

## НАСТАВНО–НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **мр Милоша Франтловића**

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду, бр. 908/3 од 27.01.2016. године, донетом на 795. седници одржаној 19.01.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Милоша П. Франтловића, под насловом

**Унапређење интелигентних индустријских мерних инструмената са МЕМС сензорима.**

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

Мр Милош Франтловић је одбранио магистарски рад „Платформа за развој интелигентних индустријских мерних инструмената са МЕМС сензорима притиска” 25.11.2010. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду (ментор: проф. др Срђан Станковић). Тему докторске дисертације „Унапређење интелигентних индустријских мерних инструмената са МЕМС сензорима” пријавио је 15.01.2013. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Одлуком бр. 908/1 од 12.02.2013. године именовани су чланови Комисије за оцену подобности теме и кандидата: др Срђан Станковић (ментор), професор емеритус (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Жељко Ђуровић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет) и др Зоран Јакшић, научни саветник (Универзитет у Београду – Институт за хемију, технологију и металургију). Тема је одобрена одлуком Наставно-научног већа од 11.06.2013. године, а затим и одлуком Већа научних области Универзитета у Београду од 08.07.2013. године.

Мр Милош Франтловић је поднео урађену докторску дисертацију на преглед и оцену 25.12.2015. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на 795. седници одржаној 19.01.2016. године именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације, у следећем саставу: др Срђан Станковић, професор емеритус (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Жељко Ђуровић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Зоран Јакшић, научни саветник (Универзитет у Београду – Институт за хемију, технологију и металургију), др Вујо Дрндаревић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет) и др Горан Стојановић, редовни професор (Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука).

## 1.2. Научна област дисертације

Ова дисертација припада научној области техничких наука – електротехника и рачунарство (управљање системима и обрада сигнала, интелигентни сензорски системи).

Именовани ментор, др Срђан Станковић, професор емеритус Електротехничког факултета у Београду, остварио је велики број научних доприноса у области електротехнике, управљања системима и обраде сигнала, укључујући бројне научне радове у реномираним међународним часописима. Водио је многе домаће и међународне пројекте, био у организационим и програмском одборима конференција, а члан је међународних и националних организација и професионалних удружења. У последње време велику пажњу у својим истраживањима посветио је интелигентним сензорским системима: у последњих пет година објавио је пет радова категорије М21 који припадају овој ужој области, којој и сама дисертација припада. Руководио је израдом многих магистарских и докторских теза.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Милош Франтловић је рођен 14.06.1970. године у Београду, где је завршио основну и средњу школу. Дипломирао је 2000. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на одсеку за електронику, телекомуникације и аутоматiku. Наслов дипломског рада је „Конвертор RS-232/RS-485 са аутоматским одређивањем смера преноса”, а ментор је био проф. др Срђан Станковић. Милош Франтловић је магистрирао 2010. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Наслов магистарске тезе је „Платформа за развој интелигентних индустријских мерних инструмента са МЕМС сензорима притиска”, а ментор је био проф. др Срђан Станковић.

Од 2001. године ради као истраживач у Институту за хемију, технологију и металургију, у Центру за микроелектронске технологије.

Милош Франтловић је од 2002. до 2004. године био ангажован на пројекту ИТ.1.04.0063.Б, под називом „Трансмитери притиска (нивоа, протока) на бази микроелектромеханичких (МЕМС) сензора”, који је финансирало Министарство за науку, технологију и развој Републике Србије. Од 2005. до 2007. године био је ангажован на пројекту ТР-6151Б, под називом „Висококвалитетни трансмитери притиска нове генерације”, који је финансирало Министарство науке Републике Србије. Од 2008. до 2010. године био је ангажован на пројектима ТР-11027 „Микросистемске, наносистемске технологије и компоненте” и ТР-11025 „Интелигентни индустријски трансмитери на бази сопствених ИХТМ сензора”. Такође је учествовао у реализацији иновационих пројеката ИП-8245 „Индустријски мерачи процесних величина са радио комуникацијом” и ИП-8139 „Детектор муља и замућености течности са контролером” 2006. године. Сада је ангажован на пројекту ТР-32008 „Микро, нано-системи и сензори за примену у електропривреди, процесној индустрији и заштити животне средине”, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Био је ангажован на међународном SCOPES пројекту IB7320-110923, под називом „Micro-nano cantilever based detection of small electromagnetic forces” (2005–2008.), који је финансирала Швајцарска национална научна фондација (SNSF), и на међународном пројекту „REGMINA” (2008–2011.), из програма FP-7 Европске Уније.

Завршио је специјалистички курс „Smart Sensor Systems”, који је одржан 2009. године на Техничком универзитету Делфт (Холандија). Током марта и априла 2011. године био је на студијском боравку на факултету *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (Швајцарска).

Милош Франтловић се бави истраживањем и развојем сензора заснованих на микро- и наноелектромеханичким структурама (МЕМС, НЕМС), као и истраживањем, развојем и

реализацијом електронских мерних инструмената и мерних метода. Аутор је и коаутор већег броја радова објављених у међународним и националним часописима и зборницима међународних и националних конференција. Учествовао је на међународним и домаћим научним конференцијама из области електронике, телекомуникација, сензора и нанотехнологија. Рецензент је водећих међународних часописа *Nanoscale* и *Microelectronics Engineering* и члан Научно-техничког одбора међународне конференције IcETRAN 2014.

Пројектовао је и реализовао већи број прототипова и производа из области сензора, мерних инструмената и индустријске електронике, од којих се издвајају интелигентни индустријски трансмитери притиска и сродних величина. Аутор је и коаутор већег броја техничких решења. Многи производи које је развио су комерцијализовани и у редовној су употреби у већем броју енергетских и других постројења у Србији.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација има укупно 183 стране и садржи 47 слика, 6 табела и 146 библиографских референци. Састоји се од насловне стране, изјаве захвалности, кратког резимеа на српском и енглеском језику, садржаја и текста дисертације подељеног на 8 целина:

1. Увод,
2. МЕМС технологије и сензори,
3. Интелигентни мерни инструменти,
4. Мерна метода за истовремено мерење притиска и температуре пиезоотпорним МЕМС сензором,
5. Пројекат интелигентног индустријског мерног инструмента,
6. Нови инструменти развијени применом остварених резултата,
7. Закључак,
8. Литература.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Делу 1 (Увод) дисертације дата је формулација проблема, објашњена је мотивација и наведени су циљеви истраживања описаних у дисертацији. Уведен је појам микроелектромеханичких технологија и система (МЕМС) и дате су основне информације о МЕМС сензорима. Дат је осврт на актуелно стање у области мерења притиска и температуре у индустријских мерним системима, где је запажено одсуство решења која би омогућила истовремено мерење те две величине истим МЕМС сензором. Као циљ истраживања обухваћених дисертацијом наводи се унапређење функционалности и перформанси интелигентних индустријских мерних инструмената заснованих на МЕМС сензорима, посебно на оним који се развијају и производе у Центру за микроелектронске технологије ИХТМ Универзитета у Београду. Осим постојећих типова сензора, као што су пиезоотпорни МЕМС сензори притиска, обухваћени су и они који су у фази истраживања и развоја (термални сензори вакуума, хемијски и биолошки сензори и сензорске структуре на флексибилним супстратима). На крају Увода наведени су очекивани доприноси дисертације и дат је преглед њене структуре.

У Делу 2 (МЕМС технологије и сензори) прво је дат преглед МЕМС технологија (дефиниције, историјат, актуелно стање и правци даљег развоја). После дефиниције и класификација МЕМС сензора, дат је кратак преглед механичких МЕМС сензора, а затим детаљан опис силицијумских пиезоотпорних МЕМС сензора притиска, укључујући приказ сензора SP-12, развијеног у Центру за микроелектронске технологије. У овом делу су такође представљени резултати два истраживања у вези са новим применама МЕМС технологија и сензорских структура. Прво се односи на испитивање електричних параметара структура на флексибилним супстратима. Мерена је промена електричне отпорности проузрокована механичком деформацијом узорака у виду танких металних слојева израђених поступком литографије са калупом на супстрату од полиимида. Резултати указују на употребљивост таквих структура у применама које подразумевају растегљивост, што обухвата МЕМС сензоре у медицинским имплантима, протезама, одећи, као и у роботици. Друго истраживање односи се на анализу појава важних за функционисање МЕМС сензора заснованих на адсорпцији честица. Разматран је утицај две појаве: адсорпције компетитивних честица и преноса масе циљних и компетитивних честица (код узорака у виду раствора) на флукуације масе сензорских структура. Изведен је поједностављен математички модел флукуација адсорбоване масе у равнотежном стању, који узима у обзир утицај обе појаве, тако да омогућује бољу процену граничних перформанси сензора у односу на моделе код којих су те појаве занемарене.

У Делу 3 (Интелигентни мерни инструменти) дате су дефиниције појмова паметних сензора, интелигентних сензора и интелигентним мерних инструмената. Затим следи опис индустријских инструмената и индустријских трансмитера као њихове подврсте, укључујући главне особине и класификацију према технолошким генерацијама. Дат је преглед индустријских интерфејса и протокола, као и актуелног стања науке и технике у области нових комуникационих технологија и концепата примене сензора. Следи разматрање несавршености сензора, са посебним освртом на несавршености карактеристичне за пиезоотпорне МЕМС сензоре притиска и на начине за њихову корекцију.

У Делу 4 приказана је нова мерна метода која омогућује истовремено мерење притиска и температуре применом силицијумског пиезоотпорног МЕМС сензора притиска, уз постизање високих мерних перформанси. У доступној литератури има мало примера истовременог мерења притиска и температуре истим сензорским елементом, док сличних примера који се односе на силицијумски пиезоотпорни МЕМС сензорски елемент уопште нема. Извршена је карактеризација групе од три сензора истог типа и истог мерног опсега, у задатом распону вредности притиска и температуре. На основу добијених мерних резултата формиран је параметарски математички модел за дати тип сензора. Параметри модела су израчунати за сваки од испитиваних сензора. Тиме је омогућена корекција сензора при истовременом мерењу притиска и температуре. Приказана мерна метода је затим експериментално проверена коришћењем интелигентног мерног инструмента чији је пројекат описан у Делу 5. Постигнуте мерне перформансе упоређене су са перформансама постојеће индустријске мерне опреме. Предложени су начини примене приказане методе у индустрији.

У Делу 5 детаљно је приказан пројекат интелигентног индустријског мерног инструмента, који је првенствено намењен мерењу притиска и температуре применом пиезоотпорних МЕМС сензора, али се лако може прилагодити другим врстама сензора. Пројектована хардверска платформа је модуларна и омогућује постизање високих мерних перформанси у индустријским условима примене.

Део 6 описује два примера реализованих интелигентних индустријских инструмената заснованих на примени резултата остварених израдом дисертације. Први од њих је интелигентни индустријски трансмитер нивоа течности са МЕМС сензорима притиска, који је настао директном применом описане мерне методе и пројектоване хардверске платформе.

Други је прототип интелигентног трансмитера вакуума, који је заснован на истој хардверској платформи, али користи вишенаменски термални МЕМС сензор.

Део 7 је закључак дисертације. У њему је дат кратак преглед истраживања и резултата описаних у претходним деловима. Детаљно су образложени остварени доприноси. Набројани су објављени научни радови кандидата у вези са дисертацијом. Затим су наведене практичне примене резултата дисертације. На крају су предложени неки од могућих праваца за наставак истраживања у тематској области дисертације.

Део 8 је списак коришћене литературе.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Тематски оквир ове дисертације обухвата и повезује две научне области које су данас веома актуелне: МЕМС сензоре и интелигентне мерне инструменте.

Широка и мултидисциплинарна област МЕМС (такође и НЕМС) технологија и сензора веома је заступљена у савременој научној литератури, укључујући и врхунске међународне часописе, а такође постоје бројне специјализоване конференције посвећене разним аспектима МЕМС и НЕМС структура. Истраживања различитих особина, појава и механизма својствених таквим структурама од интереса су за развој нових врста сензора. У овој дисертацији дат је допринос тим истраживањима, који се односи на моделовање утицаја процеса компетитивне адсорпције и преноса масе на флукуације масе МЕМС/НЕМС сензорских структура. Врло актуелна тема у области МЕМС сензора су нови концепти који омогућују њихову масовну примену у медицинским имплантима, протезама, одећи, као и у роботици. Један такав концепт заснива се на примени флексибилних МЕМС структура које обухватају сензоре и електронику. У дисертацији су приказани резултати истраживања зависности електричних карактеристика од механичке деформације проводних МЕМС структура израђених на флексибилном супстрату применом поступка литографије са калупом.

Област интелигентних сензора и мерних инструмената актуелна је у научном смислу (сензорска фузија, дистрибуирани системи, методе корекције, алгоритми за одлучивање, синхронизацију итд.), у техничко-технолошком смислу (комуникациони протоколи, сензорске мреже, Интернет ствари итд.), а такође и у смислу практичне реализације и примене савремених мерних система. У овој дисертацији дат је оригинални научни допринос развојем нове мерне методе за истовремено мерење притиска и температуре једним пиезоотпорним МЕМС сензором, уз постизање високих мерних перформанси. Таква метода није описана у доступној литератури. Приказан је пројекат савременог индустријског мерног инструмента модуларне конструкције, који представља још један оригинални допринос кандидата. Применом поменутих резултата реализован је оригинални производ, интелигентни индустријски трансмитер нивоа течности, а такође и прототип интелигентног трансмитера вакуума.

Савременост и оригиналност истраживања и резултата описаних у дисертацији верификовани су објављивањем радова из поменутих научних области.

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

Током израде дисертације кандидат је детаљно претражио релевантну литературу и коректно навео радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је укупно 146 референци које су врло разноврсне, а међу њима су и најновији научни радови релевантни за

проблематику истражену у дисертацији. Кандидат мр Милош Франтловић је аутор или коаутор 15 радова цитираних у дисертацији.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се у следећем:

- проучавање доступне литературе из области дисертације, ради сагледавања актуелног стања науке и технике,
- теоријско разматрање више различитих појава и процеса у вези са функционисањем и применом МЕМС структура и сензора (компетитивна адсорпција и пренос масе код хемијских и биолошких МЕМС сензора, пиезоотпорност код механичких сензора),
- развој нове методе за корекцију несавршености пиезоотпорног МЕМС сензора притиска, која омогућује истовремено мерење притиска и температуре истим сензором,
- експериментални рад: испитивање промене електричних карактеристика МЕМС структура на флексибилним супстратима услед механичке деформације, карактеризација групе силицијумских пиезоотпорних МЕМС сензора притиска, експериментална провера мерних перформанси постигнутих применом развијене мерне методе,
- развој хардвера: пројектовање и реализација укупно три модула електронског склопа интелигентног индустријског мерног инструмента,
- нумерички и графички приказ постигнутих резултата и њихова анализа,
- поређење постигнутих резултата са резултатима добијеним применом постојећих решења и метода описаних у литератури,
- провера и примена резултата истраживања у пракси: унапређени интелигентни индустријски мерни инструменти у форми готовог производа (интелигентни трансмитер нивоа течности) и прототипа (интелигентни трансмитер вакуума).

Примењена методологија у потпуности одговара стандардима научно-истраживачког рада и у сагласности је са циљевима дефинисаним на почетку израде дисертације.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживање утицаја вишеструког механичког истезања на отпорност МЕМС проводних структура израђених поступком литографије са калупом на флексибилном супстрату дало је резултате који показују да се овакве структуре могу користити у применама које подразумевају растегљивост. Те примене обухватају биомедицинске сензоре и инструменте који се користе као импланти или причвршћени на површину коже, затим сензоре уграђене у одећу или обућу, као и сензоре у роботизи (флексибилни тактилни сензори, „паметна кожа” итд.). Зависност отпорности флексибилне структуре од броја циклуса истезања, која је експериментално одређена, може бити искоришћена као принцип рада неког новог типа механичког МЕМС сензора.

Истраживање које се односи на МЕМС сензоре на принципу селективне адсорпције омогућило је извођење математичког модела који описује флукуације адсорбоване масе сензорске структуре у равнотежном стању, узимајући у обзир утицај компетитивне адсорпције и преноса масе. Модел омогућује бољу процену граничних перформанси сензора у односу на моделе код којих је занемарен један од ових ефеката или оба ефекта, што је значајно за побољшање постојећих метода детекције честица, посебно у течним узорцима

(код њих је утицај преноса масе израженији него у гасовима). Модел је такође користан за развој нових метода детекције и за карактеризацију процеса адсорпције циљних и конкуритивних честица, на бази анализе флукуација излазног сигнала сензора у фреквенцијском домену.

Резултати добијени применом методе за истовремено мерење притиска и температуре силицијумским пиезоотпорним МЕМС сензором, описане у дисертацији, потврђују њену употребљивост у индустријским мерним системима. Осим истовременог мерења притиска и температуре на неком мерном месту, могуће су и друге корисне примене, укључујући проверу рада неког другог (наменског) сензора температуре и температурску компензацију или дијагностику у различитим мултисензорским конфигурацијама и системима. Јединствена предност описане методе је могућност коришћења постојеће хардверске архитектуре савремених интелигентних индустријских трансмитера притиска заснованих на пиезоотпорним сензорским елементима. То значи да се и неким постојећим типовима трансмитера притиска уз минимална улагања може додати функција истовременог мерења температуре.

Пројекат интелигентног индустријског мерног инструмента омогућује реализацију већег броја различитих производа, уз постизање или превазилажење мерних перформанси упоредиве опреме на тржишту. Осим интелигентног трансмитера притиска, приказан је и нови тип интелигентног трансмитера нивоа са два пиезоотпорна МЕМС сензора притиска. Пројекат је конципиран тако да се може прилагодити примени различитих врста сензора, што је у дисертацији показано на примеру прототипа интелигентног трансмитера вакуума са термалним МЕМС сензором.

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

Кандидат, мр Милош Франтловић, показао је израдом ове дисертације систематичност у раду, способност за препознавање отворених питања и актуелних тема у науци, као и зрелост и самосталност при анализи и решавању проблема. Свеобухватан и мултидисциплинарни приступ, који подразумева теоријска истраживања, опсежан експериментални рад, развој мерних метода, као и пројектовање и израду сложених електронских уређаја директно применљивих у пракси, такође потврђује да је кандидат свестран и компетентан истраживач, потпуно оспособљен за самостални научни рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси које је кандидат мр Милош Франтловић остварио кроз истраживања описана у овој дисертацији су следећи:

1. Истражена је промена електричних карактеристика металних МЕМС структура израђених поступком литографије са калупом на флексибилном супстратима, после излагања великом броју циклуса механичког истезања и релаксације. Добијени резултати показују да карактеристике таквих структура могу бити довољно добре и стабилне, што их чини подесним за мноштво нових примена, укључујући МЕМС сензоре у медицинским имплантима, протезама и одећи, као и биомиметичке структуре попут нпр. вештачке коже за употребу у роботници.
2. Истражен је утицај процеса конкуритивне адсорпције и преноса масе на флукуације масе сензорских структура. Изведен је математички модел у виду аналитичког израза који описује ту зависност. Он је користан алат за оптимизацију хемијских и биолошких МЕМС сензора заснованих на селективној адсорпцији честица.

3. Формиран је математички модел који добро описује понашање силицијумских пиезоотпорних МЕМС сензора притиска при различитим вредностима притиска и температуре.
4. Развијена је нова метода за истовремено мерење притиска и температуре истим силицијумским пиезоотпорним МЕМС сензором, са корекцијама несавршености сензора у дигиталном домену. Метода омогућује нове примене те врсте сензора у индустрији, укључујући и проширење функционалности неких постојећих типова интелигентних трансмитера притиска, уз врло мале измене (некад само у софтверу). Експериментално је потврђено да су мерне перформансе постигнуте применом методе и пројектованог мерног инструмента боље, или бар упоредиве са онима које постижу савремени индустријски трансмитери притиска или температуре.
5. Пројектован је и реализован интелигентни индустријски мерни инструмент модуларне конструкције и високих перформанси. Он омогућује потпуну имплементацију описане мерне методе и примену до два иста или различита сензора. Модуларност уређаја омогућује нпр. додавање локалног корисничког интерфејса, промену начина напајања и комуникације са надређеним системом или подршку за неку нову врсту сензора. Овај пројекат је оригиналан и самостално остварен допринос, који са претходно наведеним научним резултатима чини јединствену и заокружену целину, дајући им практичан значај и употребну вредност.
6. Развијен је нови индустријски трансмитер вакуума, заснован на описаном пројекту интелигентног инструмента и вишенаменском термалном МЕМС сензору. Реализован је прототип и анализирани су његове мерне перформансе.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Свеобухватан приступ унапређењу интелигентних индустријских мерних инструмената са МЕМС сензорима, који је спроведен у овој дисертацији, дао је више научних резултата, који се могу сврстати у област МЕМС сензора и у област интелигентних мерних инструмената.

У области МЕМС сензора дата су два научна доприноса. Први се односи на резултат истраживања утицаја механичког истезања на електричне карактеристике МЕМС структуре израђене на флексибилном супстрату поступком литографије са калупом. Тај резултат представља унапређење научних знања о реалним ограничењима, али и новим могућностима примене сензорских и других флексибилних МЕМС структура. Други допринос је математички модел који описује утицај процеса компетитивне адсорпције и преноса масе на флукуације масе МЕМС/НЕМС сензорских структура. У поређењу са постојећим поједностављеним моделима, код којих је занемарен један од ових ефеката или оба ефекта, овај модел омогућује бољу процену граничних перформанси сензора, што је значајно за побољшање постојећих метода детекције честица, посебно у течним узорцима. Модел је користан за развој нових метода детекције и за изучавање процеса адсорпције циљних и компетитивних честица применом анализе флукуација излазног сигнала сензора у фреквенцијском домену.

У области интелигентних мерних инструмената могу се издвојити три значајна доприноса. Први је нова мерна метода која омогућује истовремено мерење притиска и температуре истим силицијумским пиезоотпорним МЕМС сензором, са корекцијама несавршености сензора у дигиталном домену. Таква метода није описана у доступној литератури. Други оригинални допринос је модуларни интелигентни индустријски инструмент, који је кандидат самостално развио и реализовао. Инструмент чини функционалну целину која даје употребну вредност описаној методи и другим научним резултатима. Спроведена експериментална верификација показује да је применом



инструмента и методе могуће постићи мерне перформансе боље од оних које имају упоредиви савремени индустријски инструменти. На бази овог доприноса развијен је нови тип индустријског трансмитера нивоа течности, као и нови интелигентни индустријски трансмитер вакуума, заснован на термалном MEMS сензору, какав није описан у доступној литератури.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Током истраживачког рада у области теме докторске дисертације, кандидат мр Милош Франтловић је објавио шест научних радова у међународним часописима са SCI листе (два као првопотписани аутор). Поред тога, објавио је седам радова на конференцијама од међународног значаја, један рад у часопису националног значаја, два рада у научном часопису и шест радова на скуповима од националног значаја.

##### Категорија M21:

1. **Frantlović, M.**, Jokić, I., Djurić, Z., Radulović, K.: Analysis of the competitive adsorption and mass transfer influence on equilibrium mass fluctuations in affinity-based biosensors, - *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 189, pp. 71–79, Dec. 2013 (**IF=3.840**) (ISSN 0925-4005)
2. 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, May 2012 (**IF=3.535**) (ISSN 0925-4005)

##### Категорија M22:

1. **Frantlović, M.**, Jokić, I., Savu, V., Xie, S., Brugger, J.: Effects of tensile stress on electrical parameters of thin film conductive wires fabricated on a flexible substrate using stencil lithography, - *Microelectronic Engineering*, vol. 98, pp. 230–233, Oct. 2012 (**IF=1.224**) (ISSN 0167-9317)
2. Randjelović D., **Frantlović M.**, Miljković B., Popović B., Jakšić Z.: Intelligent thermal vacuum sensors based on multipurpose thermopile MEMS chips, - *Vacuum*, vol. 101, 2014, pp. 118–124 (**IF=1.858**) (ISSN 0042-207X)

##### 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, Aug. 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 (1), 2015, pp. 141-147 (**IF=0.892**) (ISSN 1451-9372)

##### Категорија M24:

1. **Frantlović, M.**, Jokić, I., Lazić, Ž., Vukelić, B., Obradov, M., Vasiljević-Radović, D., Stanković, S.: Temperature measurement performance of silicon piezoresistive MEMS pressure sensors for industrial applications, - *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 1, pp. 123–131, 2015 (ISSN 0353-3670)

##### Категорија M33:

1. **Frantlović, M.**, Vorkapić, M., Vasiljević-Radović, D.: Characterization of Silicon Piezoresistive MEMS Pressure Sensors for Temperature Measurement, - *Proc. 5<sup>th</sup>*

*International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH*, Belgrade, 2012, pp. 701-706

2. Jokić I., Radulović K., **Frantlović M.**, Djurić Z., Vasiljević-Radović D.: Combined influence of competitive binding and mass transfer on response of affinity-based biosensors, - *Proc. Regional Biophysics Conference, Kladovo-Belgrade*, 2012, pp. 45-47
3. Jakšić O., Jakšić Z., Randjelović D., Jokić I., **Frantlović M.**: Adsorption-desorption processes in defense against chemical, biological, radiological, nuclear and explosive threats, - *Proc. 5<sup>th</sup> International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH, Belgrade*, 2012, pp. 701-706
4. **Frantlović M.**, Jokić I., Lazić Ž., Vukelić B., Obradov M., Vasiljevic-Radovic D.: Temperature measurement using silicon piezoresistive MEMS pressure sensors, - *Proc. 29<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics MIEL*, Belgrade, 2014, pp. 159–161

#### Категорија М34:

1. **Frantlović M.**, Jokić I., Savu V., Xie S., Brugger J.: Effects of tensile stress on electrical parameters of thin film conductive wires fabricated on a flexible substrate using stencil lithography, - *Proc. Abstr. 37<sup>th</sup> International Conference on Micro and Nano Engineering MNE*, Berlin, 2011, P-LITH-111
2. **Frantlović M.**, Jokić I., Djurić Z., Radulović K., Jokić Z.: Adsorption-desorption noise in microfluidic biosensors used in multianalyte environments, - *Proc. Abstr. 40<sup>th</sup> International Conference on Micro and Nano Engineering MNE*, Lausanne (Switzerland) 22-26 September 2014, pp. 235
3. Vukelić, B., **Frantlović, M.**: Implementation of IEEE 1451.4 Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Using an 'MBED' Microcontroller Module: The Case of MEMS Piezoresistive Pressure Sensors, - *Proc. Abstr. 1<sup>st</sup> International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN*, Vrnjačka Banja, Serbia, June 2-5 2014, pp. 43

#### Категорија М52:

1. **Frantlović M.**, Jovanov V., Miljković B.: Intelligent Industrial Transmitters of Pressure and Other Process Parameters, - *Telfor Journal*, vol. 1 (2), 2009, pp 65-68

#### Категорија М53:

1. **Frantlović M.**, Jokić I., Djurić Z., Radulović K.: Analysis of the Influence of Competitive Adsorption and Mass Transfer on Adsorbed Mass Fluctuations in Affinity-Based Biosensors, - *Procedia Engineering*, 47, 2012, pp. 957–960
2. Randjelović D., **Frantlović M.**, Miljković B., Rosandić B., Jakšić Z., Popović B.: Intelligent Thermopile-Based Vacuum Sensor, - *Procedia Engineering*, 25, 2011, pp. 575–578

#### Категорија М63:

1. **Франтловић, М.**, Јованов, В., Миљковић, Б.: Интелигентни индустријски трансмитери притиска и других процесних величина, - *Зборник радова 16. Телекомуникационог форума ТЕЛФОР*, Београд, 2008, стр. 532-535
2. Ранђеловић, Д., Јованов, В., **Франтловић, М.**, Воркапић, М.: Развој бежичног трансмитера вакуума на бази МЕМС сензора са термобатеријама, - *Зборник радова 16. Телекомуникационог форума ТЕЛФОР*, Београд, 2008, стр. 524-527
3. Поповић, Б., **Франтловић, М.**, Миљковић, Б., Воркапић, М., Танасковић, Д., Смиљанић, М.: ИХТМ интелигентни индустријски трансмитер разлике температура, - *Зборник радова 53. конференције за ЕТРАН*, Врњачка Бања, 2009, МО4.6-1-4

4. **Франтловић, М.**, Воркапић, М., Миљковић, Б., Поповић, Б., Матић, М., Танасковић, Д., Смиљанић, М., Ђурић, З.: ИХТМ Интелигентни индустријски трансмитер нивоа течности са два сензора апсолутног притиска, - *Зборник радова 53. конференције за ЕТРАН*, Врњачка Бања, 2009, МО4.7-1-4
5. Јокић, И., Ђурић, З., Ранђеловић, Д., Ђукић, М., **Франтловић, М.**, Васиљевић-Радовић, Д., Буха, Ј., Танасковић, Д.: Метода за прецизну карактеризацију микро/наногредица хемијских и биолошких сензора за мерења у гасовима и течностима, - *Зборник радова 54. Конференције за ЕТРАН*, Горњи Милановац, 2010, МО 3.8-1-4
6. Вукелић, Б., **Франтловић, М.**, Обрадов, М.: Развој прототипа интелигентног мерача притиска са Ethernet комуникацијом, - *Зборник радова 56. конференције за ЕТРАН*, Златибор, 2012, МО3.7-1-4

#### Категорија М72:

1. **Франтловић, М.**: Платформа за развој интелигентних индустријских мерних инструмената са МЕМС сензорима притиска, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, 25. новембар 2010., ментор: проф. др Срђан Станковић

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата мр Милоша Франтловића, под насловом „Унапређење интелигентних индустријских мерних инструмената са МЕМС сензорима”, 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.

Као што је у реферату наведено, теза садржи неколико значајних оригиналних доприноса научној области интелигентних сензорских система. Централно место у дисертацији заузима предлог нове методе за истовремено мерење притиска и температуре истим силицијумским пиезоотпорним МЕМС сензором, која отвара веома бројне могућности за примену у индустрији. При томе је експериментално потврђено да су постигнуте мерне перформансе боље, или бар упоредиве, са онима које постижу савремени индустријски трансмитери притиска или температуре узети за себе. Посебан квалитет дисертацији, у смислу практичног значаја и употребне вредности, даје чињеница да је кандидат, на бази предложене методе, самостално пројектовао и реализовао интелигентни индустријски мерни инструмент модуларне конструкције и високих перформанси, који са претходно наведеним научним резултатима чини јединствену и заокружену целину. Поред тога, оригинални доприноси су постигнути и у домену специфичних МЕМС структура, са значајним импликацијама у погледу могућности примене.

Треба истаћи да се методологија примењена у дисертацији може узети као пример за углед када се ради о докторским дисертацијама у техничко-технолошком пољу: полазећи од практичних потреба и детаљног и систематичног увида у дату област, проблем је систематично третиран теоријски на бази оригиналне идеје, резултати су верификовани у пракси, да би на крају био изведен и реализован пројекат одговарајућег уређаја. Конзистентна примена оваквог приступа у директној је и нераскидивој вези са високим професионалним квалитетима кандидата, који је показао широко и дубоко познавање разматране области и демонстрирао како критички став према својим и туђим резултатима, тако и јасноћу идеја и прецизност у формулацијама и експериментима, уз све време присутну изузетну способност за ефикасну инжењерску имплементацију. Кандидат је притом показао веома висок степен самосталности и инвентивности, што је посебна гаранција за будуће успешно бављење научним истраживањима.

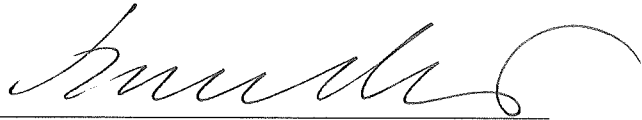
Треба нагласити и да је сам текст дисертације у сагласности са примењеном методологијом у истраживањима: веома је добро структуриран, прецизан, јасан и стилски веома доследно и лепо усаглашен.

Резултате проистекле из истраживања спроведених у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у међународним часописима са SCI листе и другим публикацијама и саопштио на скуповима међународног и националног значаја.

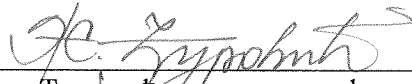
На основу свега изнесеног, Комисија закључује да је својом докторском дисертацијом „Унапређење интелигентних индустријских мерних инструмената са MEMS сензорима” мр Милош Франтловић, дипломирани инжењер електротехнике, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником 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 упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

Београд, 09.03.2016. год.

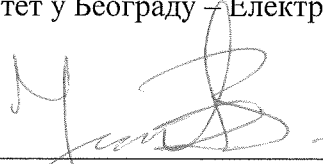
#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ




др Срђан Станковић, професор емеритус  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Жељко Буровић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Зоран Јакшић, научни саветник  
Универзитет у Београду – Институт за хемију,  
технологију и металургију



др Вујо Дридаревић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Горан Стојановић, редовни професор  
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких  
наука