

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Иване М. Јокић.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 931/3 од 27.01.2016. год., донетом на 795. седници одржаној 19.01.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Иване М. Јокић под насловом

### **"Адсорпционо-десорпциони шум и временски одзив МЕМС хемијских и биолошких сензора"**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала, као и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат је тему под насловом **"Адсорпционо-десорпциони шум и временски одзив МЕМС хемијских и биолошких сензора"** пријавио 08.01.2014. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је Одлуком бр. 931/1 од 21.01.2014. године именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Мирослав Ј. Дукић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Зоран Ђурић, научни саветник, редовни члан САНУ (Институт техничких наука САНУ), др Јован Радуновић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет) и др Предраг Иваниш, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације је усвојен на седници Наставно-научног већа ЕТФ одржаној 25.02.2014. године. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предложену тему докторске дисертације на седници одржаној 31.3.2014. године.

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 29.12.2015. године, а Наставно-научно веће ЕТФ је на 795. седници одржаној 19.01.2016. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: др Зоран Ђурић, научни саветник, редовни члан САНУ (Институт техничких наука САНУ), др Предраг Иваниш, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Петар Матавуљ, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Мирослав Дукић, редовни професор (Универзитет Сингидунум – Факултет за информатику и рачунарство) и др Владимир Арсоки, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Кандидат је дана 04.09.2013. године одбранио магистарску тезу на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада научној области Техничких наука – електротехнике, а у ужем смислу научној области Физичка електроника, која обухвата тематику направа израђених применом технологија микроелектромеханичких система (МЕМС). За ове области матичан је Електротехнички факултет. Именовани ментор дисертације је др Зоран Ђурић, академик САНУ, научни саветник Института техничких наука САНУ, због значајних научних доприноса у области теме докторске дисертације, како у широј области МЕМС направа и технологија, тако и у специфичној области адсорпционих хемијских и биолошких МЕМС сензора и флукуационих процеса код МЕМС направа, којом се бави предметна дисертација.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Ивана М. Јокић је рођена 30.07.1972. год. у Београду, где је завршила основну школу, а затим и Математичку гимназију. Електротехнички факултет Универзитета у Београду завршила је на Одсеку за електронику, телекомуникације и аутоматику – смер Телекомуникације, са просечном оценом свих положених испита 9.23. Дипломски рад одбранила је 2000. године. Ивана Јокић је завршила последипломске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Телекомуникације, са просечном оценом 10.00 свих положених испита. Магистарски рад чији је наслов "Примена МЕМС компоненти у бежичним телекомуникационим системима и утицај адсорпционо-десорпционих процеса на перформансе резонантних РФ МЕМС компоненти" одбранила је 2013. године.

Од априла 2001. године ради као истраживач у Институту за хемију, технологију и металургију - Центар за микроелектронске технологије, Универзитета у Београду. Научноистраживачка делатност Иване Јокић припада области микроелектромеханичких система (МЕМС) и наноелектромеханичких система (НЕМС), намењених за реализацију нове генерације сензора и сензорских мрежа са бежичном комуникацијом, као и високофреквенцијских резонатора за примену у бежичним телекомуникационим системима. Учествовала је у реализацији већег броја истраживачких пројеката које је финансирало Министарство Републике Србије надлежно за област науке и технолошког развоја у периоду 2001-2016. године, као и међународних пројеката финансираних од стране Европске Уније и Швајцарске националне фондације за науку. Ивана Јокић је тренутно ангажована на националном пројекту "Микро, нано-системи и сензори за примену у електропривреди, процесној индустрији и заштити животне средине" (ТР32008), у оквиру којег руководи реализацијом једног подпројекта.

Током студијског боравка на факултету ЕПФЛ у Лозани (Швајцарска) 2011. године учествовала је у истраживањима из области микросистемских технологија и похађала курс за рад у чистој соби у једном од водећих центара за израду и карактеризацију микро- и наноструктура при универзитетима у Европи. Ивана Јокић је завршила обуку за рад на АФМ (*Atomic Force Microscope*) уређају нове генерације за карактеризацију електричних, магнетских, механичких и морфолошких параметара микро- и наноструктура, као и обуку за рад на уређају за ласерску фотолитографију, који се користи у Центру за микроелектронске технологије у процесу израде МЕМС сензора и других компоненти.

Ивана Јокић је првопотписани аутор четири рада у међународним часописима са импакт фактором, коаутор још 11 радова у међународним часописима са импакт фактором и 5 радова у међународним научним часописима. Одржала је једно предавање по позиву на конференцији међународног значаја. Такође је аутор или коаутор једног рада у часопису националног значаја, 45 радова на међународним и 11 на националним конференцијама из области микроелектронике, МЕМС-а, нанотехнологија и телекомуникација. Аутор је или коаутор 13 техничких решења. Добитник је награде за најбољи рад младих аутора на 47. Конференцији ЕТРАН (Секција за микроелектронику и оптоелектронику). Рецензент је часописа *Sensors and Actuators A: Physical* (из категорије врхунских међународних часописа).

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **2.1. Садржај дисертације**

Дисертација је написана на 282 стране куцаног текста и садржи 46 слика, две табеле и 195 библиографских референци. Дисертација садржи насловну страну, кратак резиме на српском и енглеском језику, садржај, 6 поглавља и списак коришћене литературе. Наслови поглавља докторске дисертације су:

1. Увод,
2. МЕМС хемијски и биолошки сензори засновани на адсорпцији,
3. Временски одзив хемијских и биолошких МЕМС сензора заснованих на адсорпцији,
4. Адсорпционо-десорпциони шум хемијских и биолошких МЕМС сензора,
5. Примене теоријских модела временског одзива и АД шума МЕМС и НЕМС хемијских и биолошких сензора и њихов практични значај,
6. Закључак.

### **2.2. Кратак приказ појединачних поглавља**

У уводном поглављу изложени су предмет, циљ и значај истраживања приказаних у дисертацији. Описане су карактеристике хемијских и биолошких сензора израђених технологијама микроелектромеханичких система (МЕМС), које их чине погодним за бројне примене у заштити животне средине, пољопривреди, медицини и одбрани, и због којих су истраживања у овој области веома актуелна у свету. Као главни циљ истраживања наведен је развој теорија временског одзива и адсорпционо-десорпционог (АД) шума ових сензора. Објашњен је значај ових теорија за развој нове генерације сензора унапређених перформанси (веће осетљивости и брзине одзива, боље селективности, нижег прага детекције), као и за развој нових мерних метода. Наглашен је недостатак систематичних и свеобухватних истраживања ове тематике у постојећој литератури, што посебно важи за теоријску анализу АД шума, који је код предметног типа сензора неизбежан, а код сензора са структурама микрометарских и нанометарских димензија може да буде доминантно ограничење за минимални детектабилни сигнал и друге перформансе, а тиме и за практичну примену сензора. Уводно поглавље такође садржи опис плана и научних метода истраживања по фазама, а затим и приказ структуре дисертације, са кратким садржајем поглавља.

У другом поглављу су представљени МЕМС хемијски и биолошки сензори засновани на адсорпцији. Прво је дат приказ МЕМС технологија и технологија наноелектромеханичких система (НЕМС), а затим су уведени основни појмови о адсорпционим процесима. У овом поглављу су такође описане главне функционалне компоненте МЕМС сензора, објашњен је принцип рада и дата њихова класификација. Дефинисани су основни параметри сензора и наведене предности минијатуризације у погледу перформанси и нових примена сензора.

Тема трећег поглавља је временски одзив адсорпционих МЕМС хемијских и биолошких сензора. На почетку је дат сажет преглед литературе из области теоријске анализе временског одзива ове врсте сензора. Указано је на потребу за детаљнијим моделима временског одзива од постојећих, који би истовремено обухватили већи број процеса од утицаја, као и на недостатак систематског приступа у анализи. Наставак поглавља приказује теоријско разматрање, дефинисање и систематизацију математичко-физичких модела временског одзива МЕМС адсорпционих сензора, са теоријским резултатима који су допринос аутора дисертације. Полазећи од формулисања општег математичко-физичког модела временског одзива у случајевима једнокомпонентне и вишекомпонентне адсорпције, развијени су модели који узимају у обзир процесе од интереса у различитим случајевима од

практичног значаја, карактеристичним за МЕМС адсорпционе сензоре. Дефинисани су услови при којима је оправдана примена апроксимативних модела.

Четврто поглавље се бави теоријом адсорпционо-десорпционог шума МЕМС хемијских и биолошких сензора. Прво је дат преглед теоријских резултата у области АД шума МЕМС направа, који су приказани у литератури, а затим и преглед експерименталних резултата који су показали да АД шум може бити доминантан у односу на друге врсте шума код микро- и наносензора. Закључено је да постојеће теорије АД шума најчешће узимају у обзир само појединачне феномене у вези са флукуацијама броја адсорбованих честица, што ограничава њихову применљивост на малобројне, идеализоване ситуације. Преглед литературе је такође показао да су флукуације броја адсорбованих честица услед спреге процеса битних за формирање одзива сензора разматране у веома малом броју радова и да су аналитички теоријски резултати у тим случајевима изузетно ретки (аналитички израз за спектралну густину средње снаге (СГСС) флукуација броја адсорбованих честица услед спреге процеса приказан је само у једном раду, а односи се на врло поједностављену ситуацију). Поглавље 4 у наставку садржи детаљан приказ развоја теорије АД шума сензора, која је оригинални допринос аутора дисертације. За статистичку анализу стохастичке компоненте одзива сензора, која потиче од флукуација броја адсорбованих честица, коришћени су приступ статистичке теорије Марковљевих случајних процеса заснован на мастер једначини и приступ заснован на Ланжевеновој једначини. Као најважнији резултати, изведени су изрази за СГСС флукуација броја адсорбованих честица у случају једнокомпоненте адсорпције и одређена је матрица спектралних и кроспектралних густина средње снаге вишеккомпонентног случајног процеса. Ови резултати су омогућили добијање аналитичког израза за СГСС АД флукуација одзива сензора. И у случају једнокомпонентне и у случају вишеккомпонентне адсорпције уведене су апроксимације које проширују применљивост изведених теоријских резултата на нелинеарне случајне процесе, што је кључно за добијање аналитичких израза за СГСС АД шума који потиче од спреге АД процеса и других процеса који утичу кинетику промене броја адсорбованих честица. Такође су дефинисани критеријуми за важење ових резултата. У последњој целини четвртог поглавља приказана је примена поменутих теоријских резултата на развој модела АД шума у случајевима од практичног значаја код МЕМС сензора гасова и биосензора. Ови модели поред АД процеса циљних честица узимају у обзир и друге физичке процесе који утичу на случајне флукуације одзива сензора, као и спрегу већег броја таквих процеса. У свим анализираним случајевима добијени су аналитички изрази за СГСС АД шума. Критеријуми за важење резултата заснованих на уведеним апроксимацијама изражени су у функцији параметара система.

У петом поглављу су приказани резултати истраживања квалитативног и квантитативног утицаја различитих процеса, параметара сензора и експерименталних услова на временски одзив и АД шум МЕМС/НЕМС хемијских и биолошких сензора. Та истраживања су заснована на примени теоријских модела и аналитичких израза, чији је развој приказан у трећем и четвртог поглављу дисертације. Анализа је обухватила практичне случајеве карактеристичне за микро- и наносензоре који се користе за детекцију супстанци у гасовитим или течним узорцима, а који се разликују по процесима битним за генерисање одзива сензора и његових флукуација. Применом рачунарских симулација и теоријски дефинисаних критеријума потврђена је испуњеност услова за примену апроксимативних модела у широком распону вредности параметара система. Детаљном дискусијом приказаних резултата указано је на израженост појединих утицаја, а такође на практични значај теоријских модела временског одзива и АД шума за развој нове генерације МЕМС/НЕМС сензора, за правилну интерпретацију мерних резултата и за побољшање постојећих и развој нових метода детекције и идентификације супстанци, које су засноване на анализи флукуација одзива сензора у фреквенцијском домену.

У шестом поглављу дисертације изложени су закључци истраживања, описан је научни допринос рада и предложени су правци будућег истраживања.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација се бави научно актуелном облашћу МЕМС хемијских и биолошких сензора. Адсорпциони МЕМС сензори хемијских супстанци и биолошких агенаса погодни су за бројне нове примене, за које постоји велики интерес у савременом свету, као што су брза детекција штетних материја на лицу места преносивим сензорима, надзор параметара животне средине применом бежичних сензорских мрежа или персонализована медицинска дијагностика. Зато је разумљиво што се у водећим истраживачким центрима врше интензивна истраживања у области МЕМС хемијских и биолошких сензора, а онедавно и наносензора који су део микросистема, са циљем да се у што ближеј будућности искористи њихов велики потенцијал у практичним применама. Потврда актуелности теме је растући број научних публикација из ове области по години у водећим међународним часописима, као и настанак нових часописа и међународних конференција посвећених проблематици микро- и наносензора.

Од посебног интереса за развој МЕМС хемијских и биолошких сензора оптимизованих перформанси је анализа физичких процеса и феномена, као што су адсорпција и десорпција, који су у основи рада сензора и имају утицај на њихову осетљивост, селективност и брзину одзива. Додатни значај анализе ових процеса је у томе што су они извор фундаменталног адсорпционо-десорпционог шума који код структура микрометарских и нанометарских димензија може доминантно да одређује вредност минималног детектабилног сигнала сензора. Са савременим трендом развоја микро- и наносензора анализа АД процеса и шума зато постаје све значајнија и актуелнија. Побољшање перформанси сензора који раде са сложеним узорцима (пре свега, селективности и доње границе детектабилних концентрација циљне супстанце), тачнија интерпретација мерних резултата и истраживање и развој нових мерних метода које пружају више информација о адсорбованој супстанци или о већем броју супстанци истовремено, од великог су практичног значаја за област адсорпционих микро- и наносензора, а у њиховој основи су теоријски модели временског одзива и АД шума сензора. Из наведеног проистиче актуелност истраживања приказаних у дисертацији.

Систематична и свеобухватна истраживања временског одзива и АД шума МЕМС адсорпционих сензора нису била раније извршена, па у објављеној литератури нема теоријских модела који узимају у обзир све релевантне чиниоце, а неопходни су у процесу развоја и оптимизације сензора и експерименталних метода. Оригиналност истраживања и резултата приказаних у дисертацији остварена је развојем и систематизацијом математичко-физичких модела временског одзива и АД шума МЕМС хемијских сензора и биосензора, а затим и применом тих модела за детаљну анализу зависности одзива и АД шума од параметара различитих процеса, сензорског система и експерименталних услова. Полазећи од формулисања општих модела, истраживања су резултовала развојем унапређених и нових модела временског одзива и АД шума, који узимају у обзир физичке процесе од интереса у различитим случајевима од практичног значаја, карактеристичним за адсорпционе МЕМС сензоре и наносензоре. Модели који обухватају спрегу већег броја процеса свеобухватнији су од приказаних у раније објављеној литератури. Изведени аналитички изрази за СГСС АД шума, који су оригинални резултат дисертације, омогућили су да први пут буде извршена квантитативна и квалитативна анализа АД шума у вишедимензионом простору параметара. Дискусија резултата анализе пружила је нова сазнања о АД шуму и кинетици одзива адсорпционих сензора. Она је указала и на значај развијених теоријских модела за развој сензора оптимизованих перформанси и нових мерних метода.

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

Кандидат је детаљно истражио постојећу литературу у вези са темом дисертације и коректно навео радове који пружају увид у актуелно стање у научној области дисертације, као и радове чији су резултати коришћени током истраживања и израде дисертације. Укупно је наведено 195 библиографских референци. Наведена литература садржи најновије радове релевантне за област истраживања којом се бави дисертација. Кандидат је аутор или коаутор 28 цитираних радова.

### **3.3. Опис и адекватност примењених научних метода**

Истраживања у оквиру докторске дисертације реализована су применом следеће методологије:

- систематско проучавање доступне литературе о МЕМС хемијским и биолошким сензорима, како би се стекао увид у актуелно стање у научној области дисертације; посебна пажња посвећена је анализи радова који се баве временским одзивом адсорпционих микро- и наносензора и АД шумом МЕМС и НЕМС направа,
- развој и систематизација теоријских знања о временском одзиву МЕМС сензора заснованих на реверзибилној адсорпцији (формирање општих теоријских модела за случајеве једнокомпонентне и вишекомпонентне адсорпције, а затим и модела који узимају у обзир процесе битне за генерисање одзива у различитим случајевима од практичног значаја),
- примена аналитичких и нумеричких метода, као и рачунарских симулација, за анализу временског одзива сензора у датим случајевима, полазећи од добијених теоријских резултата,
- развој нових и унапређених теоријских модела АД шума коришћењем приступа статистичке теорије Марковљевих случајних процеса заснованог на мастер-једначини и приступа заснованог на Ланжевеновој стохастичкој једначини, за различите случајеве од практичног значаја,
- квалитативна и квантитативна анализа утицаја различитих процеса, параметара сензорског система и експерименталних услова на АД шум сензора, коришћењем изведених аналитичких израза за СГСС АД шума у различитим случајевима, карактеристичним за микро- и наносензоре који се користе за детекцију супстанци у гасовитим или течним узорцима,
- коришћење рачунарских симулација за проверу испуњености услова за примену апроксимативних модела АД шума,
- приказ и дискусија постигнутих резултата, укључујући поређење са експерименталним резултатима из постојеће литературе, као и разматрање практичних примена резултата истраживања.

Примењене научне методе одговарају стандардима научно-истраживачког рада. Оне су сасвим у складу са циљевима који су дефинисани на почетку израде дисертације и који су у потпуности испуњени њеном изградом.

### **3.4. Применљивост остварених резултата**

Резултати остварени у оквиру дисертације значајан су допринос теоријској основи неопходној за разумевање функционисања и развој нове генерације МЕМС хемијских и биолошких сензора.

Развијени математички модели временског одзива и АД шума адсорпционих МЕМС сензора су свеобухватнији од раније постојећих и односе се на већи број практично значајних случајева који су карактеристични за сензоре гасова и биосензоре. Они пружају детаљнији увид у зависности одзива и шума, а тиме и параметара сензора као што су осетљивост, минимални детектабилни сигнал и брзина одзива, од бројних параметара система. Познавање ових зависности омогућује оптимизацију дизајна сензора и експерименталних метода, којом се постиже унапређење перформанси и шири област практичне примене МЕМС хемијских и биолошких сензора. Развијени теоријски модели омогућују да се процена параметара сензора изврши током пројектовања сензорског система и планирања експеримента, што доприноси економичности и бржем развоју микро/наносистема оптималних перформанси.

Резултати истраживања извршених у оквиру дисертације омогућују правилну интерпретацију мерних резултата и побољшање постојећих мерних метода. Значајна је њихова применљивост за развој нових метода, заснованих на анализи флукуација сигнала у фреквенцијском домену, које омогућују добијање већег броја података о адсорбованим супстанцама и њиховој интеракцији са сензорским елементом од конвенционалних метода. Међу новим методама су посебно интересантне оне за идентификацију и детекцију супстанце у сложеном узорку, затим методе за истовремену детекцију већег броја супстанци у једном узорку, као и методе са инхерентном селективношћу, које омогућују детекцију већег броја супстанци једним нефункционализованим сензором.

Практична примена резултата се очекује код преносивих хемијских и биолошких сензора за брзу детекцију супстанци на лицу места, код бежичних мрежа за надзор параметара животне средине заснованих на МЕМС сензорима и у области персонализоване медицинске дијагностике. Поред наведеног, сви поменути резултати имају шири значај, јер су, осим код МЕМС сензора, применљиви и код других хемијских и биолошких сензора заснованих на адсорпцији, као и код других МЕМС направа (нпр. радиофреквенцијских резонатора и осцилатора).

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

Кандидат је приликом израде дисертације показао способност за препознавање научно актуелних тема и у оквиру њих отворених питања која је неопходно истражити. Такође је показао систематичност у раду, као и зрелост при анализи и решавању проблема. Доприноси дисертације су оригинални, савремени и значајни за веома актуелну област хемијских и биолошких микро- и наносензора, као и других МЕМС/НЕМС направа, и потврђују способност кандидата за самосталан научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### **4.1. Приказ остварених научних доприноса**

Кандидат је израдом дисертације остварио оригиналне научне доприносе на следеће начине:

1. Развојем нових и унапређених математичко-физичких модела временског одзива МЕМС и НЕМС хемијских и биолошких адсорпционих сензора и њиховом систематизацијом
  - Формулисани су општи модели временског одзива за случајеве једнокомпонентне и вишекомпонентне адсорпције.
  - Развијени су математички модели специфични за различите практичне случајеве једнокомпонентне и вишекомпонентне адсорпције, који су карактеристични за микро- и наносензоре, а у којима је оправдано занемарити ефекте појединих процеса или увести апроксимације при разматрању спреге више процеса. Одређени су услови за примену апроксимативних модела.

- Нови и унапређени математичко-физички модели временског одзива сензора развијени у оквиру дисертације односе се на следеће случајеве: уопштена вишеслојна адсорпција, једнослојна адсорпција произвољног броја супстанци, конкурентска адсорпција произвољног броја супстанци спрегнута са преносом масе и адсорпција у спрези са транспортним процесима у цилиндричној реакционој комори. Такође је уведен модел два одељка за произвољан број супстанци.
2. Развојем, унапређењем и систематизацијом теоријских модела адсорпционо-десорпционог шума МЕМС и НЕМС хемијских и биолошких сензора
- Детаљно је приказана статистичка теорија једнокомпонентних и вишекомпонентних случајних процеса добитака и губитака, који представљају случајан број адсорбованих честица код једнокомпонентне адсорпције, одн. случајан вектор чији су елементи бројеви адсорбованих честица стохастичких компоненти сложеног АД процеса код вишекомпонентне адсорпције. Уведене су апроксимације којима је проширена применљивост изведених теоријских резултата (од којих је најважнији аналитички израз за СГСС АД флукуација одзива сензора) на нелинеарне случајне процесе, што је омогућило добијање израза за СГСС АД шума који потиче од спреге АД процеса са процесима преноса масе. Дефинисани су услови за примену ових апроксимативних решења.
  - Изведени су аналитички изрази за СГСС АД шума за различите случајеве који одговарају карактеристичним применама МЕМС сензора гасова и биосензора, а разликују се по процесима битним за генерисање одзива и његових флукуација. Обухваћени су случајеви у којима се разматрају заједнички ефекти АД процеса и већег броја других процеса. Критеријуми за важење решења заснованих на уведеним апроксимацијама изражени су у функцији параметара сензорског система.
  - Изведени аналитички изрази за СГСС АД шума први су теоријски резултати у следећим практично значајним случајевима: вишеслојна адсорпција према БЕТ и према уопштеном БЕТ моделу, једнокомпонентна адсорпција спрегнута са преносом масе код сензора са микрофлуидичком комором, конкурентска адсорпција произвољног броја супстанци у спрези са транспортним процесима, АД процес спрегнут са запреминским преносом масе и површинском дифузијом. Сваки од изведених теоријских резултата је важан корак ка комплетној теорији АД шума МЕМС и НЕМС хемијских и биолошких сензора.
3. Квалитативном и квантитативном анализом утицаја геометријских параметара сензора, експерименталних услова и параметара процеса од значаја на временски одзив и СГСС АД шума
- Извршена је детаљна анализа у различитим случајевима који одговарају реалним применама сензора, каква није раније приказана у литератури. Анализа се заснива на примени развијених теоријских модела, а проистеклим закључцима је унапређено знање о АД шуму и кинетици одзива сензора и указано на практичне примене теоријских резултата.

#### **4.2. Критичка анализа резултата истраживања**

Научни резултати остварени израдом дисертације припадају веома актуелној области МЕМС хемијских и биолошких сенора.

Математички модели временског одзива и АД шума сензора развијени су за велики број практично значајних случајева који нису разматрани у раније постојећој литератури, иако су карактеристични за МЕМС и НЕМС хемијске и биолошке сензоре. Нови и унапређени модели су свеобухватнији у односу на раније постојеће, јер узимају у обзир већи број физичких процеса који утичу на временски одзив и његове флукуације. Развијени модели су затим коришћени за квалитативну и квантитативну анализу утицаја бројних параметара



сензорског система на одзив и АД шум сензора, која такође у објављеној литератури није била приказана. Анализа је дала нова сазнања о изражености појединих утицаја и њихове спреге, а такође је указала на практичну применљивост теоријских резултата.

Резултати добијени анализом зависности временског одзива од параметара система применљиви су за развој сензора унапређених перформанси, побољшање постојећих и развој нових мерних метода заснованих на анализи временског одзива сензора и правилну интерпретацију мерних резултата. Резултати извршених анализа СГСС АД шума указали су на применљивост изведених теоријских израза за развој нових метода детекције и идентификације супстанци на основу анализе шума у фреквенцијском домену.

Увидом у циљеве истраживања, најављене очекиване резултате и остварене резултате констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва значајна питања из проблематике која је анализирана у дисертацији. Констатујемо да је детаљан и систематичан приступ истраживаној проблематици резултовао већим бројем оригиналних резултата којима је унапређено научно знање у односу на постојеће и који омогућују нове практичне примене.

#### **4.3. Верификација научних доприноса**

У току истраживачког рада у области теме докторске дисертације кандидат Ивана М. Јокић је објавила 12 радова у међународним часописима са SCI листе (од тога четири рада као првопотписани аутор), затим три рада у научним часописима и један рад у националном часопису. Поред тога, одржала је једно предавање по позиву на конференцији међународног значаја и презентовала 37 радова на међународним и 11 радова на националним конференцијама.

Избор објављених радова:

##### Категорија M21:

1. **Jokić, I.**, Djurić, Z., Frantlović, M., Radulović, K., Krstajić, P., Jokić, Z.: Fluctuations of the number of adsorbed molecules in biosensors due to stochastic adsorption-desorption processes coupled with mass transfer, - *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 166-167, pp. 535–543, 2012 (**IF=3.535**) (ISSN 0925-4005).
2. Djurić, Z., **Jokić, I.**, Djukić, M., Frantlović, M.: Fluctuations of the adsorbed mass and the resonant frequency of vibrating MEMS/NEMS structures due to multilayer adsorption, - *Microelectronic Engineering*, vol. 87, pp. 1181-1184, 2010 (**IF=1.575**) (ISSN 0167-9317).
3. Djurić, Z., **Jokić, I.**, Frantlović, M.: Analysis of transient adsorption processes using micro/nanocantilever oscillators, - *Microelectronic Engineering*, vol. 85, pp. 1386–1389, 2008 (**IF=1.583**) (ISSN 0167-9317).
4. Djurić, Z., **Jokić, I.**, Frantlović, M., Jakšić, O.: Fluctuations of the number of particles and mass adsorbed on the sensor surface surrounded by a mixture of an arbitrary number of gases, - *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 127, pp. 625-631, 2007 (**IF=2.934**) (ISSN 0925-4005).
5. Djurić, Z., **Jokić, I.**: Thermomechanical noise of nanooscillators with time-dependent mass, - *Microelectronic Engineering*, vol. 84, pp. 1639-1642, 2007 (**IF=1.503**) (ISSN 0167-9317).

##### Категорија M22:

1. **Jokić, I.**, Djurić, Z., Frantlović, M., Radulović, K., Krstajić, P.: Fluctuations of the mass adsorbed on microcantilever sensor surface in liquid-phase chemical and biochemical detection, - *Microelectronic Engineering*, vol. 97, pp. 396–399, 2012 (**IF=1.224**) (ISSN 0167-9317).

2. Djurić, Z., Jokić, I., Frantlović, M., Radulović, K.: Two-layer adsorption and adsorbed mass fluctuations on micro/nanostructures, - *Microelectronic Engineering*, vol. 86, pp. 1278-1281, 2009 (IF=1.488) (ISSN 0167-9317).

#### Категорија M23:

1. Jokić, I., Frantlović, M., Djurić, Z., Radulović, K., Jokić, Z.: Adsorption-desorption noise in microfluidic biosensors operating in multianalyte environments, - *Microelectronic Engineering*, vol. 144, pp. 32-36, 2015 (IF=1.197) (ISSN 0167-9317).
2. Jokić, I., Djurić, Z., Radulović, K., Frantlović, M.: Fluctuations of the number of adsorbed micro/nanoparticles in sensors for measurement of particle concentration in air and liquid environments, - *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 21, no. 1-2, pp. 141-147, 2015 (IF=0.892) (ISSN 1451-9372).
3. Djurić, Z., Jokić, I., Peleš, A.: Fluctuations of the number of adsorbed molecules due to adsorption-desorption processes coupled with mass transfer and surface diffusion in bio/chemical MEMS sensors, - *Microelectronic Engineering*, vol. 124, pp. 81-85, 2014 (IF=1.197) (ISSN 0167-9317).

#### Категорија M31:

1. Jokić, I., Frantlović, M., Djurić, Z.: "RF MEMS and NEMS Components and Adsorption-Desorption Induced Phase Noise," - *Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics MIEL 2014*, Belgrade, Serbia, May 12-15 2014, pp. 117-124 (Invited keynote lecture).

#### Категорија M33:

1. Jokić, I., Radulović, K., Frantlović, M., Djurić, Z., Cvetanović, K., Rašljčić, M.: "Analysis of Reversible Adsorption in Cylindrical Micro/Nanofluidic Channels for Analyte Sensing and Sample Dilution Applications," - *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2015*, Silver Lake, Serbia, June 8 - 11 2015, pp. MOI2.3.1-6.
3. Djurić, Z., Jokić, I., Peleš, A.: "Highly Sensitive Graphene-based Chemical and Biological Sensors with Selectivity Achievable Through Low-frequency Noise Measurement – Theoretical Considerations," – *Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics MIEL 2014*, Belgrade, Serbia, May 12-15 2014, pp. 153-156.
5. Jokić, I., Radulović, K., Vasiljević-Radović, D.: "Detection of target substances using affinity-based MEMS/NEMS sensors: A problem of selectivity," – *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2012*, Belgrade, Serbia, September 18-19 2012, pp. 398-401.
6. Jokić, I., Frantlović, M., Djurić, Z., Dukić, M.: "Adsorption-Desorption Phase Noise in RF MEMS/NEMS Resonators," – *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services TELSIKS 2011*, Niš, Serbia, October 5-8 2011, pp. 114-117.

#### Категорија M72:

1. Јокић, И.: "Примена МЕМС компоненти у бежичним телекомуникационим системима и утицај адсорпционо-десорпционих процеса на перформансе резонантних РФ МЕМС компоненти", Магистарски рад, Електротехнички факултет Универзитета у Београду, 2013, ментор проф. др Мирослав Ј. Дукић.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата мр Иване М. Јокић под насловом "Адсорпционо-десорпциони шум и временски одзив МЕМС хемијских и биолошких сензора" написана је у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који се захтевају важећим Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Главни циљ дисертације био је развој и унапређење теоријске основе неопходне за пројектовање МЕМС/НЕМС хемијских и биолошких сензора нове генерације. Он је у потпуности испуњен изработом дисертације. Оригинални научни доприноси остварени су развојем нових теорија временског одзива и адсорпционо-десорпционог (АД) шума сензора, које су неопходан алат за оптимизацију перформанси сензорског система и мерних метода у фази пројектовања ових направа и планирања експеримената. Закључци проистекли из приказане анализе омогућили су нова знања у научној области дисертације и указали на практичне примене теоријских резултата за развој нових мерних метода, већих могућности у односу на постојеће.

Резултате истраживања у вези са темом докторске дисертације кандидат је објавио у већем броју научних публикација и презентовао стручној јавности у виду саопштења на конференцијама од међународног и националног значаја.

На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија констатује да дисертација кандидата мр Иване М. Јокић садржи оригиналне научне доприносе, који имају велики практични значај за развој нове генерације адсорпционих хемијских и биолошких микро- и наносензора.

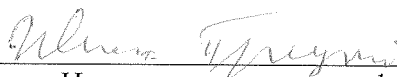
На основу претходног, Комисија констатује да је кандидат мр Ивана М. Јокић, дипломирани инжењер електротехнике, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да се овај реферат прихвати, и у складу са законском процедуром упуту Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

Београд, 09.03.2016. год.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Зоран Ђурић, академик, научни саветник  
Институт техничких наука САНУ



др Предраг Иваниш, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Петар Матавуљ, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Мирослав Дукић, редовни професор  
Универзитет Сингидунум – Факултет за информатику  
и рачунарство



др Владимир Арсоки, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет