

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

5. фебруар 2014.

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр инж. Здравка Живковића

На седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, број 768 одржане 5. новембра 2013. године (број одлуке 722/3 од 5. новембра 2013. године), именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата мр инж. Здравка Живковића под насловом

**„Филтри са површинским акустичким таласом за хемијске гасне сензоре”**

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

Магистарски рад под насловом „Примена телеинформационих терминала у SCADA системима управљања у електроенергетици” кандидат је одбранио 27.03.1992. године.

Кандидат је тему дисертације, под насловом „Филтри са површинским акустичким таласом за хемијске гасне сензоре” пријавио 27. маја 2013. године.

На седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 763 од 11. јуна 2013. године, именована је Комисија за оцену подобности теме и кандидата мр инж. Здравка Живковића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Филтри са површинским акустичким таласом за хемијске гасне сензоре”, у саставу: проф. др Дејан Тошић, проф. др Миодраг Поповић, проф. др Злата Цветковић, проф. др Милан Тадић и доц. др Милка Потребих.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду усвојило је Извештај Комисије за оцену подобности теме и кандидата 3. септембра 2013. године.

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 30. септембра 2013. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета, на својој 768. седници одржаној 5. новембра 2013. године, именovalo је чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: проф. др Дејан Тошић, проф. др Миодраг Поповић, проф. др Злата Цветковић, проф. др Милан Тадић и доц. др Милка Потребих.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада ужој научној области Електроника. За ову ужу научну област матичан је Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Ментор докторске дисертације је др Дејан В. Тошић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Ментор је стручњак у области пројектовања филтара са површинским акустичким таласом (ПАТ), РФ и микроталасних филтара, и аутор је више радова из ових области у истакнутим међународним часописима.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат мр Здравко Живковић рођен је 1951. године у Руми. Дипломирао је на Електротехничком факултету у Београду 1975. године са темом „Линеарни временски дискретни системи са чистим кашњењем”. Магистрирао је на истом факултету, на смеру Електроника, 1992. године са темом „Примена телеинформационих терминала у SCADA системима управљања у електроенергетици”.

После дипломирања запослио се у ИМ „Победа” Нови Сад као инжењер за електронске системе на нумерички управљаним алатним машинама. У том периоду био је на стручној специјализацији у фирми Carl Zeiss Јена, за дигиталне оптичке енкодере.

Године 1978. прелази у СОУР САВА КРАЊ, фабрика пнеуматике у Руми, где је био члан радног тима за реализацију инвестиционог пројекта изградње нове фабрике пољопривредних пнеуматика задужен за електротехничка питања сложених производних линија и система. Био је упућен на стручно усавшавање у „Pirelli” Италија, за микропроцесорско управљање машинама и у ISE Вићенца, за пројектовање и производњу програмабилних логичких контролера и тиристорских регулатора. Радио је као руководиоца службе електронике, регулације и мерења и као главни инжењер техничке припреме у индустрији „Румагума” за одсек одржавања и пројектовања електронских система на технолошкој опреми.

Године 1988. прелази у Технички опитни центар – Полигон Никинци, као истраживач у Одсеку за мерења и снимања. Област бављења му је била електронска мерења при развојним и верификационим испитивањима и истраживања мерних метода у балистици заснована на употреби савремених електронских мерних инструмената и радарских система, а у оквиру тога, развој и имплементација нестандардних мерних метода те пројектовање електронских склопова и система. Учествовао је на пројектима који су се односили на развој нових мерних метода за одређивање балистичких параметара као што су спин и време лета пројектила и развој софтверских пакета за дигиталну обраду Доплер радарских сигнала.

Од 2001. године почиње да се бави истраживањем и развојем елемената са површинским акустичким таласима, посебно у војне сврхе, у области радарских система и телекомуникација. Бирао је у звање истраживач сарадник два пута а такође је редовно бирао за члана Научног већа Техничког опитног центра Војске Србије. Од 2007. године ради као наставник електротехничке групе предмета у средњој техничкој школи.

Научно веће института "Гоша" га је 2008. године изабрало у звање „истраживач сарадник” и ангажовало на пројекту технолошког развоја ТР 11026 Министарства за науку и технолошки

развој Републике Србије, а на истраживању и развоју филтара са површинским акустичким таласима.

Аутор је или коаутор 5 радова у часописима, 13 радова на научним скуповима од тога 2 на скуповима међународног значаја, а 11 на скуповима националног значаја, 12 стручних радова и три техничка решења на пројекту ТР 11026. Неки од ових радова су настали као резултат рада на овој дисертацији.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Наслов докторске дисертације је „Филтри са површинским акустичким таласом за хемијске гасне сензоре”. Дисертација садржи насловну страну, захвалницу, резиме, садржај, списак коришћених ознака, списак назива слика, списак наслова табела, 7 поглавља и литературу. На крају текста дата је биографија аутора. Дисертација је написана на 181 страни, које укључују 141 формулу, 66 слика, 3 табеле и 78 референци.

Наслови поглавља су следећи: 1. Увод, 2. Површински акустички таласи (ПАТ), 3. ПАТ елементи, 4. ПАТ сензори, 5. Општи принципи пројектовања ПАТ филтара, 6. Пројектовање РФ и МФ ПАТ филтара и реализација ПАТ филтра за хемијске сензоре и 7. Закључак.

По структури и садржају, поднети рад задовољава све стандарде за докторску дисертацију.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље (Увод) је изложено на шест страна. У њему се прво излаже актуелност и значај ПАТ технологије. Сажето се наводи примена ПАТ направа у разним областима или системима, као што су сензори и мониторинг, телевизијска техника, навигациони системи, радарски системи, комуникациони системи, или обрада сигнала у реалном времену. Затим се наводе циљеви и задаци дисертације. На крају увода је укратко приказан садржај наредних поглавља дисертације.

У другом поглављу се излажу основи теорије површинских акустичких таласа. Сажето се представљају својства површинских акустичких таласа и одговарајућа анализа, односно физички и математички модели. Објашњава се функционисање ПАТ елемената утемељено на простирању еластичних механичких таласа високих учестаности дуж површине монокристалне пиезоелектричне подлоге (супстрата). Анализа се заснива на таласној једначини кретања честице подлоге (према Њутновим законима механике), Максвеловим једначинама електромагнетског поља, граничним условима за електромагнетско поље, граничним условима за механичко кретање, као и везама електричних и механичких величина. Прво се анализира најједноставнији случај када је подлога изотропна и непиезоелектрична. Затим се анализира простирање таласа кроз анизотропну средину, јер се ПАТ елементи имплементирају са анизотропним пиезоелектричним подлогама, и узима се у обзир утицај пиезоелектричне спреге на брзину простирања површинских акустичких таласа. Разматрају се случајеви слободне површине и краткоспојене површине подлоге (танак метални слој на супстрату). На крају, даје се осврт посвећен материјалима и технологији примењеној у производњи сензора као и типовима површинских таласа који се користе за њихову имплементацију.

Треће поглавље обрађује принцип рада и начине анализе елемената са површинским акустичким таласима. Детаљно се објашњава функционисање ПАТ елемената и показује да се ПАТ елемент понаша као филтар пропусник опсега учестаности. Презентира се

моделовање трансверзалних ПАТ елемената у циљу добијања функције преноса. Посебно се обрађује механизам функционисања интердигиталних претварача с обзиром да од њих највише зависи облик фреквенцијске карактеристике комплетног филтра. Приказују се методе за анализу ПАТ елемената, тачне и апроксимативне. Детаљно се излажу методе апроксимативне анализе рада интердигиталних претварача коришћењем еквивалентних модела. Посебно се објашњава група апроксимативних метода које се базирају на Масоновом еквивалентном колу једне секције претварача јер оно даје добре резултате за униформне претварааче какви се користе код сензора. Показује се да је начин анализе преко модела са делта функцијама најједноставнији и најбржи, али да даје и најмање тачне резултате нарочито ако се ради са већим отпорима оптерећења и материјалима са већом пиезоелектричном константом, док су апроксимативне методе анализе засноване на еквивалентним колима сложеније и могу се успешно користити за све врсте подлога и претварача, као и за различита оптерећења. У овом случају тачност анализе зависи од сложености еквивалентног кола.

Четврто поглавље обрађује врсте, принцип рада и начин анализе сензора са површинским акустичким таласима. Образлаже се принцип рада, моделовање и имплементација трансверзалних сензора који су засновани на елементима са површинским акустичким таласом. Излаже се један оригинални метод моделовања ПАТ биосензора који омогућује одређивање функције преноса и улазне адмитансе ПАТ елемента са униформним претварачима за општи случај оптерећења. Употребом овог метода, где се цео филтар представља као четворопол а ИДП-и и безелектродни део адмитансним матрицама, могуће је вршити анализу и предикцију у сваком појединачном случају биосензора као и у случају ПАТ транспондера. У овом поглављу се представља један од основних доприноса тезе: нов модел и метод анализе трансверзалних хемијских гасних сензора са површинским акустичким таласом. Гасни сензор се моделује као мрежа са два приступа (четворопол) у којој се издвајају три независне подмреже: улазни претварач, линија за кашњење (покривена материјалом који је осетљив на гасове, а то је танак слој полимера) и излазни претварач. Свака подмрежа се даље представља заменским колом. Одређује се промена излазног сигнала (напона или учестаности) у функцији концентрације гаса. Анализира се утицај својстава реалног сензора са површинским акустичким таласом, као што је слабљење услед простирања, које се у постојећим познатим методама анализе занемарује. Изводе се експлицитни аналитички изрази у затвореном облику за естимацију концентрације гаса. Приказују се резултати симулације, засновани на предложеном моделу, и поређења са експерименталним резултатима добијеним мерењем. Представља се случај предикције масене осетљивости као функције учестаности, израчунавање концентрације гаса трихлоретилена (TCE) када је осетљиви слој полимер PVDТ, као и пример у коме се симулира слабљење услед простирања на вишим учестаностима, а за случај гасног сензора са кварцном подлогом за откривање недозвољене концентрације гасова који емулирају бојне отрове. Посебно је приказана примена предложеног метода за анализу хемијских гасних сензора на вишеслојним подлогама у случајевима када се ПАТ сензор прави као део сложеног електронског система у MEMS или CMOS технологији или када се користи дијамант, што је још један допринос дисертације. Изложена је процедура у којој је прво одређена ефективна брзина таласа у вишеслојној подлози, неопходна за одређивање концентрације гаса, применом развијеног модела на линију за кашњење без осетљивог слоја и аналогije између механичких и електричних величина. У наредном кораку је коришћењем формула изведених у предложеном методу анализе добијен експлицитан израз за одређивање концентрација детектованог гаса помоћу сензора на вишеслојној подлози.

У петом поглављу се наводе принципи синтезе филтра са површинским акустичким таласом. Успоставља се аналогija између блок шеме идеалног трансверзалног филтра и филтра са површинским акустичким таласом. На основу успостављене аналогije представља се пројектовање филтра са површинским акустичким таласом на основу опште постојеће

теорије и метода синтезе трансверзалних филтара. Посебна пажња се поклања студији несавршености која је од интереса за имплементацију филтра са површинским акустичким таласом, као и утицај одступања реализације филтра у односу на жељене перформансе и конструкција претварача да би се несавршености компензовале. Разматра се моделовање филтра са површинским акустичким таласом и одређивање његове функције преноса као основе за синтезу. Анализирају се различити приступи и технике пројектовања и синтезе филтра са површинским акустичким таласом. Утврђује се да се већина поступака за пројектовање филтра са површинским акустичким таласом изводи у фреквенцијском домену и заснива на итеративним нумеричким поступцима. Подробно се приказују два основна начина за синтезу и пројектовање филтра са површинским акустичким таласом: (1) приступ посредством Фуријеове трансформације и прозорских функција и (2) приступ помоћу оптимизационе методе синтезе. Посебно је приказано пројектовање реалних ПАТ филтара узимајући у обзир оптерећење и његов утицај на карактеристике филтра како би се кориговала геометрија претварача, пошто би карактеристике добијеног филтра знатно одступале од жељених.

У шестој глави је обрађено пројектовање и реализација трансверзалног филтра пропусника опсега учестаности са површинским акустичким таласом намењеног за примену у хемијским сензорима. Излаже се алгоритам за комплетно пројектовање трансверзалних РФ ПАТ филтара са униформним претварачима са максималним пропусним опсегом и минималним слабљењем који је један од доприноса ове дисертације. Такође, представља се и нови софтвер, под именом, ИДПМПАТ вер. 1.0, који служи за пројектовање маске интердигиталних претварача одабране врсте ПАТ филтара и који је исто тако један од доприноса дисертације. Софтвер ИДПМПАТ израчунава геометријске димензије интердигиталних претварача и у излазном извештају генерише цртеж маске интердигиталних претварача и целог филтра. Приказана је примена предложеног алгоритма и софтвера ИДПМПАТ. Пројектован је филтар са два идентична неаподизована претварача и израђен лабораторијски прототип ПАТ филтра пропусника опсега (ФПО) учестаности са минималним слабљењем, који је основа за израду хемијског сензора наношењем осетљивог слоја полимера између претварача. Подробно је описан поступак израде лабораторијског прототипа на подлози од кварца, а испуњење задатих спецификација је проверено мерењем параметара расејања произведеног филтра.

У седмом поглављу (Закључак) су сумирани резултати рада, изложени доприноси истраживања и предложен је даљи правац истраживања.

Литература садржи 78 референци.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

У новије време, ПАТ елементи су постали незаобилазан део савремене електронске и комуникационе индустрије због њихове употребе као RF, MF и GPS филтара за различите апликације. Главна предност система за обраду сигнала са ПАТ елементима лежи у томе (1) што се обрада може вршити у реалном времену тј. истовремено са пријемом сигнала, (2) фреквенцијски опсег примене ових елемената је недоступан за већину других компонената и (3) флексибилна употреба ПАТ елемената с ТВ производом (пропусни опсег пута време процесирања) од више десетина хиљада који омогућава комплексно процесирање сигнала. Ови елементи су нашли примену у постојећим системима за бежичну комуникацију, где се користе RF и MF филтри са малим унетим слабљењем, а очекује се и њихова примена у новим генерацијама ових уређаја. Апликације конвенционалних филтара са стандардним

нивоом слабљења и високоселективних ПАТ филтара заступљене су и у уређајима заснованим на CDMA (Code Division Multiple Access) техници.

ПАТ елементи се све више користе изван уобичајеног поља примене, комуникација и обраде сигнала. У последњој деценији значајни напори се чине на развоју ПАТ сензора високих перформанси, посебно оних који се користе у медицини и заштити животне средине. Сензори са површинским акустичким таласима показују супериорну селективност за детекцију хемијских агенаса. Због могућности бежичног приступа (радио сензори) ови сензори се могу користити за даљински мониторинг и мерења на неприступачним или опасним местима. Захваљујући технологији израде која је компатибилна са осталим савременим планарним технологијама као што су микроталасна интегрисана кола (Microwave Integrated Circuits, MIC), MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), CMOS, CCD (Charge Coupled Devices) и интегрисана оптичка кола, ови сензори се такође могу уградити у комплексне системе мерења и обраде података. Они се могу користити у системима за *in situ* мониторинг и детекцију и за бежично (даљинско) читавање и праћење у токсичном окружењу, укључујући откривање агенаса за вођење хемијског рата и детекцију мина у земљишту. О актуелности сензора са површинским таласима, који су предмет истраживања у овој дисертацији сведочи и податак да се у системима контроле загађења испарљивим органским материјама у просторијама где се праве сателитске и васионске летилице у САД-у, NASA, користе сензорски системи базирани на ПАТ сензорима. Имајући у виду актуелан тренд употребе сензора на бази ПАТ филтара у савременим сензорским системима за детекцију и мерење од посебне је важности њихово моделовање како би се добили оптимални сензори за одговарајућу примену.

Оригиналност ове дисертације се заснива на формирању: (1) електромеханичког еквивалентног модела трансверзалног ПАТ филтра као хемијског гасног сензора и (2) алгорита за комплетно пројектовање филтра са површинским акустичким таласом са максималним пропусним опсегом и минималним слабљењем у пропусном опсегу, који је основа за имплементацију сензора. Као резултат добијен је оригиналан метод анализе хемијског гасног сензора за откривање гасова који узима у обзир утицај својства реалног сензора са површинским акустичким таласом, као што је слабљење услед простирања, оригиналан софтвер за пројектовање маске интердигиталних претвараача филтра са константним групним кашњењем, као и оригинална реализација конкретног филтра.

У оквиру дисертације кандидат је демонстрирао оригиналну процедуру анализе савремених хемијских гасних сензора на вишеслојним подлогама. У оквиру процедуре развијена је и оригинална метода за одређивање ефективне брзине таласа у вишеслојној подлози заснована на предложеном моделу, што је неопходно за одређивање концентрације гаса преко централне учестаности ПАТ елемента.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У току израде дисертације кандидат је детаљно проучио доступну литературу. У дисертацији је наведено 78 референци, од тога 12 књига, 47 радова у часописима, 16 радова у конференцијским зборницима и три техничка решења. Прва референца је из 1969. године, док је 35 референци из последњих десет година. Међу овим референцама се налази и 8 референци самог кандидата. Све ове референце адекватно покривају најважније резултате релевантне за ову дисертацију.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У овој дисертацији су коришћене различите научне методе. За анализу рада елемената са површинским акустичким таласом коришћене су три групе метода. Прву групу чине методе

тачне анализе базиране на таласној једначини. За ПАТ елементе са сложенијим интердигиталним претвараачима коришћене су методе апроксимативне анализе: помоћу модела са делта функцијама и анализа помоћу еквивалентних кола.

Један од главних задатака у анализи хемијских ПАТ сензора је добијање формула које повезују промене електричних сигнала у функцији концентрације неког хемијског агенса. Постојећи методи анализе хемијских гасних ПАТ сензора су углавном засновани на публикованим формулама добијеним из таласне једначине, у којима су занемарена многа својства реалне ПАТ линије за кашњење. То је разлог што истраживачи изводе много више експеримената него што је потребно, као и што имају тешкоће у објашњавању одступања између очекиваних и измерених вредности. У циљу превазилажења оваквих проблема предложен је нов метод анализе заснован на електричним еквивалентним колима где тачност зависи од комплексности примењеног модела. Гасни сензор се моделује као мрежа са два приступа (четворопол) у којој се издвајају три независне подмреже: улазни претвараач, линија за кашњење (покривена материјалом који је осетљив на гасове, а то је танак слој полимера) и излазни претвараач. Свака подмрежа се даље представља заменским колом. Помоћу предложеног модела се добијају експлицитни аналитички изрази у затвореном облику за естимацију концентрације гаса. За проверу рада сензора коришћена је метода симулације, заснована на предложеном моделу, и поређења са експерименталним резултатима добијеним мерењем. Представљени су случај предикције масене осетљивости као функције учестаности, као и пример у коме се симулира слабљење услед простирања на вишим учестаностима.

Развијени алгоритам служи за пројектовање једне врсте ПАТ филтара – трансверзалног РФ ПАТ филтра пропусника опсега учестаности који реализује линеарну фазну карактеристику и уз то испуњава посебне захтеве у погледу кашњења, који налазе примену у сензорским системима и обради сигнала. Филтар се моделује као каскадна веза два бидирекциона униформна интердигитална претвараача. У алгоритму је имплементиран метод синтезе заснован на импулсном моделу ПАТ претвараача. Помоћу овог модела одређују се преносна функција, радијациона кондуктанса, акустичка сусцептанса, унесено слабљење, и други електрични параметри у алгоритму. Метод укључује оптимизацију броја електродних парова за остварење минималног слабљења у пропусном опсегу и величине апертуре претвараача.

С обзиром на то да стандардни програми за израду маске интердигиталних претвараача нису расположиви, за ову намену је развијен нов софтвер IDPMPAT ver. 1.0, писан у програмском језику *Mathematica*. Користећи овај софтвер направљен је лабораторијски прототип ПАТ филтра пропусника опсега учестаности са минималним слабљењем на подлози од СТ – кварца. Карактеристике овог филтра су проверене мерењем фреквенцијске карактеристике прототипа и поређењем пројектованих и измерених вредности.

Успешно испуњење постављених циљева сведочи о адекватној употреби научних метода у овом истраживању.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати дисертације имају двојаку примену. На једној страни, моделовање ПАТ линије за кашњење за различите премазе, као есенцијални део сензора, отвара нове могућности у конструкцији сензора који се могу применити у биомедицини и заштити животне средине. На другој страни разрађена је нова комплетна метода пројектовања и реализације РФ ПАТ филтара са константним групним кашњењем и минималним слабљењем у пропусном опсегу који су база за израду сензора и који су вишенаменски и могу се употребити у обради сигнала и телекомуникационим системима као међуфреквенцијски филтри.

Појединачни резултати проистекли из истраживања у оквиру ове дисертације имају потенцијалну примену у различитим областима технике. Развијени метод анализе и

моделовања хемијских ПАТ сензора има директну примену у пројектовању нових сензора где се захваљујући моделовању рационализује цео поступак и скраћује време пројектовања. Технологија израде савремених сензора прати развој нових токсичних материја које се користе као хемијско оружје или су нежељени продукти у хемијској индустрији. Применом предложене методе у развоју нових сензора може се допринети развоју сопствених детектора хемијских агенаса и на тај начин елиминисати зависност од увозних технологија у области детекције и заштите од токсичних материја код нас.

Изложени метод се може употребити за моделовање ПАТ сензора у коме се као осетљиви слој користи танки филм нанокмпозитног материјала на бази проводног полианилина за детекцију штетних гасова који се јављају у индустрији као што су  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{COCl}_2$ . Предложени начин анализе се такође може успешно применити у војне сврхе, за предикцију детектоване концентрације и идентификацију бојних отрова. Приказани модел и метод израчунавања брзине таласа у нехомогеној подлози, могу се употребити за пројектовање оптималних хемијских гасних сензора на вишеслојним подлогама, с обзиром на осетљивост сензора или захтевану површину на сензорском чипу.

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

Кандидат је у својој дисертацији показао систематичност, упорност, креативност, самосталност и зрелост. Област којом се бави ова дисертација као и проблем који се у њој решава је веома актуелан и добијени резултати унапређују постојећа решења. Доприноси у овој дисертацији су оригинални и потврђују способност кандидата за самостални научноистраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Резултати истраживања ове дисертације садрже следеће доприносе:

- нов модел и метод анализе хемијских гасних сензора са површинским акустичким таласима; проблем одређивања промене излазног електричног сигнала у функцији концентрације хемијског агенса је решен коришћењем електромеханичког еквивалентног модела; у предложеном моделу сензор се представља као четворопол, интердигитални претварачи се представљају мрежом са три пара крајева, а линија за кашњење прекривена осетљивим слојем мрежом са два пара крајева; као резултат анализе добијају се изрази који дају промену излазног напона или учестаности у функцији концентрације гаса; анализиран је и утицај особина реалног ПАТ сензора, као што је слабљење услед простирања, које се у постојећим познатим методама анализе занемарује; добијени су експлицитни изрази за естимацију концентрације гаса; изрази директно повезују концентрацију гаса, параметре подлоге, и централну учестаност; они омогућују непосредан увид у утицај параметара пројектовања сензора на перформансе сензора као и веома ефикасну предикцију напонског и фреквенцијског помака због концентрације гаса у окружењу; приказани метод се може употребити за пројектовање оптималног сензора за дати гас; овај резултат је објављен у часопису међународног значаја,
- нов приступ, заснован на примени предложеног метода, у анализи и моделовању трансверзалних ПАТ хемијских гасних сензора на нехомогеним подлогама, уграђених у сложене електронске системе у MEMS или CMOS технологији, или када се сензор реализује са дијамантским слојем на површини силицијумског интегрисаног кола; развијена процедура се састоји из два корака: у првом кораку је одређена ефективна брзина таласа у вишеслојној подлози, што је неопходно за одређивање концентрације гаса; израз за брзину таласа у

сложеној ПАТ структури у коначној форми је изведен применом предложеног модела, формирањем еквивалентне електромеханичке шеме линије за кашњење без осетљивог слоја и коришћењем аналогije између механичких и електричних величина; израз експлицитно повезује брзину таласа, параметре слојева (густина, дебљина) и таласну дужину која одговара централној учестаности и која је основни параметар у анализи; у наредном кораку је презентирано одређивање концентрације детектованог гаса ПАТ сензором са вишеслојном структуром коришћењем израза изведених у предложеном методу анализе; развијена процедура омогућује реализацију сензора са мањим димензијама уз вишу радну учестаност, посебно на дијаманту, што повећава осетљивост сензора; овај резултат се први пут објављује у тези,

- алгоритам за комплетно пројектовање једне врсте ПАТ филтара – трансверзалног РФ ПАТ филтра пропусника опсега учестаности са униформним претварачима са максималним пропусним опсегом са минималним слабљењем, који налазе примену у сензорским системима и обради сигнала; унапређена процедура пројектовања садржи кораке који се односе на оптимизацију броја електродних парова, неопходну за синтезу филтра са минималним слабљењем који је посебно погодан за реализацију сензора, одређивање вредности елемената мрежа за прилагођење и оптимизацију апертуре претварача.
- софтвер IDPMPAT ver. 1.0, за пројектовање маске интердигиталних претварача ПАТ филтара пропусника опсега учестаности са минималним слабљењем; у оквиру софтвера RFIFSAWFilter, за пројектовање и анализу ПАТ филтара, посебан случај је софтвер за пројектовање филтара са униформним (неаподизованим) претварачима; тај софтвер је основа за израду маске интердигиталних претварача ПАТ филтра пропусника опсега,
- израда лабораторијског прототипа ПАТ филтра пропусника опсега учестаности са минималним слабљењем и експериментална верификација карактеристика филтра мерењем одзива на лабораторијском прототипу; прототип је ПАТ РФ филтар са идентичним униформним претварачима, са максималним пропусним опсегом и минималним слабљењем који треба да омогући имплементацију сензора наношењем филма од полимера између претварача.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати до којих је кандидат дошао имају и теоријску и практичну примену.

Јединствена одлика новог, оригиналног метода анализе је скуп аналитичких израза који експлицитно повезују концентрацију гаса, параметре подлоге, и централну учестаност. Захваљујући примењеном моделу и приступу у анализи омогућен је бољи увид у рад сензора и стога ефикасније пројектовање сензора за испитивани гас. Поред тога метод је универзалан јер може да се примени на различите врсте подлога које се данас користе за израду сензора, као и на било који полимер и гас. Применом развијеног метода могуће је оптимизовати хемијски гасни ПАТ сензор. Наиме, захваљујући изведеним аналитичким изразима који показују утицај параметара сензора на величину промена излазног сигнала (напона или учестаности) могуће је извршити избор адекватне подлоге ПАТ елемента као и избор адекватног осетљивог слоја према врсти гаса који се детектује. Такође, у овом приступу се анализира и утицај особина реалног ПАТ филтра, као што је слабљење услед простирања и узимају се у обзир услови прилагођења на електричним приступима сензора, што се у постојећим познатим методама анализе занемарује.

Применом развијеног метода анализе и моделовања на ПАТ хемијске гасне сензоре са вишеслојном структуром постижу се значајне предности: (1) реализација сензора са мањим димензијама уз вишу радну учестаност, посебно на дијаманту, што повећава осетљивост сензора, (2) развој сензора постављеног на подлози од Si односно  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  што је савремена технологија, (3) добија се компактан сензор (интегрисани) на мањој површини заузећа подлоге, (4) омогућује се одређивање концентрације гаса на вишеслојној подлози

захваљујући оригиналном начину израчунавање ефективне брзине простирања таласа у пиезоелектричном материјалу. Поступак одређивања брзине таласа у вишеслојној подлози заснива се на претпоставци да је дебљина горњих слојева много мања од таласне дужине сигнала што није ограничавајући фактор будући да се већина сензора пројектује са акустички танким слојевима. Међутим, расположива технологија за израду прототипа филтра за хемијски гасни сензор представља ограничавајући фактор у реализацији, због несавршености технолошког поступка израде интердигиталних претварача.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је објавио више радова везаних за тезу, чији су резултати непосредно ушли у тезу или су тесно везани са истраживањима у тези.

Рад у часопису са SCI листе, за који се рачуна Impact Factor, чији су резултати непосредно ушли у тезу (Категорија M23):

- 1.1 **Z. Živković**, M. Hribšek, D. Tošić: "Modeling of Surface Acoustic Wave Chemical Vapor Sensors", *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, ISSN 0352-9045, vol. 39, no. 2, pp. 111–117, June 2009. **IF (2010) 0.250**

Радови изложени на научним скуповима међународног значаја и штампани у целини у зборницима радова (Категорија M33):

- 2.1 M. Hribšek, S. Ristić, **Z. Živković**, D. Tošić: "Modelling of SAW Biosensors", in Proc. BIODEVICES 2009 – *International Conference on Biomedical Electronics and Devices*, Porto, Portugal, pp. 376–379, Jan. 14–17, 2009.
- 2.2 M. Hribšek, D. Tošić, M. Tasić, Z. Filipović, **Z. Živković**: "Design and Realization of Transversal Surface Acoustic Wave RF filters", in Proc. ECCSC'10 – *5th European Conference on Circuits and Systems for Communication*, Belgrade, Serbia, pp. 82–85, Nov. 23–25, 2010.

Радови у часописима (Категорија M52):

- 3.1 **З. Живковић**: "Процесирање сигнала колима са површинским акустичким таласима", *Научнотехнички преглед*, вол. LI, бр. 2, стр. 30–35, 2001.
- 3.2 **З. Живковић**: "Аналогни процесори са површинским акустичким таласима", *Научнотехнички преглед*, вол. LII, бр. 1, стр. 80–85, 2002.

Радови у часописима (Категорија M53):

- 3.3 M. Хрибшек, Д. Тошић, **З. Живковић**: "Хемијски гасни сензори са површинским акустичким таласом", *Техника, Електротехника* 58, вол. 64, бр. 2, стр. 7–12, 2009.
- 3.4 **З. Живковић**: "Развој и примена елемената с површинским акустичким таласима", *Научнотехничка информација*, вол. 38, бр. 10, стр. 11–50, (Војнотехнички институт, ISSN 1820-3418), Београд, 2004. Посебно издање часописа.

Радови изложени на научним скуповима националног значаја и штампани у целини у зборницима радова (Категорија M63):

- 4.1 **З. Живковић**, М. Хрибшек: "Примене нелинеарних ПАТ елемената у процесирању сигнала", Зборник XLV Конференције *ЕТРАН*, Буковичка бања, вол. I, стр. 131–134, 4–7. јун, 2001.
- 4.2 **З. Живковић**: "Неки аспекти пројектовања и примене филтара са површинским акустичким таласима", Зборник XLVI Конференције *ЕТРАН*, Бања Врућица – Теслић, вол. I, стр. 107–110, 3–6. јун, 2002.
- 4.3 **З. Живковић**: "Нелинеарни ПАТ елементи у телекомуникацијама", Зборник XXIX *Симпозијума о операционим истраживањима* SYM-OP-IS, Оморица – Тара, стр. XXIII–38 – XXIII–41, 9–12. октобар, 2002.
- 4.4 **З. Живковић**: "ПАТ сензори и њихова примена", Зборник XLVII Конференције *ЕТРАН*, Херцег-Нови, вол. III, стр. 424–427, 8–13. јун, 2003.
- 4.5 **З. Живковић**: "ПАТ процесори и њихова примена", Зборник XXX *Симпозијума о операционим истраживањима* SYM-OP-IS, Херцег – Нови, стр. 781–784, 30. септембар – 3. октобар, 2003.
- 4.6 **З. Живковић**: "Један осврт на ефекте рефлексije у интердигиталним претварачима", Зборник XLVIII Конференције *ЕТРАН*, Чачак, вол. I, стр. 143–146, 6–10. јун, 2004.
- 4.7 **З. Живковић**: "Микроскен пријемници са оптимизованим временско-фреквенцијским одзивом", Зборник XXXI *Симпозијума о операционим истраживањима* SYM-OP-IS, Норцев Фрушка Гора, стр. 645–650, 4–7. октобар, 2004.
- 4.8 **З. Живковић**: "Једна примена ПАТ мултиплексера у радарима", Зборник XLIX Конференције *ЕТРАН*, Будва, вол. III, стр. 445–448, 5–10. јун, 2005.
- 4.9 **З. Живковић**: "Обрада сигнала у телекомуникацијама нелинеарним ПАТ елементима", Зборник *Симпозијума одбрамбених технологија* ОТЕХ, Београд, стр. VI–20 – VI–23, 6–7. децембар, 2005.
- 4.10 **З. Живковић**: "ПАТ процесори за аналогу обраду сигнала", Зборник 50. Конференције *ЕТРАН*, Београд, вол. I, стр. 170–173, 6–8. јун, 2006.
- 4.11 **З. Живковић**, М. Хрибшек: "ПАТ процесори у комуникацијама", Зборник *Симпозијума одбрамбених технологија* ОТЕХ 2009, Београд, стр. 636–639, 8–9. октобар, 2009.

#### Техничка решења (Категорија М80):

- 5.1 **З. Живковић**, М. Хрибшек: Универзални софтвер за пројектовање недисперзивних ПАТ филтара, подтип решења: нови софтвер (М85), *пројекат технолошког развоја* ТР-11026 Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије, 2009.
- 5.2 **З. Живковић**, М. Хрибшек: Софтвер за пројектовање маске интердигиталних претварача ПАТ филтара пропусника опсега са минималним слабљењем, подтип решења: нови софтвер (М85), *пројекат технолошког развоја* ТР-11026 Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије, 2010.
- 5.3 М. Хрибшек, **З. Живковић**, М. Радосављевић: Лабораторијски прототип ПАТ филтра пропусника опсега учестаности са минималним слабљењем (ПАТ-ФПО), подтип решења: нови лабораторијски прототип (М85), *пројекат технолошког развоја* ТР-11026 Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије, 2010.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Предмет истраживања ове дисертације су направе са површинским акустичким таласом (ПАТ). Главни доприноси дисертације су нов модел и метод анализе једне класе хемијских гасних сензора. На основу предложеног модела и метода, развијен је нов приступ у анализи и моделовању трансверзалних ПАТ хемијских гасних сензора на нехомогеним подлогама. Такође, развијен је и алгоритам за пројектовање трансверзалног ПАТ филтра са минималним слабљењем и реализован је лабораторијски прототип филтра намењеног имплементацији сензора. Дисертација је написана јасно и разумљиво, а у складу са стандардима Електротехничког Факултета и Универзитета у Београду.

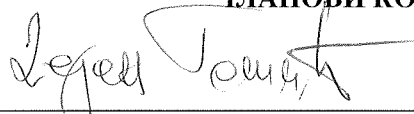
Комисија констатује да дисертација испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације на Електротехничком факултету у Београду.

Комисија сматра да докторска дисертација мр инж. Здравка Живковића садржи оригиналне научне доприносе који могу имати практичну примену у области електронике. За очекивати је да развијене методе анализе, моделовања и пројектовања ПАТ елемената са посебним особинама уђу у инжењерску праксу.

У складу са претходним, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Филтри са површинским акустичким таласом за хемијске гасне сензоре” кандидата мр инж. Здравка Живковића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

5. фебруар 2014. године

**ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ**



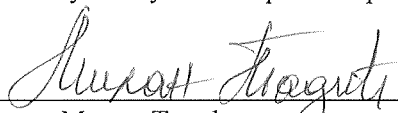
др Дејан В. Тошић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Миодраг Поповић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Злата Цветковић, редовни професор  
Универзитет у Нишу – Електронски факултет



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



др Милка Потребих, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет