

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ			
1. Датум и орган који је именовao комисију:			
На основу иницијалног предлога Катедре за теоријску електротехнику и одлуке Наставно-научног већа Департмана за енергетику, електронику и телекомуникације, као и одлуке Наставно-научног већа Факултета техничких наука, декан Факултета техничких наука је решењем број 012-199/1-2022 од 29. 09. 2022. године, именовao Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације.			
2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :			
1.	др Станиша Даутовић презиме и име	ванредни професор звање	теоријска електротехника ужа научна област и датум избора
	Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		председник функција у комисији
	установа у којој је запослен-а		
2.	др Зоран Пријић презиме и име	редовни професор звање	микроелектроника ужа научна област и датум избора
	Електронски факултет, Универзитет у Нишу		члан функција у комисији
	установа у којој је запослен-а		
3.	др Стеван Станковски презиме и име	редовни професор звање	мехатроника, роботика и аутоматизација и интегрисани системи ужа научна област и датум избора
	Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		члан функција у комисији
	установа у којој је запослен-а		
4.	др Снежана Ђурић презиме и име	виши научни сарадник звање	електроника/микроелектроника ужа научна област и датум избора
	БиоСенс Институт, Универзитет у Новом Саду		ментор функција у комисији
	установа у којој је запослен-а		
5.	др Никола Ђурић презиме и име	редовни професор звање	теоријска електротехника ужа научна област и датум избора
	Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		ментор функција у комисији
	установа у којој је запослен-а		
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ			
1. Име, име једног родитеља, презиме: Јелена (Мирко) Бјелица			
2. Датум рођења, општина, држава: 08. 11. 1990. године, Зрењанин, Република Србија			
3. Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив: Факултет техничких наука, Енергетика, електроника и телекомуникације, Мастер инжењер електротехнике и рачунарства			

4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:
2014. година, Енергетика, електроника и телекомуникације

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

“Хибридни електромагнетски-трибоелектрични наногенератор за прикупљање механичке енергије”

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са знаком броја страница, поглавља, слика, схема, графика и сл.

Докторска дисертација кандидата **Јелене Бјелице**, под насловом **“Хибридни електромагнетски-трибоелектрични наногенератор за прикупљање механичке енергије”**, је написана на 106 страна, подељена је у 10 поглавља, при чему садржи 48 слика, 5 табела и 155 научних референци. На почетку тезе су дати: наслов тезе, кључна документацијска информација на српском и енглеском језику, захвалница, садржај рада, попис слика и табела, као и листа скраћеница које су коришћене у тексту.

Дисертација је организована у десет целина:

1. Увод.
2. Преглед литературе везане за тему дисертације.
3. Структура хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора.
4. Принцип рада хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора.
5. Теоријска анализа модула хибридног наногенератора.
6. Фабрикација хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора.
7. Резултати карактеризације хибридног наногенератора.
8. Перформансе хибридног наногенератора приликом пуњења кондензатора.
9. Демонстрација практичне примене хибридног наногенератора.
10. Закључак и правац будућег истраживања.

На крају дисертације је дат списак научне литературе, коришћене током истраживања и израде дисертације, као и два прилога.

VI ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Наслов дисертације

Комисија је мишљења да је наслов докторске дисертације јасно формулисан и да сажето дефинише тематику и садржај дисертације.

Поглавље 1 – Увод

У уводном поглављу је објашњен предмет и циљ истраживања докторске дисертације, односно анализа хибридног наногенератора заснованог на синтези електромагнетског генератора (ЕМГ) и трибоелектричног наногенератора (ТЕНГ) за прикупљање механичке енергије у широком фреквенцијском опсегу. Наногенератори су добри кандидати за прикупљање амбијенталне енергије, и стога могу представљати потенцијалне изворе напајања аутономних уређаја мале снаге. У складу са тим, јасно и прецизно је наведена потреба за предметним истраживањем, као и очекивани исходи ове дисертације.

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

Поглавље 2 – Преглед литературе везане за тему дисертације

У другом поглављу је дат опис актуелног стања у области прикупљања амбијенталне енергије. Представљени су амбијентални извори енергије и принципи генерисања електричне енергије из ових извора, након чега су објашњени наногенератори за прикупљање енергије из окружења, као и наногенератори за прикупљање механичке енергије. Дат је и преглед литературе у вези са хибридним наногенераторима, а представљене су и методе за фабрикацију наногенератора и њихова примена у различитим Internet of Things (IoT) апликацијама.

Комисија сматра да је дат свеобухватан и веома користан приказ научне литературе у области истраживања. Анализиране су предности и мане постојећих механизма за конверзију механичке у електричну енергију, што је један од предмета истраживања докторске дисертације.

Поглавље 3 – Структура хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора

У трећем поглављу је детаљно описан дизајн предложеног хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора, где су три модула са различитим радним механизмима (контактни ТЕНГ, клизни ТЕНГ и ЕМГ) интегрисана у један компактан хибридни наногенератор.

У оквиру доступне научне литературе је уочено да хибридни наногенератор предложеног дизајна није претходно реализован, стога је Комисија мишљења да ова дисертација даје, у овом погледу, оригиналан научни допринос области истраживања.

Поглавље 4 – Принцип рада хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора

У четвртном поглављу су детаљно описани радни механизми модула интегрисаних у оквиру хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора (контактни ТЕНГ, клизни ТЕНГ и ЕМГ), са јасним циљем да се искористе предности појединачних модула и на тај начин повећа ефикасност хибридног уређаја као потенцијалног извора напајања.

Комисија је мишљења да предложени хибридни наногенератор, заснован на синтези електромагнетског и трибоелектричног механизма, може дати значајан допринос области прикупљања амбијенталне енергије, и сматра оправдано реализацију самог уређаја и израду ове докторске дисертације.

Поглавље 5 – Теоријска анализа модула хибридног наногенератора

У петом поглављу је детаљно описана теоријска анализа радних механизма свих интегрисаних модула (контактни ТЕНГ, клизни ТЕНГ и ЕМГ), праћена одговарајућим софтверским симулацијама, у циљу оптимизације дизајна и перформанси хибридног наногенератора.

Комисија сматра да је моделовање појединачних интегрисаних модула хибридног наногенератора, представљено у оквиру петог поглавља, извршено у складу са Пријавом докторске дисертације. Теоријско моделовање је дало увид у карактеристике интегрисаних модула и параметре од којих зависе њихови излазни сигнали, што је омогућило анализу и унапређење перформанси хибридног наногенератора. Интерпретација добијених модела над електричним доменом је извршена у терминима електричних компоненти које се типично користе у литератури у области дизајна и анализе наногенератора, а то су линеарни и афини, као и временски променљиви и временски непроменљиви резистивни, капацитивни и индуктивни електрични елементи. Комисија сматра да се у будућим истраживањима, у оквиру интерпретације теоријских модела наногенератора над електричним доменом, могу разматрати нелинеарни електрични елементи са меморијом.

Поглавље 6 – Фабрикација хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора

У шестом поглављу је дат детаљан опис фабрикације хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора, као и материјала који су коришћени за фабрикацију појединачних модула.

Комисија сматра да су узорци коришћених материјала одговарајући, као и сам начин фабрикације хибридног наногенератора.

Поглавље 7 – Резултати карактеризације хибридног наногенератора

У седмом поглављу су приказани резултати практичних мерења излазних карактеристика појединачних модула (контактни ТЕНГ, клизни ТЕНГ и ЕМГ), као и хибридног наногенератора. Анализиран је напон празног хода, као и излазни напон, струја и снага за различите вредности прикључене отпорности потрошача (у опсегу од 1Ω до $100 M\Omega$), на фреквенцији од 5 Hz , у циљу одређивања максималне снаге појединачних модула и хибридне структуре. Остварен је максимални излазни напон (напон празног хода) хибридног наногенератора од 65 V , максимална излазна струја (струја кратког споја) од $15,25 \text{ mA}$, док је максимална излазна снага $1,13 \text{ mW}$, при отпорности од 200Ω .

На основу прегледа експерименталних резултата истраживања, Комисија је мишљења да су перформансе хибридног наногенератора анализирани на адекватан начин. Показано је да хибридни наногенератор има већу излазну снагу у поређењу са појединачним модулима, на основу чега се потврђује значај предложеног уређаја. Комисија сматра да се у будућим истраживањима, у оквиру карактеризације фабрикованог наногенератора, поред таласних облика излазних напона, мерења могу проширити и на таласне облике излазних струја, чиме би се проширио домен валидације фабрикованог наногенератора у односу на модел добијен у теоријској анализи.

Поглавље 8 – Перформансе хибридног наногенератора приликом пуњења кондензатора

У осмом поглављу су анализирани перформансе појединачних модула и хибридног наногенератора приликом пуњења кондензатора, где су тестирани кондензатори различитих капацитивности. На основу добијених резултата је показано да синтеза ЕМГ и ТЕНГ модула значајно повећава ефикасност хибридног уређаја као потенцијалног извора напајања, с обзиром да се при томе компензују недостаци појединачних модула. Хибридни наногенератор је напунио кондензатор капацитивности $1 \mu\text{F}$ до $9,1 \text{ V}$ за један минут, знатно брже од појединачних модула.

Прегледом резултата тестирања пуњења кондензатора, показано је да се ефикасност перформанси хибридног наногенератора значајно повећава у поређењу са појединачним модулима. На основу донетих закључака, Комисија сматра да је потврђена оправданост реализације предложеног уређаја и израде ове докторске дисертације.

Поглавље 9 – Демонстрација практичне примене хибридног наногенератора

У деветом поглављу је приказана демонстрација практичне примене хибридног наногенератора, као и детаљна анализа добијених резултата, уз одговарајућу дискусију. Показано је да сви интегрисани модули могу директно да осветле најмање 144 LED диоде, док хибридни сигнал може да осветли најмање 94 LED диоде везане редно, и најмање 50 LED диода везаних паралелно. Електрична енергија коју производи хибридни наногенератор је складиштена у групи кондензатора и искоришћена за напајање калкулатора, што указује на могућност употребе наногенератора као потенцијалног извора напајања електричних уређаја мале снаге.

Комисија сматра да остварени експериментални резултати, представљени у оквиру деветог поглавља, на јасан начин демонстрирају могућност примене предложеног хибридног наногенератора као ефикасног извора напајања у низу практичних случајева.

Поглавље 10 – Закључак и правац будућег истраживања

Десето поглавље представља закључно поглавље докторске дисертације, у оквиру кога су сумирани резултати предметног истраживања, односно анализе хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора, као потенцијалног извора напајања за уређаје мале снаге. Поред тога, предложени су и правци даљег истраживања.

На основу представљених резултата истраживања, Комисија је мишљења да су донети исправни и адекватни закључци, који потврђују значај и будућу улогу хибридног наногенератора. Такође, Комисија сматра и да наведени закључци пружају смернице ка даљој анализи и унапређењу уређаја за прикупљање механичке енергије из окружења.

Литература

У оквиру овог поглавља су наведене научне референце, које су коришћене током истраживачког рада и током писања текста ове дисертације.

Комисија је мишљења да обим и квалитет анализираних референци представља добру основу за истраживачки рад у предметној области.

Прилози

У оквиру дисертације су дата два прилога, један са одговарајућим извођењима функције која описује зависност протекле количине наелектрисања од времена, $\Delta Q(t)$, за цик-цак ТЕНГ и клизни ТЕНГ, и други са приказом напонских сигнала измерених на различитим отпорностима, за појединачне модуле, као и за хибридни наногенератор.

Комисија позитивно оцењује садржај појединих прилога и мишљења је да они додатно продубљују основни текст дисертације.

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 складу са *Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду* који је повезан са садржајем докторске дисертације. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду уредника часописа о томе.

M21:

- **J. Vjelica**, N. Djuric, S. Djuric, Performance analysis and application of a hybrid electromagnetic-triboelectric nanogenerator for energy harvesting, Energy Reports, 8, November 2022, 9184-9200, DOI: 10.1016/j.egyr.2022.07.052, ISSN: 2352-4847.

M23:

- **J. Vjelica**, N. Djuric, S. Djuric, Modeling and Performance Analysis of Planar Fractal Inductors, IEEE Transactions on Magnetics, 56 (11), November 2020, 8400308, DOI: 10.1109/TMAG.2020.3018428, ISSN 0018-9464.

M33:

- **J. Bjelica**, N. Djuric, D. Antic, D. Kljajic, The Inductive Sensor Analysis for the Energy Harvesting Applications, 14th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics - SISY 2016, August 29-31, 2016, Subotica, Serbia, 61-66, ISBN: 978-1-5090-2865-8.
- **J. Bjelica**, G. Mijatovic, D. Kljajic, A. Fanti, The Inductors with Adjustable Surface Area for Energy Harvesting Utilization, 24th Telecommunications Forum - TELFOR 2016, November 22-23, 2016, Belgrade, Serbia, 597-600, ISBN: 978-1-5090-4085-8.
- **J. Bjelica**, N. Djuric, A. Fanti, S. Djuric, The Planar Inductor with Adjustable Surface for Energy Harvesting Applications, 38th Progress in Electromagnetics Research Symposium - PIERS 2017, May 22-25, 2017, Sankt Peterburg, Russia, 3651-3656, ISBN: 978-1-5090-6269-0.
- N. Djuric, G. Mijatovic, D. Antic, **J. Bjelica**, D. Kljajic, K. Kasas-Lazetic, Double-layer Variable Geometry Inductor for Energy Harvesting Applications, 38th Progress in Electromagnetics Research Symposium - PIERS 2017, May 22-25, 2017, Sankt Peterburg, Russia, 3644-3650, ISBN: 978-1-5090-6269-0.
- **J. Bjelica**, N. Djuric, S. Djuric, Simulation tool for optimization of planar inductors, 41st Progress in Electromagnetics Research Symposium - PIERS 2019, Jun 17-20, 2019, Rome, Italy, 1-5, ISBN 978-1-7281-3403-1.

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:

Последњих година могућност прикупљања енергије малог обима из околине је предмет многих научних истраживања. Наногенератори се појављују као добри кандидати за претварање амбијенталне енергије у електричну енергију, у сврху напајања уређаја мале снаге и као потенцијална замена за батерије.

У дисертацији кандидата је представљен хибридни наногенератор кога чине три модула заснована на радним механизмима који користе трибоелектрични и електромагнетски ефекат за претварање механичке енергије у електричну енергију. Хибридни наногенератор је реализован од циклуса трибоелектричног наногенератора (ТЕНГ) у контактном режиму, цилиндричног ТЕНГ-а у клизном режиму и два електромагнетска генератора (ЕМГ). На основу датог теоријског модела извршена је оптимизација дизајна хибридног наногенератора.

Анализа перформанси је потврдила да предложени хибридни наногенератор може ефикасно да сакупља механичку енергију из околине. Тестирање кондензатора је показало да хибридни наногенератор значајно побољшава ниво напона и брзину пуњења кондензатора у поређењу са појединачним модулима. Показано је да напон сваког кондензатора брзо достиже засићење због велике струје ЕМГ модула, а затим се континуално пуни од стране оба ТЕНГ модула, због њиховог великог напона. Ово указује да предложена комбинација појединачних модула користи њихове предности и компензује недостатке (мала струја ТЕНГ-а и мали напон ЕМГ-а) у процесу пуњења кондензатора.

Наногенератор је показао добре перформансе у практичној примени, што указује на то да се може користити као потенцијални извор напајања за преносиву електронику. Електрична енергија произведена од стране хибридног наногенератора је складиштена у групи кондензатора и искоришћена за напајање калкулатора. Такође, показано је да појединачни модули, као и сам хибридни наногенератор, могу бити ефикасни за директно напајање светлећих диода. Додатно, предложени хибридни наногенератор се потенцијално може користити и као сензор са сопственим напајањем за детекцију покрета/вибрација.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:

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

На основу детаљног увида и анализе докторске дисертације, Комисија сматра да је целокупна дисертација јасно и прегледно организована и написана, и да је у потпуности у складу са пријавље-

ном темом дисертације.

Јасно је уочљив оригинални научни допринос. Тумачење резултата је на високом научном нивоу, а изведени закључци произилазе из конкретних експерименталних резултата.

Комисија позитивно оцењује начин приказа и тумачење резултата истраживања.

На крају, на основу провере помоћу софтвера iThenticate, о потенцијалном плагијату, утврђен је један проценат поклапања текста дисертације са другим документима. На основу ове информације и на основу свега изложеног, Комисија позитивно оцењује све делове ове дисертације.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE 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?

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

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Докторска дисертација својим насловом, садржајем, резултатима истраживања и начином тумачења добијених резултата садржи све битне елементе који се захтевају за радове овакве врсте и представља један заокружен самосталан истраживачки рад.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Предложени хибридни електромагнетски-трибоелектрични наногенератор је иновативног дизајна и заснован на синтези ЕМГ модула и два ТЕНГ модула (контактни ТЕНГ и клизни ТЕНГ). Хибридни уређај поседује могућност да ефикасно сакупља механичку енергију из окружења у широком фреквенцијском опсегу, с обзиром да се ТЕНГ показао као адекватан за прикупљање енергије на ниским фреквенцијама, док је ЕМГ погодан за прикупљање енергије на високим фреквенцијама.

Без обзира на то што ЕМГ и ТЕНГ модули користе различите радне механизме за сакупљање механичке енергије и имају другачије излазне карактеристике, показано је да синтеза поменутих модула у хибридну структуру повећава излазну снагу уређаја. Такође, показано је да хибридни наногенератор убрзава пуњење кондензатора, с обзиром да синтеза ЕМГ и ТЕНГ модула компензује њихове појединачне недостатке. Хибридни наногенератор може бити одржив извор напајања за рад уређаја мале снаге, што је такође демонстрирано у дисертацији. Урађено је и детаљно теоријско моделовање хибридног наногенератора што може бити корисно за будућу анализу и унапређење перформанси ЕМГ-ТЕНГ наногенератора.

Добијени резултати приказани у дисертацији могу да дају значајан и оригиналан допринос у области која се бави наногенераторима и прикупљањем наноенергије из окружења, имајући у виду да предложени уређај може да се користи као извор напајања мале снаге, а потенцијално и као сензор за детекцију и апсорпцију вибрација. Такође, сами наногенератори представљају нову и перспективну генерацију извора напајања, као и сензора погодних за рад различитих IoT апликација.

Разматрајући целокупну докторску дисертацију кандидата Јелене Бјелице, Комисија је закључила да дисертација представља оригиналан научни допринос, где је кроз развој предложеног хибридног електромагнетског-трибоелектричног наногенератора као извора напајања уређаја мале снаге, приказан иновативан приступ за конверзију механичке у електричну енергију, што је и верификовано одговарајућом научном публикацијом на међународном нивоу.

<p><i>Обављеним истраживањима су испуњени сви задати циљеви дисертације, а обезбеђена је и подлога за наставак истраживања у научној области прикупљања амбијенталне енергије.</i></p>
<p>4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања?</p> <p><i>На основу детаљног увида и анализе резултата истраживања, Комисија није уочила никакве недостатке у докторској дисертацији.</i></p>
<p>X ПРЕДЛОГ:</p>
<p>На основу наведеног, комисија предлаже:</p>
<p>На основу укупне позитивне оцене дисертације, Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука, Универзитета у Новом Саду, да се докторска дисертација кандидата Јелене Бјелице, под називом:</p> <p>”Хибридни електромагнетски-трибоелектрични наногенератор за прикупљање механичке енергије”</p> <p>прихвати, а кандидату одобри јавна одбрана.</p>

Место и датум:
Нови Сад, 23. 11. 2022. године

1. **др Станиша Даутовић, ванредни професор**
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду,
председник

2. **др Зоран Пријић, редовни професор**
Електронски факултет, Универзитет у Нишу, члан

3. **др Стеван Станковски, редовни професор**
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду,
члан

4. **др Снежана Ђурић, виши научни сарадник**
БиоСенс Институт, Универзитет у Новом Саду, ментор

5. **др Никола Ђурић, редовни професор**
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду,
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 и да исти потпише.