

## ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовao комисију Решењем бр. 012-199/34-2015 од 07.07.2016. године, на основу Одлуке Научно-наставног већа, а у складу са Статутом Факултета техничких наука, декан Факултета техничких наука, проф. др Раде Дорословачки, именовao је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације</p> <p>2. Састав комисије са знаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p>1. <b>др Љиљана Живанов</b>, редовни професор, ужа област Електроника, изабрана у звање 01.01.2000. године, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>2. <b>др Александар Менићанин</b>, виши научни сарадник, ужа научна област Електроника, изабран у звање 26.04.2016. године, Институт за мултидисциплинарна истраживања, Универзитет у Београду, Београд</p> <p>3. <b>др Милољуб Луковић</b>, научни саветник, ужа научна област Микроелектроника и електротехнички материјали, изабран у звање 28.09.2016. године, Институт за мултидисциплинарна истраживања, Универзитет у Београду, Београд</p> <p>4. <b>др Јелена Радић</b>, доцент, ужа област Електрична мерења и метрологија, изабрана у звање 25.09.2015. године, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>6. <b>др Мирјана Дамњановић</b>, редовни професор, ужа област Електроника, изабрана у звање 7. 10. 2016. године, Факултет техничких наука, Нови Сад</p>
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Милица, Гашо, Кисић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: 12.03.1987, Требиње, Република Српска, БиХ</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив: Факултет техничких наука, Нови Сад, Енергетика, електроника и телекомуникације, Дипломирани инжењер - мастер електротехнике и рачунарства</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија 2010. година, Енергетика, електроника и телекомуникације</p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: нема</p>
<p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: нема</p>

### III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Хетерогено интегрисани пасивни индуктивни сензори

### IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са знаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Научни приказ истраживања за реализацију постављених циљева дисертације кандидаткиња је представила на 125 страна, кроз 9 (девет) поглавља. Дисертација садржи 112 слика, 11 табела и списак литературе са 96 референци.

Докторска дисертација под насловом „Хетерогено интегрисани пасивни индуктивни сензори“ се састоји из следећих поглавља:

1. Увод
  2. Мјерни системи и сензори
  3. Структура индуктор-ферит за сензорске примјене
  4. Хетерогено интегрисани индуктивни сензор силе
  5. Хетерогено интегрисани индуктивни сензор притиска
  6. Хетерогено интегрисани индуктивни сензор помјераја
  7. Дискусија
  8. Закључак
- Литература

### V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

У дисертацији је приказано теоријско и практично истраживање које се односи на пројектовање и карактеризацију хетерогено интегрисаних индуктивних сензора за мерење силе, притиска и помераја. Циљ истраживања докторске дисертације је комбиновање различитих технологија израде и материјала, како би се пројектовали сензори који ће бити конкурентни актуелним решењима, и који би се могли користити за конкретне примене. У оквиру истраживања, хетерогеном интеграцијом су комбиноване предности технологије штампаних плоча (*Printed Circuit Board PCB*), флексибилне технологије и технологије нискотемпературне заједно-печене керамике (*Low-Temperature Co-fired Ceramics – LTCC*).

У 1. поглављу су дата уводна разматрања, дефинисани су предмет, проблем и циљ истраживања.

У поглављу 2 је дат преглед различитих сензора и метода за мерење силе, притиска и помераја. Приказано је стање у области, као и могућности и ограничења о којима треба водити рачуна при конкретним применама сензора у стварном свету и индустријским применама.

У поглављу 3 је представљен модел структуре индуктор-магнетски материјал, која се користила као основна структура за реализацију сензора. Испитани су различити облици индуктора, како би се предложила структура која има боље перформансе и која омогућава најједноставнији начин обраде сигнала. Након тога, приказан је принцип бежичног мерења сензора и електрични модел система (сензор-антена). Дато је пројектовање и фабрикација индуктора различитих облика (меандар и квадратна спирала). Приказан је утицај близине магнетског материјала на индуктивност и резонантну фреквенцију индуктора. На основу резултата мерења добијених у овом поглављу, предложен је дизајн индуктора који ће се користити за реализацију сензора.

Пројектовање индуктивног сензора за детектовање силе нормалне на површину сензора је представљено у поглављу 4. У овом поглављу је приказано пројектовање, поступак фабрикације и тестирање пасивног сензора силе. Осетљивост сензора на деловање силе је постигнута убацивањем еластичног материјала у структуру индуктор-ферит. Промене силе су детектоване бежичним мерењем минималне вредности фазе импедансе (односно мерењем резонантне фреквенције) система сензор-антена. Експериментални резултати су потврдили теоријску анализу, као и електромагнетске симулације. Тестирањем сензора одређена је карактеристика сензора и упоређена је са сличним сензорима који су доступни у литератури.

У поглављу 5 приказана је фабрикација сензора притиска са флексибилном мембраном. Овај

пасивни бежични сензор заснива свој рад на коришћењу полиимидне фолије. Како би се извршила карактеризација фабрикованог сензора, развијен је робустан држач са комором за тестирање. Сензор притиска је добијен хетерогеном интеграцијом, и комбинује PCB и LTCC делове са полиимидном фолијом. Испитани су различити облици индуктора, како би се предложио дизајн који може обезбедити побољшане перформансе сензора.

У поглављу 6 је анализирана могућност примене полиимидне фолије као мембране у сензорима (уређајима) за мерење помераја. Испитане су и упоређене перформансе хетерогено интегрисаних сензора са различитим димензијама феритних плочица. Модификацијом реализованог сензора, пројектован је и испитан сензор за мерење тангенцијалног помераја дуж једне осе.

У поглављу 7 приказана је дискусија. Анализирана су предложена решења. Наведене су предности, радни опсези, линеарност, као и ограничења пројектованих сензора.

У поглављу 8 дат је општи закључак дисертације и предлози за даља истраживања.

У последњем поглављу је наведена литература која се користила у овој докторској дисертацији. Коришћена литература је савремена и правилно одабрана према захтевима теме која се разматра.

## **VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ**

### **Рад у истакнутом међународном часопису (M22):**

1. Milica G. Kisić, Nelu V. Blaz, Kalman B. Babkovic, Andrea M. Maric, Goran J. Radosavljevic, Ljiljana D. Zivanov, Mirjana S. Damnjanovic: "Passive Wireless Sensor for Force Measurements", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 1, art. no. 4002004, pp. 1-4, 2015. (ISSN: 0018-9464, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2359334)

### **Рад у часопису међународног значаја верификован посебном одлуком (M24):**

2. Milica G. Kisić, Nelu V. Blaž, Kalman B. Babković, Andrea Marić, Goran J. Radosavljević, Ljiljana D. Živanov, Mirjana S. Damnjanović: "Performance Analysis of a Flexible Polyimide Based Device for Displacement Sensing", *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 2, pp. 287-296, 2015. (ISSN: 0353-3670, DOI: 10.2298/FUEE1502287K)

### **Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):**

3. Milica Kisić, Nelu Blaz, Kalman Babkovic, Ljiljana Zivanov, Mirjana Damnjanovic: "Inductive tangential displacement sensor", *Proc.39th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2016, 18-22 May 2016, Pilsen, Czech Republic*, pp. 433-438. (ISSN: 2161-2064, DOI: 10.1109/ISSE.2016.7563235)
4. Milica Kisić, Nelu Blaž, Bojan Dakić, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: "A Flexible Polyimide Based Device for Displacement Sensing", *Proc. 29th international conference on microelectronics, MIEL 2014, 12-15 May 2014, Belgrade, Serbia*, pp. 129-132. (ISBN: 978-1-4799-5295-3, DOI: 10.1109/MIEL.2014.6842102)
5. Milica Kisić, Nelu Blaž, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: "Influence of Coil Design on Sensing Performance of Pressure Sensor with Polyimide Membrane", *Proc. 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2014, May 7-11, 2014, Dresden, Germany*, pp. 421-426. (ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2014.6887637)

### **Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34):**

6. Milica Kisić, Nelu Blaž, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanovic: "Passive Wireless Sensor with Polyimide Membrane and Ferrite for Pressure Sensing Application", 20th International Magnetics Conference, INTERMAG 2014, 4-8 May, 2014, Dresden, Germany, pp. 947-948.

7. Milica Kisić, Nelu Blaž, Bojan Dakić, Andrea Marić, Goran Radosavljević, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović: "Passive Pressure Sensor with Ferrite Core on Polyimide Membrane", 21st International Conference on Soft Magnetic Materials, SMM21, 1-4 September 2013, Budapest, Hungary, pp 352.

**Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент (M85):**

8. Милица Г. Кисић, Нелу В. Блаж, Калман Б. Бабковић, Андреа Марић, Горан Ј. Радосављевић, Љиљана Д. Живанов, Мирјана С. Дамњановић: „Пасивни сензор помераја са полиимидном мембраном“, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, број пројекта: TP-32016, 2014.

9. Милица Кисић, Нелу Блаж, Андреа Марић, Горан Радосављевић, Љиљана Живанов, Мирјана Дамњановић: „Прототип држача са комором за испитивање сензора притиска“, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, број пројекта: TP-32016, 2013.

**VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА**

У оквиру истраживања у овој докторској дисертацији, испитана је структура индуктор-магнетски материјал, којом су реализовани хетерогено интегрисани сензори. Теоријске основе и принципи рада сензора су потврђени симулацијама и експерименталним резултатима. Испитан је утицај положаја феритне плочице која је постављена у близини индуктора на његове особине, односно утицај промене њихове међусобне удаљености на параметре сензора у које су уграђени (индуктивност и резонантну фреквенцију). У технологији штампаних плоча фабрикована су и тестирана два облика индуктора за процену и поређење њихових перформанси: облик меандар и квадратни спирални облик. Закључено је да квадратни спирални индуктор даје боље перформансе, већу осетљивост у поређењу са индуктором облика меандар, и што је најважније, да се може користити за бежично мерење положаја, коришћењем спољашњег индуктора – антене. Због тога, индуктор квадратног спиралног облика је изабран за реализацију сензора силе, притиска и помераја.

Интеграцијом еластичног материјала са индуктор-ферит структуром, реализован је сензор за мерење силе нормалне на површину сензора. Представљени сензор омогућава лако и прецизно бежично мерење силе уз економичан и једноставан процес израде, једноставну интеграцију и могућност модификације структуре сензора. Предложени сензор има велику осетљивост, мали хистерезис и добру линеарност у целом опсегу мерења; стога, нема потребе за додатним колима за детекцију, обраду сигнала и побољшање линеарности одзива сензора. Мерење силе је извршено до 75 N. Добијена осетљивост предложеног сензора (311 kHz/N) је значајно већа у поређењу са осетљивошћу других предложених сензора који су описани у литератури.

Анализирано је понашање полиимидне фолије као флексибилне мембране за реализацију сензора притиска и помераја. Прототип држача са комором је реализован са циљем да се омогући испитивање, тестирање и развој сензора уз репродуковање услова из реалних услова. Развијена је и одговарајућа мерна метода.

Додатно, пројектован је и хетерогеним процесом интеграције фабрикован индуктивни сензор притиска. Традиционалне фабрикационе технологије PCB и LTCC су комбиноване са

полиимидном фолијом како би се сензор фабриковао. Коришћењем полиимидне фолије дебљине 125  $\mu\text{m}$  омогућено је мерење притиска до 1,25 бара.

Испитан је утицај дизајна индуктора на перформансе сензора притиска. Тестирање реализованих сензора је показало да индуктори који имају већу површину и број намотаја показују значајно побољшање перформанси. На пример, систем са индуктором са 30 намотаја има 2,4 пута већу осетљивост (1,65 MHz/bar у опсегу 0-0,25 бара и 0,5 MHz/bar у опсегу 0,25-1,25 бара) у поређењу са системом истих спољашњих димензија ( $20 \times 20 \text{ mm}^2$ ) који има индуктор са 15 намотаја (4 MHz/bar у опсегу 0-0,25 бара и 1,2 MHz/bar у опсегу 0,25-1,25 бара).

Коришћењем исте структуре (PCB индуктор, LTCC феритни диск и комерцијално доступна полиимидна фолија), реализовани су пасивни индуктивни сензори помераја, у опсегу до 1200  $\mu\text{m}$ . Испитан је утицај два феритна диска различитих димензија (полупречника 6 mm и 9,5 mm) на перформансе сензора. Коришћењем структуре сензора са мањим феритним диском постигнута је осетљивост од 2,92 kHz/ $\mu\text{m}$ , док систем истих спољашњих димензија ( $19 \times 19 \text{ mm}^2$ ), али са већим феритним диском, показао је да је постигнута око 3 пута већа осетљивост (8,75 kHz/ $\mu\text{m}$ ).

Предложен је и дизајн индуктивног сензора за мерење тангенцијалних помераја. Мерни резултати прототипа сензора су показали да је помоћу развијеног система могуће мерити тангенцијално померање дуж једне осе до  $\pm 5 \text{ mm}$ , са осетљивошћу од 2,44 MHz/mm, која је знатно већа у односу на друге публиковане резултате.

#### **VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА**

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Тумачење добијених резултата је јасно и прегледно. Формирани закључци у раду су поткрепљени одговарајућим теоријским анализама и резултатима мерења, добијеним из сопствених експерименталних истраживања. Резултати су приказани исцрпно и прегледно, уз навођење претходних истраживачких резултата из ове области.

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме  
Да, дисертација је у целини написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе  
Да, дисертација садржи све битне елементе.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци  
У овој докторској дисертацији су предложене нове структуре сензора силе, притиска и помераја, које су добијене комбиновањем традиционалних технологија фабрикације (PCB и LTCC) са полиимидним фолијама. Пројектовани сензори имају бројне предности: омогућавају бeжично мерење, јефтине су, компактни и једноставни. Димензије хетерогено интегрисаних сензора су упоредиве са сензорима сличних намена који су описани у литератури. Дизајн реализованих структура сензора омогућава примену и других технологија израде, поред коришћених PCB и LTCC технологија. Развијени прототипови могу се лако модификовати у циљу примене других материјала (као што је на пример полидиметилсилоксан). Применом нових материјала и технологија израде отварају се нове могућности за реализацију сензора са другачијим карактеристикама и мерним опсезима.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања  
У дисертацији нису уочени значајни недостаци који би утицали на резултат истраживања.

<b>X ПРЕДЛОГ:</b>
На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:
- да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана
Комисија позитивно оцењује докторску дисертацију под насловом „Хетерогено интегрисани пасивни индуктивни сензори“ и предлаже да се Извештај о оцени докторске дисертације прихвати, а кандидаткињи одобри одбрана.

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ  
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

У Новом Саду, 11.10.2016. године

---

Др Љиљана Живанов, редовни професор,  
председник

---

Др Александар Менићанин, виши научни  
сарадник, члан

---

Др Милољуб Луковић, научни саветник, члан

---

Др Јелена Радић, доцент, члан

---

Др Мирјана Дамњановић, редовни професор,  
ментор

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.