

## 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
1. Датум и орган који је именовео комисију <b>29.03.2018. решењем бр. 012-199/36-2017, Наставно-научно веће Факултета техничких наука</b> 2. Састав комисије са назнаком 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: 1. <b>др Иван Мезен</b> , ванредни професор, уно Електроника, изабран у звање 20.12.2017, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду 2. <b>др Дејан Драјић</b> , ванредни професор, уно Телекомуникације, изабран у звање 01.10.2017, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду 3. <b>др Јован Бајић</b> , доцент, уно Електроника, изабран у звање 01.10.2016, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду 4. <b>др Дејан Убавин</b> , ванредни професор, уно Инжењерство заштите животне средине, изабран у звање 12.07.2017, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду 5. <b>др Мирјана Дамњановић</b> , редовни професор, уно Електроника, изабрана у звање 07.10.2016, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
1. Име, име једног родитеља, презиме: <b>Живорад, Радослав, Михајловић</b> 2. Датум рођења, општина, држава: <b>28.12.1981, Косовска Митровица, Република Србија</b> 3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив: <b>Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Енергетика, електроника и телекомуникације, Дипломирани инжењер - мастер електротехнике и рачунарства</b> 4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија: <b>2011. година, Енергетика, електроника и телекомуникације</b> 5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: <b>нема</b>
6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: <b>нема</b>
III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:
<b>Самонапајајући чворови бежичних сензорских мрежа за праћење параметара животне средине</b>

#### **IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

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

Докторска дисертација је написана на 112 стране. Садржи 8 поглавља, 6 табела, 75 слике и 113 навода из литературе. Кључна документација је написана на српском и енглеском језику.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод
2. Бежичне сензорске мреже и животна средина
3. Самонапајајуће бежичне сензорске мреже
4. Пројектовање наменског самонапајајућег бежичног сензорског чвора
5. Експериментална верификација пројектованог решења
6. Дискусија
7. Закључак
8. Литература

#### **V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Научна расправа која је изложена у дисертацији бави се анализом, пројектовањем и тестирањем електронског система у области бежичних сензорских мрежа за праћење параметара животне средине, а који се карактерише могућношћу прикупљања енергије из околине.

*Комисија сматра да је наслов дисертације јасно формулисан и да јасно указује на предмет истраживања и садржај рада у оквиру дисертације.*

##### **Прво поглавље**

Ово поглавље представља увод у којем је кандидат указао на значај и потребу коришћења самонапајајућих бежичних сензорских мрежа у области праћења параметара животне средине. Дефинисани су предмет и циљ истраживања, са нагласком на очекиване резултате.

*Комисија сматра да су проблем, предмет и циљ истраживања у дисертацији постављени концизно и јасно и да су успешно водили кандидата кроз рад на изабраној теми.*

##### **Друго поглавље**

У другом поглављу дисертације кандидат је дао преглед литературе и теоријску анализу о важности употребе бежичних сензорских мрежа у области заштите животне средине. Објашњено је шта се подразумева под праћењем параметара животне средине и дати су репрезентативни примери параметара који се често прате у води, ваздуху и земљишту. Размотрено је тренутно стање у области коришћења бежичних сензорских мрежа за праћење параметара животне средине. Приказане су специфичности појединих мрежа које су пројектоване за сличне примене. Анализирана је потрошња енергије и њен утицај на животни век бежичне сензорске мреже. Како је циљ постизање што дужег животног века, приказане су могуће методе за његово продужење.

*Комисија сматра да изнети теоријски материјал омогућава да се у потпуности сагледају и разумеју изазови и важност примене бежичних сензорских мрежа у области праћења животне средине. Наглашена је важност животног века мрежа и његовог продужења.*

##### **Треће поглавље**

У трећем поглављу кандидат је извршио детаљну анализу самонапајајућих бежичних сензорских мрежа. Анализирана је потрошња и извори напајања бежичног сензорског чвора као основне јединице бежичне сензорске мреже. Представљене су погодности коришћења процеса прикупљања енергије из околине. Дефинисан је генерички систем за прикупљање енергије из околине и описани његови основни делови. Разматран је избор прикупљања соларне енергије из околине и анализиран систем базиран на фотонапонској ћелији као прикупљачу енергије, као и утицај на одрживост бежичног сензорског чвора у смислу напајања. Извршена је анализа актуелних елемената за складиштење енергије, са нагласком на тренутно актуелни суперкондензатор. Затим је анализирано неколико репрезентативних решења из литературе, са њиховим предностима и манана, која су базирана на прикупљању соларне енергије из околине и складиштењу енергије у суперкондензатору.

*На основу изнетих опсежних теоријских разматрања о процесу прикупљања соларне енергије из*

*околина и суперкондензатора за складиштење енергије, Комисија је мишљења да је хипотеза истраживања јасно формулисана у односу на постављене циљеве истраживања, те да је предложено решење у складу са изнетом хипотезом. Такође, комисија сматра да је од посебног значаја спроведена теоријска анализа актуелних самонапајајућих бежичних сензорских чворова.*

#### **Четврто поглавље**

У четвртом поглављу, након дефинисања основних захтева, дат је поступак пројектовања новог самонапајајућег бежичног сензорског чвора. Поступак обрађује анализу и избор кључних компоненти система, са циљем да се реализује што квалитетније решење за област праћења параметара животне средине. Посебно су анализиране карактеристике и могућности суперкондензатора, као компоненте која доминантно утиче на перформансе и животни век пројектованог бежичног сензорског чвора. Анализиране су основне карактеристике пројектованог решења, као што су цена, потрошња, позданост, могућност проширивања функционалности и утицај на животну средину. Разматрана су ограничења пројектованог решења и предложено је унапређено решење које их превазилази и проширује могућности коришћења у области примене.

*Дефинисани захтеви за пројектовање бежичног сензорског чвора и планови за њихово остваривање су у складу са применом у области праћења параметара животне средине. Комисија је мишљења да је поступак пројектовања јасно објашњен и да су резултати анализе пројектованог бежичног сензорског чвора сврсисходно издвојени у циљу дефинисања основних перформанси решења у области примене. Поступак избора кључних компоненти је произашао из проучавања сличних решења у литератури и објашњава како је постигнута мала цена и димензије решења, поузданост, прилагодљивост различитим применама и минималан утицај на животну средину. Предности и мане пројектованог чвора су јасно наведене, а описан је и унапређени бежични сензорски чвор који превазилази уочена ограничења и проширује могућност примене у области праћења животне средине.*

#### **Пето поглавље**

У петом поглављу је приказано тестирање рада пројектованог чвора, које је обухватало проверу одрживости напајања заснованог на прикупљању енергије из околине коришћењем фотонапонске ћелије, као извора, и суперкондензатора, као елемента за складиштење енергије. Приказана је и анализа могућности проширивања функционалности коришћењем комерцијалних и наменски пројектованих сензора. Измерено је време пражњења суперкондензатора у зависности од учестаности слања података, као и време пуњења суперкондензатора у различитим временским условима. Додатно, извршено је континуално тестирање рада чвора у трајању од 48 сати.

Описан је поступак проширивања функционалности бежичног сензорског чвора. Поред уграђених сензора за мерење температуре, притиска и влажности ваздуха, чвор је надограђен, у првом примеру, сензорима за мерење концентрације озона, а у другом, наменски пројектованим сензором за мерење нивоа течности.

Изложене су карактеристике и предности унапређеног бежичног сензорског чвора у односу на основно (првобитно) решење, описано је његово понашање у раду и анализиране су потенцијалне могућности његовог даљег унапређења.

*Комисија сматра да је спроведено тестирање пројектованог бежичног сензорског чвора потврдило очекивану одрживост напајања коришћењем фотонапонске ћелије као прикупљача енергије и суперкондензатора као елемента за складиштење. Тестирање је показало да се контролом учестаности слања података може обезбедити рад бежичног сензорског чвора у току целе ноћи, до следећег циклуса пуњења. При неповољним временским условима, суперкондензатор се напуни за свега некилоко минута, а тестирање рада у трајању од 48 сати је показао исправан рад чвора, без прекида. Описани поступци прикључивања комерцијалних и наменски пројектованих сензора показују да се функционалност чвора једноставно може проширити. Модуларност унапређеног бежичног сензорског чвора знатно проширује могућности првобитног решења, и то по незнатно већој цени.*

#### **Шесто поглавље**

У шестом поглављу је дата дискусија добијених резултата мерења и постигнутих карактеристика самонапајајућег сензорског чвора.

*На основу теоријске анализе и тестирања, спроведена је свеобухватна дискусија пројектованог бежичног чвора и добијених резултата. Наведене су предности решења у односу на слична из*

литературе, као и његова ограничења у примени. Такође, дате су смернице за даља унапређења и истраживања у области.

#### **Седмо поглавље**

У седмом поглављу су изнети закључци о оствареним резултатима истраживања.

*Комисија сматра да су закључци донети на бази изложених резултата и да потврђују значај развијеног самонапајајућег бежичног сензорског чвора за праћење параметара животне средине.*

#### **Осмо поглавље**

Осмо поглавље садржи списак коришћене литературе.

*Комисија сматра да је коришћена литература актуелна и правилно одабрана према теми истраживања.*

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

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ISI листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

#### **Рад у међународном часопису (M23)**

1. **Živorad Mihajlović**, Vladimir Milosavljević, Ana Joža, Vladimir Rajs, Mirjana Damnjanović, Miloš Živanov, „Surface and Underground Water Level Monitoring Using Wireless Sensor Node with Energy Harvesting Support“, Elektronika Ir Elektrotehnika, 2016, Vol. 22, No 5, pp. 62-68, ISSN 1392-1215.

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

1. **Živorad Mihajlović**, Ana Joža, Vladimir Milosavljević, Vladimir Rajs, Miloš Živanov, „Energy Harvesting Wireless Sensor Node for Monitoring of Surface Water“, 21. International Conference on Automation and Computing (ICAC), Glasgow: University of Strathclyde, Glasgow, UK, 11-12 Septembar, 2015, pp. 102-107, ISBN 978-0-9926801-0-7.
2. **Živorad Mihajlović**, Vladimir Milosavljević, Dragana Vasiljević, Ana Joža, Vladimir Rajs, Miloš Živanov, „Implementation of Wearable Energy Harvesting Wireless Sensor Node using Ink-Jet Printing on Flexible Substrate“, 5. Mediterranean Conference on Embedded Computing - MECO, Bar: Univ. of Montenegro, 12-16 June 2016, pp. 100-103, ISBN 978-9940-9436-6-0.
3. **Živorad Mihajlović**, Vladimir Milosavljević, Ana Joža, Mirjana Damnjanović, „Modular WSN Node for Environmental Monitoring with Energy Harvesting Support“, 2. IEEE Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference - ZINC, Novi Sad: RT-RK Institute for Computer Based Systems, 31-1 Jun, 2017, pp. 47-50, ISBN 978-1-5386-0865-4.

#### **Рад у научном часопису (M53)**

1. Juhas Đorđe, Vladimir Rajs, **Živorad Mihajlović**, „Pametni nosivi uređaj sa prikupljanjem energije iz okoline za praćenje parametara u okruženju korisnika“, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2016, No 15/2016, pp. 3121-3124, ISSN 0350-428X.

## VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Главни резултат истраживања представљених у овој дисертацији је доказ хипотезе која се темељи на идеји да је могуће реализовати бежични сензорски чвор за праћење параметара животне средине који се одликује малом ценом и димензијама, робусношћу и поузданошћу, мултифункционалношћу и минималним утицајем на животну средину и да је такав систем у потпуности одржив у смислу напајања коришћењем процеса прикупљања соларне енергије из околине и минијатурног суперкондензатора као складишта.

Услед специфичне примене у области животне средине, извршена је анализа која је допринела квалитетном избору кључних компоненти бежичног сензорског чвора, тако да је остварена цена од око 20 евра драстично нижа од сличних комерцијалних решења. Пројектовани бежични сензорски чвор се одликује веома малом потрошњом, у опсегу од 6 до 9  $\mu\text{A}$ , која је упоредива или мања у односу на слична решења. Ово је веома битна особина чвора за примене у праћењу параметара животне средине, где је расположива енергија често веома ограничена.

Модуларност сензорског подсистема, тј. присуство главне и додатне штампане плоче, доприноси лако проширивању и мењању функционалности чвора. Овакав приступ омогућава да се развијени фирмвер минимално мења и да микроконтролер на главној плочи врши управљање енергијом.

Минијатурни дизајн је једна од главних предности пројектованог чвора, нарочито у поређењу са сличним решењима. Велика уштеда у простору је постигнута наменским дизајном, који се темељи на оптималном избору кључних компоненти. Компоненте на којима је постигнута највећа уштеда у простору су супекондензатор и фотонапонска ћелија. Коришћени суперкондензатор има капацитивност од само 0,47 F, што је драстично мање од већине решења проучених у литератури. Такође, минијатурна фотонапонска ћелија снаге 300 mW, иако предимензионисана због нестабилности извора соларне енергије, са димензијама од 6 cm  $\times$  6 cm, представља минијатурно решење, а уједно и дефинише изглед кућишта које има облик коцке странице 6 cm. У поређењу са сличним решењима у литератури, кућиште је и четири пута мање. Смањивање утицаја чвора на саму животну средину је постигнуто и тиме што се уместо штетних батерија користе суперкондензатори који су направљени од еколошких материјала. Минијатурно кућиште штеди материјал, лако се инсталира на терену и током инсталације ремети само мали део средине.

Због природе извора соларне енергије, који је неконтролисан али предвидљив (тј. због циклуса дана и ноћи), неопходно је користити што ефикасније елементе за складиштење енергије. Анализом је утврђено да су суперкондензатори боље решење у односу на пуњиве батерије, пре свега због дужег века трајања, великог броја циклуса пуњења и бољег понашања при екстремним температурама средине. Изабрани суперкондензатор се карактерише планарним дизајном који доприноси дужем веку трајања услед минимизације ефеката исушива и старења, а доприноси и мањој висини уређаја (мање димензије) у поређењу са класичним ваљкастим суперкондензаторима.

Испитивања поузданости рада пројектованог чвора су показала да је енергија суперкондензатора довољна за функционалност у току ноћи, ако је фреквенција слања података мања од једном у 10 секунди. С обзиром да су параметри средине обично споропроменљиви, могуће је пронаћи оптималну фреквенцију слања података тако да расположива енергија потраје до следећег циклуса пуњења. Мерење времена пуњења суперкондензатора у различитим деловима дана при различитим временским условима су показала да овај процес траје од 20 секунди па до неколико минута. Закључак је да ће се суперкондензатор у току дана сигурно напунити, и да ће остати напуњен на подешених 3,53 V у току целог дана. Ово је потврђено тестирањем рада уређаја у интервалу од 48 сати, при слању података једном у минути, током којих је пројектовани чвор остао функционалан. Главна предност пројектованог чвора у односу на примере у литератури је коришћење веома мале вредности капацитивности суперкондензатора.

Проширивост функционалности пројектованог бежичног сензорског чвора је тестирана коришћењем комерцијалних сензора за мерење концентрације озона. Од два комерцијална сензора за озон, од којих је један са малом (1 mA), а други са већом потрошњом (34 mA), показано је да је онај са већом потрошњом функционалан само у току дана. Дакле, ако је праћење појединих параметара оправдано само у току дана, онда је пројектовани чвор добро решење.

Додатно, извршено је тестирање рада чвора са прикљученим наменски пројектованим сензором за мерење нивоа течности, који се састоји од двожиљног кабела. И у овом случају је потврђена

функционалност чвора. Чвор се може користити и као платформа за испитивање нових сензорских решења.

У току пројектовања и тестирања, уочена су одређена ограничена основне верзије чвора, као што су подршка за само одређене типове извора енергије из околине, ограниченост на краткодметну комуникацију, слабе перформансе микроконтролера у обради података, и непостојање подршке за ажурирање фирмвера на даљину. Зато је у току истраживања пројектован унапређени бежични сензорски чвор, који се одликује модуларним дизајном и знатно већим могућностима у примени, а све то по нешто већој цени од 5 евра. Модуларност унапређеног чвора решава претходно поменута ограничења. Додатно, унапређено решење подржава функционалности приступног чвора и мерне станице.

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

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

Прегледом докторске дисертације Комисија закључује да је приказ дисертације јасно структуриран, прегледан, систематичан и у складу са темом дисертације. Тумачење резултата је аргументовано, а изведени закључци проистичу из добијених резултата истраживања.

Дисертација је проверена у софтверу за детекцију плагијаризма (*iThenticate*). Извештај о подударности је показао да је индекс сличности 1 %.

У складу са наведеним Комисија ПОЗИТИВНО оцењује начин приказа и тумачења резултата истраживања.

#### **IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

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

Да. Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

Да. Докторска дисертација својим насловом, садржајем, резултатима истраживања и начином тумачења тих резултата садржи све битне елементе који се захтевају у радовима овакве врсте.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Анализирајући доступну литературу из области, кандидат је систематично и јасно приказао постојеће могућности бежичних сензорских мрежа за праћење параметара животне средине. Извршио је свеобухватну теоријску анализу која би допринела да се смање цена и димензије, повећа робусност и поузданост, осигура мултифункционалност и смањи утицај на животну средину.

Кандидат је пројектовао самонапајајући бежични сензорски чвор који је јефтинији и до 5 пута у односу на комерцијална решења са сличним могућностима. Додатно, значајно је мањих димензија у односу на слична приказана у научној литератури. Кандидат је показао да комбинација извора соларне енергије из околине и суперкондензатора капацитивности од свега 0,47 F представља одрживо решење у погледу напајања, уз одговарајућу фреквенцију слања података. Мерењима је потврђено да енергија суперкондензатора омогућава нормалан рад до следећег циклуса пуњења, да ће се у току дана сигурно допунити потрошена енергија, што је и додатно проверено тестирањем рада у трајању од 48 сати.

Предложено решење има знатно дужи животни век, и до преко 10 година, у односу на комерцијалне чворове који користе батерије. Такође, драстично се смањују трошкови одржавања, јер није потребно мењати батерије у теренским условима.

Уколико се пројектовано решење упореди са сличним примерима из научне литературе и комерцијалним решењима, генерални закључак је да предложени самонапајајући бежични сензорски чвор има мању цену, димензије и утицај на животну средину, што је пре свега постигнуто наменским пројектовањем и оптималним избором кључних компоненти.

Уочена ограничења су превазиђена у оквиру унапређеног, модуларног решења, које је такође пројектовано у оквиру дисертације. Унапређено решење омогућава праћење већег броја параметара животне средине, прикупљање енергије из различитих извора околине (као што су соларна, енергија ветра, енергија воде...). Додатно, унапређени самонапајајући бежични чвор мође да користи и комбинацију више различитих извора енергије, што је веома важно у применама где није сигурно да ће соларна енергија бити довољног интензитета за поуздан рад (нпр. у густим шумама, на дивљим животињама и сл.).

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања  
Дисертација нема недостатке који би значајније утицали на резултате истраживања.

**X ПРЕДЛОГ:**

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

- да се докторска дисертација кандидата Живорада Михајловића под насловом „Самонапајајући чворови бежичних сензорских мрежа за праћење параметара животне средине ” прихвати, а кандидату одобри одбрана.

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ  
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

У Новом Саду, 17. 4. 2018.

---

Др Иван Мезеи, ванредни професор,  
Факултет техничких наука, Нови Сад, председник комисије

---

Др Дејан Драјић, ванредни професор,  
Електротехнички факултет, Београд, члан

---

Др Јован Бајић, доцент,  
Факултет техничких наука, Нови Сад, члан

---

Др Дејан Убавин, ванредни професор,  
Факултет техничких наука, Нови Сад, члан

---

Др Мирјана Дамњановић, редовни професор,  
Факултет техничких наука, Нови Сад, 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.