлику од напонског појачавача који једнако појачава и шум и сигнал. Познавање вредности појачања трансимпедансног појачавача је неопходно за израчунавање нивоа микрофонских амплитудских карактеристика, који представља осетљивост микрофона. Осетљивост микрофона је неопходна због израчунавања амплитудских нивоа притиска, који су важни у покушају да се прошири фреквенцијски опсег и одреди топлотна проводност.

Међутим, као највећи проблем у приказаном истраживању се показало одређивање појачања фотоакустичког мерног система у преносном опсегу. Наиме, мада је кандидат успешно осмислио и реализовао процедуру за мерење осетљивости и излазне импедансе микрофона, узрок проблема је концепцијски, јер су у фотоакустичким мерним системима заснованим на *open-ended* фотоакустичкој ћелији димензије узорка велике у поређењу са димензијама простора у коме се простира акустички талас фотоакустичког одзива. Услед тога, акустичка рефлективност и акустичка изолациона моћ узорка, а посебно квалитет заптивања који се остварује између узорка и микрофона, имају значајан утицај на амплитуду акустичког притиска који микрофон детектује. С обзиром да претходно поменути фактори зависе од постављеног узорка, јасно је да појачање фотоакустичког система у преносном опсегу зависи од изабраног узорка, а посебно од начина на који је узорак постављен. Експериментална испитивања која је кандидат обавио потврђују овај закључак, јер су поновљена мерења на узорку који није уклањан са микрофона показала високу поновљивост, док су при мерењима која су обављана са истим узорком који је уклањан и поново постављен у мерни систем постојале значајне разлике амплитуде акустичког притиска.

Према томе, кандидат је успео да одреди амплитудско-фреквенцијску карактеристику развијеног фотоакустичког мерног система до нивоа мултипликативне константе која представља појачање фотоакустичког мерног система у преносном опсегу. Користећи поступак калибрације, кандидат је успео да на основу познавања амплитудско-фреквенцијске карактеристике фотоакустичког мерног система прошири мерни опсег примене фотоакустичког система за термичку карактеризацију на фреквенцијски опсег 1 kHz - 6 kHz, чиме је остварио и други задатак постављен пред докторску дисертацију.

На основу проширеног мерног опсега је омогућена примена развијеног фотоакустичког мерног система за одређивање топлотне дифузивности и коефицијента термичког ширења узорака, као и за истраживање резонанци топлотне меморије у узорцима материјала ниског степена уређења, као што су полимери и органска ткива. Неостварени задатак остаје мерење топлотне проводности (а тиме и специфичног топлотног капацитета) танких узорака, што би представљало потпуну термичку карактеризацију танких узорака. С обзиром да задатак потпуне термичке карактеризације танких узорака фотоакустичким техникама до сада није решен, резултати приказани у овој докторској дисертацији представљају корак у том правцу, у чему је њен несумњиви научни допринос.

#### 4.3 Верификација научних доприноса

Научни доприноси докторске дисертације Слободана Тодосијевића верификовани су следећим радовима:

Рад у истакнутом међународном часопису (M22):

[1] **Slobodan Z. Todosijevic**, Zlatan N. Soskic, Slobodanka P. Galovic, A combination of frequency photoacoustic and photoacoustic spectroscopy techniques for measurement of optical and thermal properties of macromolecular nanostructures, *Optical and Quantum Electronics*, 48, pp. 300, May 2016, DOI: 10.1007/s11082-016-0571-5, ISSN: 0306-8919, IF – 1.290.

Рад у међународном часопису (M23):

[1] **S. Todosijević**, Z. Šoškić, Z. Stojanović, and S. Galović. "Analysis of the Measurement System and Optimization of the Measurement Procedure for Detection of Thermal Memory Effects by Photoacoustic Experiments." *International Journal of Thermophysics* 38, no. 5 (2017): 72, doi: 10.1007/s10765-017-2215-9, ISSN 0195-928X, IF – 0.946

Рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком (M24):

[1] Šoškić Zlatan, Galović Slobodanka, Bogojević Nebojša, **Todosijević Slobodan**, Static Component Of Photothermal Response In Non-Transparent Samples, *Facta Universitatis: Series Electronics and Energetics*, Vol. 25, No. 3, 213-224, (2012), ISSN: 0353-3670.

Саопштења са међународних научних скупова штампана у целини (M33):

[1] Branko Radičević, Zoran Petrović, **Slobodan Todosijević**, Zvonko Petrović. Design of noise protection of industrial plantscase-Study of a plywood factory, 23rd National and 4th International Conference "Noise and Vibrations", Niš 17-19.October2012, pp. 71-75, ISBN: 978-86-6093-042-4.

[2] Bojan Tatić, Nebojša Bogojević, **Slobodan Todosijević**, Zlatan Šoškić, Analysis of noise level generated by helicopters with various numbers of blades in the main rotor, 23rd National and 4th International Conference "Noise and Vibrations", Niš 17-19.October2012, pp. 249-253, ISBN: 978-86-6093-042-4.

[3] **Slobodan Todosijević**, Slobodanka Galović, Jelena Tomić, Zlatan Šoškić, Application of Photoacoustic Techniques For Characterization Of Materials, 35 th International Conference on Production Engineering, Kraljevo-Kopaonik, 25-28 September 2013, pp.153-156, ISBN: 978-86-82631-69-9.

[4] **Slobodan Todosijević**, Slobodanka Galović, Jelena Tomić, Zlatan Šoškić, Developing model of a photoacoustic measurement system, Proceedings of the 8th International Conference Heavy Machinery HM 2014, Zlatibor, 24-26.06.2014, pp. G 45-50, ISBN: 978-86-82631-74-3.

[5] Jelena Tomić, Zlatan Šoškić, Nebojša Bogojević, **Slobodan Todosijević**, A simplified method for data processing of signals with heavy data transmission losses, The Eighth International Triennial Conference Heavy Machinery – HM2014, Zlatibor, June 25 - June 28 2014., pp. 55-59, ISBN: 978-86-82631-74-3.

[6] Nebojša Bogojević, Jelena Tomić, **Slobodan Todosijević**, Validation of railway vehicle model based on comparison of cumulative distribution functions, The Eighth International Triennial Conference Heavy Machinery – HM2014, Zlatibor, June 25 - June 28 2014., pp. 69-76, ISBN: 978-86-82631-74-3.

[7] Jelena Tomić, **Slobodan Todosijević**, Nebojša Bogojević, Zlatan Šoškić, Methodology for verification of software for noise attenuation calculation according to ISO 9613-2 standard, 24th International conference Noise and Vibration, Niš, October 29 - 31, 2014., pp. 27-33, ISBN: 978-86-6093-062-2.

[8] **Slobodan Todosijević**, Dejan Ćirić, Branko Radičević, Zlatan Šoškić, Experimental characterization of a photo-acoustic measurement system by Acquisition Cards with Non-synchronized Input and Output, Proceedings of 25th International Conference „Noise and Vibration“, Tara, 2016, ISBN: 978-86-6093-076-9, pp. 23-26.

[9] **Slobodan Todosijević**, Nenad Drvar, Zlatan Šoškić, Determination of Transfer Function of Photoacoustic System, Proceedings of IX International Conference "Heavy Machinery-HM 2017", Zlatibor, 28 June - 1 July 2017, pp. F.63-F.68, ISBN: 978-86-82631-89-7.

Саопштења са међународних научних скупова објављена у изводу (M34):

[1] **Slobodan Todosijević**, Zlatan Šoškić, Nebojša Bogojević, Dalibor Čevizović, Slobodanka Galović, Optically induced changes of thin film surface temperature, Book of abstracts, The 3rd ICOM, August 2012, Belgrade, Serbia, p.110, ISBN: 978-86-7306-116-0.

[2] **Slobodan Todosijević**, Zlatan Šoškić, Nebojša Bogojević, Dalibor Čevizović, Slobodanka Galović, Effects of optical beam multiple reflections to photothermal response- correction factor, Book of abstracts, The Eleventh Young Researchers' Conference, Belgrade, December 3- 5, 2012, p. 68 ISBN: 978-86-7306-122-1.

Радови објављени у водећем часопису националног значаја (M51):

[1] J. Tomić, **S. Todosijević**, B. Radičević, Z. Šoškić, Calculation of Noise Field in an Urban Area close to a Traffic Overpass-Case Study, Applied Mechanics and Materials, Vol. 801, pp. 60-65, Oct. 2015, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.801.60, ISSN: 1662-7482.

[2] Jelena Tomić, **Slobodan Todosijević**, Nebojša Bogojević, Zlatan Šoškić, Methodology for Verification of Software for Noise Attenuation Calculation according to ISO 9613-2 Standard, Facta Universitatis, Series Working and Living Environmental Protection, Vol. 12, No.1, pp. 29-38, 2015, ISSN: 0354-804X

Радови објављени у часопису националног значаја (M52):

[1] Nebojša Bogojević, Jelena Tomić, **Slobodan Todosijević**, Validacija modela železničkog vozila bazirana na poređenju CDF funkcija signala, IMK-14 – Istraživanje i razvoj u teškoj mašingradnji 21(2015)2, SR53-60, UDC 621 ISSN: 0354-6829.

Радови у зборницима научних скупова од националног значаја (M63):

[1] М. Нешић, С. Галовић, **С. Тодосијевић**, З. Шошкић, Стационарни фототермални ефекат: утицај вишеструких рефлексција, Зборник радова, XII Конгрес физичара Србије, 28. Април – 2. Мај 2013, Врњачка Бања, Србија: 325 – 328, Издавач: COBISS.SR-ID 198025740, 2013, ISBN: 978-86-86169-08-2.

Техничка решења (M83):

[1] Zoran Petrović, Miomir Vukićević, Branko Radičević i Mišo Bjelić, Aleksandra Petrović, **Slobodan Todosijević**, "Reverberaciona komora", 2012, Kraljevo, Srbija.

## 5. Закључак и предлог

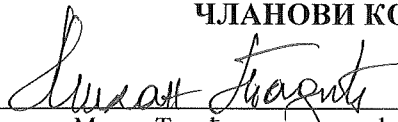
На основу чињеница изложених у овом реферату, Комисија је закључила да докторска дисертација Слободана Тодосијевића под насловом „Развој фотоакустичког мерног система за термичку карактеризацију танких узорака“ испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Дисертација представља развој фотоакустичког система за термичку карактеризацију танких узорака. С обзиром да је ширина опсега примењених модулационих фреквенци од кључне важности за термичку карактеризацију танких узорака, основу примене развијеног фотоакустичког мерног система за термичку карактеризацију танких узорака чини експериментално одређивање његове амплитудско-фреквентне карактеристике. На основу познавања амплитудско фреквентне карактеристике, мерни опсег, који уобичајено износи до 1 kHz, је проширен до 5 kHz. На путу развоја оваквог мерног система, кандидат је поставио теоријску основу за његов развој, пројектовао све компоненте система, развио експерименталне процедуре за карактеризацију и извршио верификацију развијеног система поређењем са теоријским резултатима и мерењима извршеним референтним мерним системом. Развијеним мерним системом омогућава се недеструктивно и бесконтактно одређивање топлотне дифузивности и коефицијента термичке експанзије танких узорака, а проширени опсег модулационих фреквенци омогућава истраживања резонанци топлотне меморије у материјалима са ниским степеном уређења.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „Развој фотоакустичког мерног система за термичку карактеризацију танких узорака“ кандидата Слободана Тодосијевића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 25.9.2017.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



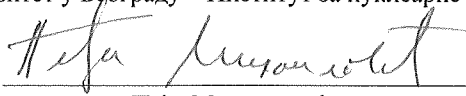
др Милан Тадић, редовни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Слободанка Галовић, научни саветник

Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке "Винча"



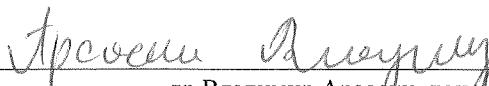
др Пеђа Михаиловић, ванредни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Златан Шошкић, редовни професор

Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву  
Универзитета у Крагујевцу



др Владимир Арсошки, доцент

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет