

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
ЧАЧКА

27. 04. 2022.

Број	Број	Прилог	Вредност
013	901		

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ

**Предмет: Извештај комисије за оцену и одбрану докторске дисертације  
кандидата Станка Алексића**

Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-54/15 од 4. 2. 2022. год. на предлог Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку (одлука бр. 60-4138/17 од 29. 12. 2021. год.) именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Станка Алексића, дипл. физичара под насловом:

**" ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ  
ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ  
НТС ТЕРМИСТОРА "**

Станко Алексић је предао рукопис докторске дисертације Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку на оцену и проверу. Чланови Комисије су имали детаљни увид у поменути рукопис, пажљиво га прегледали и проценили научни квалитет докторске дисертације, при чему су дали сугестије и на тај начин унапредили начин презентације научних резултата дисертације. На основу Извештаја о провери оригиналности докторске дисертације и Оцене ментора извештаја о провери оригиналности, достављеног 4. марта 2022. год, а према члану 7. Правилника о поступку провере на плагијаризам Универзитета у Крагујевцу, Комисија је констатовала да је утврђено подударање текста настало услед навођења библиографских података о коришћеној литератури, као и претходно публикованих резултата који су проистекли из докторандових истраживања и уредно су наведена уз поштовање академских правила цитирања. Овим су се стекли сви услови утврђени Правилником о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу да Комисија поднесе Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку следећи

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. Опис докторске дисертације**

Предмет истраживања докторске дисертације је реализација и карактеризација новог сензорског елемента - дебелослојног сегментираног NTC термистора од никл манганита ( $\text{NiMn}_2\text{O}_4$ ) и модификованог никл манганита ( $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ ) и њихова примена за нове сензорске системе за мерење профила температуре тла, протока воде и брзине ветра (оптимизација и карактеризација прототипова сензора и анализа и моделовање одзива).

Докторска дисертација садржи следећа поглавља (Увод, Теоријски део, Експериментални део, Дискусију добијених резултата, Закључак, Литературу) и написана је на 124 стране, садржи 72 слике, 16 табела и 101 библиографски наслов.

У **Уводу** су приказани дебелослојни сегментирани NTC термистори као сензори температуре. Најпре је описан нови термисторски низ за прецизно мерење профила температуре тла у више десетина тачака. Затим је приказан нови сензорски систем за мерење протока воде у цевима на бази одвођења топлоте сегментираног термистора који се загрева сопственом струјом при константном напону. На крају је дат кратак опис једноосног и троосног анемометра за мерење вектора брзине ветра, такође на бази губитка топлоте сегментираних термистора који се самозагревају сопственом струјом при константном напону.

У **Теоријском делу** су дати синтеза, својства и примена NTC термистора: приказани су најчешћи материјали за израду NTC термистора, поступци добијања NTC термистора, синтеровање праха, основна својства NTC термистора и примене NTC термистора. Дат је теоријски осврт на термисторе од никл манганита потребан за разумевање настанка наменских пасти за израду дебелослојних сегментираних термистора. Пошло се од структуре и добијања никл манганита, синтеровања и својстава никл манганита, развоја танкослојних и дебелослојних термистора и њихових примена. Затим је дат приказ припреме пасти од никл манганита и модификованог никл манганита и конструкција дебелослојних термистора: сегментирани термистори и њихово моделовање, примене сегментираних термистора и кратак хронолошки преглед развоја. Кроз три посебне подтеме као што су мерења температуре, протока течности и брзине ветра дат је приказ савремених сензора за њихову детекцију који се користе у савременој техници.

У **Експерименталном делу** докторске дисертације приказан је реализован план истраживања: израда и карактеризација сензорских елемената (сегментирани NTC термистори), конструкција и електрична анализа рада три различите врсте сензорских система.

Најпре је приказан нови сензорски систем са десет редно повезаних сегментираних термистора тј. термисторски низ за мерење температуре тла (прототип GST-1). Приказана је конструкција термисторског низа, карактеристике сензорских елемената, калибрација термисторског низа, а потом мерења једнодневних температурних профила и формирање месечних температурних профила тла.

Затим је приказан нови сензорски систем за мерење протока воде на бази одвођења топлоте са два сегментирана NTC термистора од којих се један самозагрева при константном напону. Конструисане су две верзије: прототип А који ради у циклусима и прототип В који ради континуално. Прво су приказане карактеристике новог сензорског елемената са редукованим димензијама: основне електричне карактеристике сензорског елемента, конструкција сензорског система А, радна тачка и одзив сензорског система А на проток воде. Следи приказ конструкције сензорског система В, као и одзиви сензорског система В на стационарни и импулсни проток воде.

На крају је приказан сензорски систем за мерење вектора брзине ветра са сегментираним термисторима на бази одвођења топлоте. Примењени режим самозагревања у циклусима од 30 s је анализиран код оба конструисана сензорска система: једноосни систем С и троосни систем D на бази три сегментирана термистора (X, Y, Z). Прво су приказани конструкција једноосног сензорског система С, радна тачка и одзив једноосног сензорског система С, а затим конструкција троосног сензорског система D, одзив троосног сензорског система D на хоризонталном терену и одзив на терену са нагибом.

**Анализа и дискусија добијених резултата** испитиваних сензорских система и развијених пет прототипова приказана је у три целине.

**I** Анализа мерења температуре тла помоћу термисторског низа садржи анализе мерења температуре, годишње температурне профиле, профиле топлотне дифузивности и процену релативног садржаја воде у земљи.

**II** Анализа мерења протока воде је обухватила оптимизацију радне тачке и температурног одзива сензорског система А, анализу мерне несигурности и упоредну анализу сензорског система А са другим сензорским системима. Затим је приказана оптимизација радне тачке сензорског система В, температурни одзив за стационарни проток, температурни одзив за импулсни проток и температурна петља сензорског система В. На крају је спроведено моделовање одзива сензорског система А (моделовање струјног одзива и моделовање температурног одзива), анализа несигурности сензорског система А и могућности примене сензорских система А и В.

**III** Анализа мерења брзине ветра садржи оптимизацију радне тачке и зависност одзива сензорског система С од угла ветра у односу на ваздушни канал, моделовање одзива и анализу несигурности. Затим следи анализа карактеристика сензорског система D и упоређивање савремених сензорских система за мерење брзине ветра.

У **Закључку** су дати остварени резултати предмета и циља докторске дисертације за сваки од три типа испитиваних сензорских система. Приказани су и могући правци даљих истраживања на сензорским системима као што су: аутоматизација мерења, мерења на удаљеним местима, брза калибрација сензорских система и процене за доградњу прототипова у паметне сензорске системе.

На крају дисертације је приказана **Литература** са цитираним библиографским јединицама. Дисертација садржи и обавезне елементе: **Биографију**, **Сажетке** на српском и енглеском језику као и **Изјаве** о ауторству, истоветности верзија и коришћењу докторског рада.

## **2. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области**

Докторска дисертација Станка Алексића, дипл. физичара под насловом: "ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА" представља резултат научноистраживачког рада кандидата у области савремених материјала и технологија у

електротехници који су успешно примењени за развој одабрана три сензорска система. Као материјали за термисторске пасте и израду дебелослојних сегментираних NTC термистора-сензорских елемената коришћени су никл манганит ( $\text{NiMn}_2\text{O}_4$ ) и модификовани никл манганит ( $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ ). Реализација сензорских система зависи од њихових намена и врсте коришћених сензорских елемената и осим иновативне идеје захтева оптимизацију прототипова заснованих на својствима материјала коришћених за сензорски елемент (у случају NTC термистора то су величина електричног и термичког одзива).

Посебан допринос спроведених истраживања је реализација новог сензорског система - термисторског низа за мерење температурног профила тла (прототип GST-1) за прецизно мерење температурног профила тла у 40 тачака до дубине тла од 550 mm. Номинална вредност електричне отпорности термистора је подешена дебљином NTC термисторског слоја од никл манганита  $\text{NiMn}_2\text{O}_4$  на око 1,5 k $\Omega$  по сегменту. Експоненцијални фактор термистора B је одређен мерењем NTC криве - зависности електричне отпорности од температуре R(T). Поменуте вредности омогућавају прецизно мерење електричне отпорности сегмента и конверзију у температуру применом Steinhart-Hartove једначине (вредност несигурности мерења температуре је око 0,1 °C). Употреба овог сензорског система омогућава одређивање градијента температуре на температурном профилу тла T(d) и корелацију са температуром ваздуха изнад тла, укључујући и падавине. Мерење дневних температурних профила тла вршено је свакодневно (током јутра у 7.00 h и током дана у 14.00 h) за 2018. годину. На основу овако формиране базе мерених података уочене су и описане карактеристичне релаксационе и цикличне промене температурних профила тла.

Праћење дневних, недељних и месечних температурних профила тла омогућило је формирање температурног профила тла T(d) по дубини d, а на основу одређеног профила топлотне дифузивности D(d) и процену профила влаге  $\theta(d)$ . Значај овог сензорског система очекује се у подземној метеорологији (праћење преноса топлоте из ваздуха ка тлу и обрнуто, праћење промена влаге у тлу), а посебно у агрокултури (клијање зрна, раст коренског система, наводњавање). Моделовање годишњих температурних профила тла извршено је полиномима петог реда за резултате мерења добијене на површини земље и полиномима шестог реда за резултате мерења добијене на дубини тла од 550 mm.

Нови допринос представља и реализација сензорског система са сегментираним термисторима за мерење протока воде Q у цевима (две верзије, системи A и B). Сензорски систем је конципиран на ефекту одвођења топлоте са NTC термистора који се самозагрева сопственом струјом I при константном напону U. При наведеним условима струја самозагревања I је зависна од интензитета протока воде Q која опструјава термистор и одводи топлоту. Температура долазне воде  $T_w$  је један од параметара за спровођење прорачуна и мерена је другим сегментираним термистором који функционише на основу стандардног NTC ефекта зависности електричне отпорности од температуре. Димензије сегментираних NTC термистора - сензорског елемента су редуковане, а коришћена је термисторска паста од модификованог никл манганита  $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ . На овај начин су постигнуте номиналне вредности термистора од око 630  $\Omega$  и за ред величине

мања отпорност по сегментима у односу на термистор већих димензија добијен од пасте никл манганита  $\text{NiMn}_2\text{O}_4$ .

Мерни опсег сензорског система је подељен на мерне подопсеге постављене на сваких  $5\text{ }^\circ\text{C}$  температуре долазне воде  $T_w$ . За сваки подопсег одређен је адаптивни константни напон  $U$  који се мења у скоковима (опада) са порастом температуре воде. Реализована су два прототипа сензорских система за мерење протока воде са два сегментирана термистора: сензорски систем А који ради у циклусима од  $30\text{ s}$  загревања /  $90\text{ s}$  природног хлађења до почетног стања (штедни режим напајања) и сензорски систем В који има континуално напајање. Анализирани су струјни одзиви система  $I(Q)$  на стационарни проток воде за сензорске системе А и В, а затим одзиви на квадратни и троугаони импулсни проток воде на водоводу за сензорски систем В. Мерене су температурне петље  $T(Q)$ , анализирано кашњење одзива, процењене несигурности мерења и могућности примене оба прототипа.

Моделовање струјног и температурног одзива  $I(Q)$  и  $T(Q)$  на протеклу воду вршено је применом једначине топлотне равнотеже на граничној површини термистор / вода. Значај овог истраживања је двојак: указује на предности оба реализована сензорска система јер немају појачавачку електронику нити покретне делове, а потрошња енергије је реда  $1\text{ W}$ . При повећању температуре воде радни напони опадају, максималне струје самозагревања расту, а максималне снаге се смањују. Процењене несигурности мерења оба сензорска система су мање од  $3\%$ . Реализовани прототипови дају могућност надоградње до савремених паметних сензорских система са одговарајућим софтвером за обраду електричних одзива и њихово процесирање.

Посебан допринос представља реализација новог сензорског система за мерење вектора брзине ветра са сегментираним термисторима, код кога је као NTC слој нанета термисторска паста од модификованог никл манганита  $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ . Реализована су два прототипа сензорског система - анемометра на бази одвођења топлоте: једноосни анемометар С и троосни анемометар D за мерење вектора брзине ветра у координатном простору (интензитет, правац, углови према осама). Троосни анемометар садржи три сегментирана термистора, по један за сваки од праваца X, Y, Z који се самозагревају сопственом струјом при константном напону. Примењен је штедни режим напајања са дворезимским циклусима ( $i$ -загревање сегментираниог термистора трајања  $30\text{ s}$  праћено  $ii$ -периодом природног хлађења трајања  $90\text{ s}$  до почетног стања). Одзив на струјање ваздуха брзином  $v$  је струја самозагревања термистора  $I(v)$ , а подела на мерне подопсеге је спроведена на сваких  $10\text{ }^\circ\text{C}$  температуре ваздуха, уз одговарајуће константне напоне напајања  $U$ . Једноосни анемометар мери интензитет брзине ветра  $v$  у жељеном правцу, а максимум струјног одзива на брзину ветра  $I(v)$  се добија окретањем ваздушног канала са сензором-термистором по углу  $\alpha$  у хоризонталној равни. Сензорски систем D - троосни анемометар са сегментираним термисторима X, Y, Z оријентисан је са компасом и либелом и мери компоненте вектора брзине ветра  $v$  ( $v_x, v_y, v_z$ ) по осама координатног система. Помоћу измерених струја термистора  $I_{30x}, I_{30y}, I_{30z}$  и калибрационих кривих добија се интензитет брзине ветра  $v$  и углови вектора брзине ветра према координатним осама  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ , на основу којих је могуће одредити компоненте вектора брзине ветра  $v$  ( $v_x, v_y, v_z$ ).

Коришћени параметри при калибрацији одзива овог сензорског система су углови вектора брзине ветра  $v$  и температура ваздуха.

Сва три реализована сензорска система са сегментираним термисторима (укупно 5 прототипова) према параметру несигурности мерења су у нивоу несигурности комерцијалних сензора који раде на другим физичким принципима.

На основу приказаних резултата и научних радова кандидата Станка Алексића публикованих у оквиру истраживања обухваћених докторском дисертацијом, Комисија је мишљења да се ради о значајном доприносу у области савремених сензора и сензорских система.

### **3. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области**

На основу Потпуног извештаја о провери оригиналности докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу бр. IV-04-13/7 од 28. 02. 2022. год. и Оцене ментора о извештају и провери оригиналности докторске дисертације бр. 491 од 4. 03. 2022. год., достављеног Комисији 14. 03. 2022. год. и увида у литературне податке које текст садржи, утврђено је да је докторска дисертација под називом "ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА" кандидата Станка Алексића, дипл. физичара, резултат његовог оригиналног научног рада.

### **4. Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области**

Станко Алексић, дипл. физичар, се током докторских академских студија интензивно бавио научноистраживачким радом у области савремених сензора и сензорских система. Кандидат је запослен у Институту Ирител на радном месту истраживач сарадник. До сада је публикувао четири рада у међународним часописима (M21-3, M21a-1), три сопштења на међународним скуповима (M33-2, M34-1), један рад у часопису од националног значаја (M52-1) и један рад саопштен на националном скупу (M63-1) и два техничка решења (M82-2).

Радови у врхунским међународним часописима

1. **S. O. Aleksić**, N. S. Mitrović, M. D. Luković, S. D. Veljović-Jovanović, S. G. Luković, M. V. Nikolić, and O. S. Aleksić, A Ground Temperature Profile Sensor Based on NTC Thick Film Segmented Thermistors: Main Properties and Applications, IEEE Sensors Journal, Vol.18 (11), 2018, pp. 4414-4421, ISSN: 1558-1748. **M21**

2. D. Kosanović, V. A. Blagojević, A. Maričić, **S. Aleksić**, V. P. Pavlović, V. B. Pavlović, B. Vlahović, Influence of Mechanical Activation on Functional Properties of Barium Hexaferrite Ceramics, Ceramics International, Vol. 44 (6), 2018, pp. 6666-6672, ISSN: 0272-8842, **M21-a**

3. **S. O. Aleksić**, N. S. Mitrović, Z. Nikolić, M. D. Luković, N. N. Obradović, S. G. Luković, Three-Axis' Heat Loss Anemometer Comprising Thick-Film Segmented Thermistors, IEEE Sensors Journal, Vol. 19 (20), 2019, pp. 10228-10235, ISSN:1558-1748, **M21**

4. **S. O. Aleksić**, N. S. Mitrović, M. D. Luković, S. G. Luković, N. T. Nikolić, Heat Loss Flowmeter for Water Based on Thick Film Thermistors in Power Save Regime, IEEE Sensors Journal, Vol 21(1), 2021, pp. 199-206, ISSN:1558-1748, **M21**

Саопштења са међународних скупова штампана у целини

5. **S. O. Aleksić**, N. S. Mitrović, M. D. Luković, S. Djukić, Thick Film Thermistor Sensor for Measuring Temperature Profile of Ground Top Layer, 41<sup>st</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), May16-20, 2018, Zlatibor, Serbia, IEEE Xplore DOI: 10.1109/ISSE.2018.8443651, ISBN: 978-1-5386-5731-7 **M33**

6. **S. O. Aleksić**, N. S. Mitrović, M. D. Luković, N. Blaž, S. G. Luković, Lj. D. Živanov, Uniaxial Heat Loss Anemometer in Power Save Regime, 42<sup>nd</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), May 15-19, 2019, Wrocalaw, Poland, IEEE Xplore DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810179, ISBN: 978-1-7281-1874-1 **M33**

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу

7. **S. O. Aleksić**, M. D. Luković, Z. Nikolić, Z. I. Stanimirović, N. S. Mitrović, Analysis of Heat Loss of Thick Film Segmented Thermistors Used in Water Flow Sensor, 9<sup>th</sup> Session – Materials for High-Technology Application II, The 16<sup>th</sup> Young Researchers' Conference Materials Sciences and Engineering, Belgrade, December 6-8, 2017, Book of Abstracts 9-4 p.43, ISBN 978-86-80321-33-2. **M34**

Рад у истакнутом националном часопису

8. **С. О. Алексић**, Н. С. Митровић, М. Д. Луковић. Н. Н. Обрадовић, Примена дебелослојних сегментираних термистора за мерење и анализу температурног профила горњег слоја тла, Техника (Електротехника), Vol. 67 (4), 2018, стр. 533-538. ISSN 0040-2176, **M52**

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини

9. **С. О. Алексић**, Н. С. Митровић, М. Д. Луковић, С. Ђукић, А. Калезић-Глишовић, Оптимизација и моделовање дебелослојних сегментираних термистора за градијентни сензор температуре тла, Сесија МО-1. Микроелектроника, микросистеми и оптоелектроника, IcETRAN & ETRAN 2018, Палић 11-14. 06. 2018, Зборник, МО-1.3, стр. 308-313, ISBN 978-86-7466-752-1. **M63**

Техничка решења

10. М. Д. Луковић, **С. О. Алексић**, С. Г. Луковић, М. В. Николић, О. С. Алексић, Љ. Д. Живанов, Градијентни сензор температуре тла ГСТ-1, Ново техничко решење примењено на националном нивоу, ФТН Нови Сад, признато 3. 04. 2018. **M82**

11. Н. Блаж, Љ. Д. Живанов, М. Д. Луковић, **С. О. Алексић**, С. Г. Луковић, Нове конфигурације ЕМИ потискивача реализованих помоћу снопа Mn-Zn феритних језгара са дубоким жљебовима, Ново техничко решење примењено на националном нивоу, ФТН Нови Сад, признато 10. 01. 2019. **M82**

## **5. Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему**

На основу прегледа текста докторске дисертације "ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ НТС ТЕРМИСТОРА" Комисија је утврдила да су обим, циљеви истраживања и презентовани резултати сагласни са пријављеном темом прихваћеном од стране Већа за техничко - технолошке науке Универзитета у Крагујевцу. Дисертација представља оригинални научни допринос у области истраживања савремених сензора и сензорских система и у потпуности задовољава све научне, стручне и административне услове.

## **6. Научни резултати докторске дисертације**

Из истраживања обухваћених овом дисертацијом до сада су публикована три рада у врхунском међународном часопису (M21-3), три саопштења на међународним скуповима (M33-2, M34-1), један рад у националном часопису (M52-1), једно саопштење са скупа националног значаја (M63-1) и једно техничко решење (M82-1), а два научна рада су у фази припреме за објављивање. Свеобухватним теоријским и експериментално - истраживачким радом кандидат је дошао до следећих научних резултата:

- Дебелослојном (хибридном) технологијом реализоване су две врсте сегментираних НТС термистора (сензорских елемената) штампањем наменских термисторских пасти од никл манганита ( $\text{NiMn}_2\text{O}_4$ ) и модификованог никл манганита ( $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ ). Модификацијом спинела никл манганита, тј. делимичном субституцијом полазних прахова  $\text{NiO}$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  у једињењу  $\text{NiMn}_2\text{O}_4$  са праховима  $\text{CuO}$  и  $\text{ZnO}$  формиран је термисторски прах  $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$  са знатно нижим вредностима специфичне електричне отпорности. Прах модификованог никл манганита је коришћен за припрему термисторске пасте при штампању сегментираних дебелослојних НТС термистора са редукованим димензијама (сегментирани термистори су оптимизовани по димензијама:  $50,8 \text{ mm} \times 6,35 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$  и  $25,4 \text{ mm} \times 6,35 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ ). Електроде су нанете PdAg пастом испод и изнад НТС термисторског слоја нанетог три пута ради повећања дебљине, тј. ради оптимизације електричне отпорности.

- Постигнуте су следеће електричне карактеристике сегментираних дебелослојних термистора на собној температури: електрична отпорност већег НТС термистора је око  $7215 \Omega$ , тј. око  $1,5 \text{ k}\Omega$  по сегменту за  $\text{NiMn}_2\text{O}_4$  пасту и око  $630 \Omega$  за сегментирани термистор са редукованим димензијама тј. око  $150 \Omega$  по сегменту за  $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$  пасту. Оптимизација ових вредности постигнута је контролом дебљине термисторског слоја при штампању одговарајуће пасте. На основу температурске зависности електричне отпорности сегментираних термистора у клима комори (опсег  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+ 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) одређене



су вредности експоненцијалног фактора термистора за примењене пасте:  $B_B=3863$  K за никл манганит и  $B_C=3356$  K за модификовани никл манганит.

● Реализован је и окарактерисан прототип сензорског система за мерење температурног профила тла (GST-1) са 10 сегментираних NTC термистора ( $NiMn_2O_4$ ) везаних на ред тј. термисторски низ са 40 мерних тачака за мерење температуре до дубине од 550 mm. Несигурност мерења температуре термисторским низом је процењена на мање од 0,1 °C. Моделовање годишњег јутарњег (7.00 h) и поподневног (14.00 h) температурног профила тла полиномима показало је правилности у инверзији оба температурна профила тла који се везују за карактеристичне датуме из Календара када настаје топлотна равнотежа у земљи (превој на дијаграму око Митровдана у новембру и око Сретења у фебруару) као и промена знака градијента температуре по дубини. Анализирани су бројне промене градијента температуре тла по дубини као последица промена температура ваздуха и на мереним дијаграмима (сноповима кривих) је евидентиран смер кретања топлоте од ваздуха ка тлу и обрнуто. На основу знака градијента температуре тла и облика дневних температурних профила одређена су три стања: стање у којем тло прима топлоту ( $dT/dz < 0$ ), стање у којем тло враћа топлоту у атмосферу ( $dT/dz > 0$ ) и стање топлотне равнотеже ( $dT/dz = 0$ ). Топлотна дифузивност  $D(d)$  је одређена на основу података промена температуре  $T(t)$  и температурних профила  $T(d)$  тла и показује тренд смањења са повећањем дубине. Процена влаге по дубини тла  $\theta(d)$  показује тренд повећања са дубином, а у корелацији са топлотном дифузивношћу  $D(d)$  дошло се до закључка да се садржај влаге смањује са повећањем дифузивности тла.

● Реализована су и окарактерисана два сензорска система са сегментираним NTC термисторима са редукованим димензијама за мерење протока воде  $Q$  у опсегу од 0,003 l/s до 0,3 l/s. Сензорски систем прототип А ради у циклусима од 30 s самозагревања / 90 s природног хлађења термистора (штедни режим напајања) док је сензорски систем В са континуалним напајањем. Мерени су одзиви струја самозагревања термистора  $I(Q)$  у функцији од протока воде у цевима (криве калибрације у опсегу температура од 5 °C до 30 °C, мерни подопсеци по 5 °C). При повећању температуре воде радни напони опадају од 24 V до 6 V, максималне струје самозагревања расту од 36 mA до 47 mA, а максималне снаге се смањују од 0,8 W до 0,28 W за сензорски систем А. Код сензорског система В напони опадају од 20 V до 10 V, максималне струје расту од 59 mA до 66 mA, а максимална снага опада од 1,18 W до 0,66 W.

Термички одзиви оба сензорска система за мерење протока воде  $T(Q)$  добијени су на основу струјних одзива  $I(Q)$  (термичке калибрационе криве) током самозагревања NTC термистора. Струје самозагревања термистора, тј. тренутни струјни одзиви  $I(Q, t)$ , мерени су при различитим облицима протока воде. Анализирани су кашњења предње и задње ивице одзива код квадратног и троугаоног импулсног протока за прототип В са континуалним напајањем, као и одзиви на густо распоређене импулсне протоке воде.

Одређена је температурна петља  $T(Q, t)$  термистора који се самозагрева (прототип В са континуалним напајањем) за квадратне и троугаоне побудне импулсе протока воде, при чему је мерење протока спроведено ултразвучним сензором који има занемарљиво кашњење одзива. Оба сензорска система за мерење протока воде са сегментираним термисторима имају несигурност мерења испод 3%.

Моделовање струјног  $I(Q)$  и температурног  $T(Q)$  одзива сензорских система за мерење протока воде спроведено је применом једначине топлотне равнотеже на контактної површини термистор – вода и уз примену Steinhart-Hart једначине. Коришћене су линеаризоване помоћне функције  $\text{Lin } F(I)$ ,  $I \in (20 \text{ mA}, 40 \text{ mA})$  и  $\text{Lin } F(T)$ ,  $T \in (273 \text{ K}, 303 \text{ K})$ .

● При реализацији анемометра најпре су испитиване статичке карактеристике  $I(U)$  дебелослојног сегментираниог NTC термистора редукованих димензија (паста  $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$  са димензијама  $25,4 \text{ mm} \times 6,35 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ ) без струјања ваздуха и у корацама од по  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  у режиму самозагревање / хлађење. Затим је оптимизован радни циклус термистора за мерење брзине ветра у ваздушном каналу при комбинованом термичком режиму  $30 \text{ s}$  самозагревање /  $90 \text{ s}$  природно хлађење.

Једноосни анемометар (сензорски систем С за праћење стационарног струјања ветра) је реализован са два сегментирани термистора. Одређени су одговарајући константни напони напајања у подопсезима температуре ваздуха од по  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  у распону од  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Снимљене су калибрационе криве струјног одзива  $I_{30}(v, T, \alpha)$  у функцији брзине ветра  $v$  и угла ветра  $\alpha$  у односу на правац ваздушног канала, док је температура ваздуха  $T$  као параметар мерена ван ваздушног канала. Струја термистора се зависно од подопсега мењала од  $14,5 \text{ mA}$  до  $24 \text{ mA}$ , при чему је напон напајања износио од  $25 \text{ V}$  до  $8 \text{ V}$ .

При промени температуре ваздуха од  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+40 \text{ }^\circ\text{C}$  максимална струја термистора расте, напон напајања се смањује, а максимална снага зависи од температурног подопсега и опада од  $0,36 \text{ W}$  до  $0,19 \text{ W}$ . Моделовање струјног одзива  $I_{30}(v, T, \alpha)$  анемометра у функцији од брзине ветра  $v$  и угла ветра  $\alpha$  у односу на ваздушни канал анализирано је применом једначине топлотне равнотеже. Коришћена је линеаризована помоћна функција  $\text{Lin } F(I)$ ,  $I \in (10 \text{ mA}, 30 \text{ mA})$ .

Троосни анемометар (систем D) са сегментираним термисторима дуж сваког појединачног правца је калибрисан и на хоризонталном и на терену са нагибом (од  $30^\circ$ ). Праћене су струје самозагревања сваког термистора  $I_{30x}$ ,  $I_{30y}$ ,  $I_{30z}$  у функцији од брзине ветра, угла ветра према осама и температуре ваздуха као параметра. Мерни опсег је подељен на подопсеге од  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  температуре ваздуха, а потребна снага је зависна од температурног подопсега и износи од  $0,2 \text{ W}$  до  $0,5 \text{ W} / 30 \text{ s}$  по каналу. Тренутни прототип троосног анемометра D нема појачавачку електронику а несигурност мерења интензитета брзине ветра износи око  $4,5 \%$ .

Код оба реализована анемометра, једноосног и троосног, мерни опсег брзине ветра од  $0 \text{ m/s}$  до  $8 \text{ m/s}$  се може повећати коришћењем редуктора протока ваздуха кроз канале (са редукционим односом од  $4:1$  и до преко  $30 \text{ m/s}$ ). Уз софтверску доградњу је могуће реализовати паметне анемометаре. Карактеристике реализованих прототипова анемометара упоређене су са одговарајућим карактеристикама комерцијалних сензорских система и најсличније су ултразвучном 3D Sonic анемометру.

## 7. Применљивост резултата у теорији и пракси

Резултати докторске дисертације кандидата Станка Алексића, дипл. физичара под називом "ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ

ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА" настали су на основу научноистраживачког и иновативног приступа реализованих сензорских система који имају и практичну примену.

Сензорски систем за мерење температурног профила тла - термисторски низ (прототип GST-1) је намењен за свакодневно мерење чиме је омогућено одређивање градијента температуре тла и одређивање влаге у земљи по дубини у 40 тачака на основу коорелације топлотна дифузивност - влага. Снимљени дневни профили тла су основа за формирање недељних и месечних изештаја који се могу користити за прогнозу подземног стања влаге. Праћење климатских промена у тлу омогућава агрономске анализе услова потребних за клијање, раст и развој корена и целе биљке, као и процену потребе наводњавања усева. GST-1 је погодан за веће фарме (велике површине) са више различитих засада за локално праћење стања тла до дубине од 550 mm, а несигурност мерења температуре је око 0,1 °C.

Сензорски систем В за мерење протока воде Q на бази сегментираних термистора са редукованим димензијама и континуалним напајањем, намењен је за праћење стационарних и променљивих протока воде у опсегу од 0,003 l/s до 0.3 l/s. Овај прототип може да служи као дигитални мерач протока и количине воде на водоводу у домаћинству, на водотоковима, у процесној индустрији, пољопривреди, итд... Сензорски систем А пројектован да ради у циклусима намењен је мерењу протока воде у рекама и снима температуру и проток по дубини воде. Прототип овог сензорског система ради у штедном режиму (30 s самозагревања / 90 хлађења) што му омогућава солидну аутономију (коришћење батерија).

Сензорски систем за мерење брзине ветра са сегментираним термисторима има два прототипа: прототип С - једноосни и прототип D - троосни анемометар. Мерни опсег (0 m/s - 8 m/s) се може уз коришћење редуктора протока ваздуха кроз канал (са односом 4:1) повећати на преко 30 m/s. Једноосни сензорски систем је намењен за праћење брзине ветра у одабраном правцу док троосни сензорски систем мери брзину ветра као вектора (интензитет, смер, углове у односу на X, Y, Z - осе). Троосни анемометар има могућност мерења брзине ветра и на теренима са нагибом и опцију доградње у паметни анемометар. Примена овог сензора осим у локалној метеорологији је и у пољопривреди, пољима са ветрогенераторима, аеродромима, спорту итд ...

## **8. Начин презентовања резултата научној јавности**

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације претстављају део научног рада кандидата у области сензора и сензорских система. Испитивања на дебелослојним термисторима на бази никл манганита ( $\text{NiMn}_2\text{O}_4$ ) и модификованог никл манганита ( $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ ) обухваћена овом докторском дисертацијом су до сада резултирала публикавањем три рада у међународним часописима (M21-3), три рада на међународним конференцијама (M33-2, M34-1), једним радом у националном часопису (M52-1) и једним радом на националној конференцији (M63-1), а два научна рада су тренутно у фази припреме за публикавање.

## ЗАЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Докторска дисертација кандидата Станка Алексића, дипл.физичара под називом "ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА" је у сагласности са прихваћеном темом од стране Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку и Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу.

Кандидат је систематски обрадио научну проблематику пројектовања дебелослојних NTC термистора на бази никл манганита и модификованог никл манганита и њихове примене у конструкцији три различита сензорска система. Публиковани научни резултати потврђују да је тематика спроведених истраживања актуелна са становишта савремених сензорских елемента и сензорских система на бази дебелослојних NTC термистора. Докторска дисертација је резултат самосталног рада кандидата и у потпуности испуњава све услове који се у поступку оцене писаног дела дисертације захтевају Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Крагујевцу и Статутом Факултета техничких наука у Чачку.

На основу претходно наведених чињеница Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Станка Алексића, дипл. физичара предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку и Већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да докторску дисертацију под називом:

### "ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА"

прихвати као успешно урађену и да кандидата позове на усмену јавну одбрану.

У Чачку и Београду, априла 2022. године.

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

1.  \_\_\_\_\_

**Др Нина Обрадовић, научни саветник, председник**

научна област: Материјали,


Институт техничких наука - ИТН САНУ, Београд

2.  \_\_\_\_\_

**Др Небојша Митровић, редовни професор, члан**

научне области: Примењена физика, Сензорика,

Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу

3.  \_\_\_\_\_

**Др Милољуб Луковић, научни саветник, члан**

научна област: Материјали,

Институт за мултидисциплинарна истраживања- ИМСИ

Универзитет у Београду.