



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ

Станко О. Алексић

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

докторска дисертација

Чачак, 2022. године



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES ČAČAK

Stanko O. Aleksić

**OPTIMIZATION AND MODELING OF
SENSOR SYSTEMS BASED ON NTC THICK
FILM SEGMENTED NICKEL MANGANESE
THERMISTORS**

Doctoral Dissertation

Čačak, 2022

Аутор	
Име и презиме:	Станко Алексић
Датум и место рођења:	16.05.1983, Београд
Садашње запослење:	Институт Ирители, Београд
Докторска дисертација	
Наслов: ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА	
Број страница:	124
Број слика:	72
Број библиографских података:	101
Установа и место где је рад израђен:	Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу
Научна област (УДК):	536.587; 620.172.21/.25 (043.3)
Ментор: Др Небојша С. Митровић, редовни професор, Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу	
Оцена и одбрана	
Датум пријаве теме:	31.10.2019
Број одлуке и датум прихватања теме докторске/уметничке дисертације:	IV-04-372 / 5 од 23.06.2020
Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Нина Обрадовић, научни саветник, Институт техничких наука, САНУ, Београд 2. Др Небојша Митровић, редовни професор, Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу 3. Др Милољуб Луковић, научни саветник, Институт за мултидисциплинарна истраживања, ИМСИ, Београд, Универзитет у Београду. 	
Комисија за оцену и одбрану докторске / уметничке дисертације:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Нина Обрадовић, научни саветник, Институт техничких наука, САНУ, Београд 2. Др Небојша Митровић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачку, Универзитет у Крагујевцу 3. Др Милољуб Луковић, научни саветник, Институт за мултидисциплинарна истраживања, ИМСИ, Београд, Универзитет у Београду. 	
Датум одбране дисертације:	

З а х в а л н и ц а

Докторска дисертација под називом "ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА" резултат је истраживања обављених у научној области Сензорика под руководством ментора проф. др Небојше Митровића са Факултета техничких наука у Чачку. Дисертација је рађена у оквиру пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја, евид. број 451-03-68/2020-14/200132 и претходног пројекта ТР 32016 Института ИРИТЕЛ, а.д. Београд, где сам запослен и где сам неколико година провео у експерименталном раду на изради и примени дебелослојних термистора. У истраживања NTC термистора су ме најпре укључили др Милољуб Луковић, научни саветник Института за мултидисциплинарна истраживања у Београду и проф. др Љиљана Живанов са Факултета техничких наука у Новом Саду, на чему им се посебно захваљујем. Даљи ток истраживања је водио ка развоју, оптимизацији и моделовању сензорских система са дебелослојним NTC термисторима за мерење профила температуре тла, брзине ветра при тлу и протока воде у цевима.

Др Нини Обрадовић, научном саветнику Института техничких наука – САНУ се захваљујем на изузетној сарадњи у области савремених електрокерамичких материјала и карактеризацији прахова специфичним експерименталним методама којима је успешно спроведено испитивање термисторских пасти на бази никл манганита и модификованог никл манганита као адекватног материјала за израду сензорских елемената. Проф. др Зорану Николићу са Физичког факултета у Београду захваљујем се на конструктивном доприносу при моделовању одзива сензорског система за стационарни проток течности. Посебну захвалност дугујем др Мирославу Лазићу, др Здравку Станимировићу и мр Латку Сибиноску из Института ИРИТЕЛ који су ми помагали при изради и штампању термисторских пасти на хибридној линији у Одељењу за микроелектронику и карактеризацији сензорских система у Лабораторији за климомеханичка испитивања. Институт ИРИТЕЛ, а.д. Београд ми је дао велику подршку на докторским студијама при избору теме и делу експерименталних истраживања спроведених у оквиру ове дисертације.

Научни резултати добијени током израде докторске дисертације су публиковани у водећим међународним и националним часописима и саопштени на међународним и домаћим конференцијама. Концепте мерења, моделовања и објављивања научних резултата је организовао проф. др Небојша Митровић, као ментор који ме је водио, храбрио, учио стрпљењу и прецизности у раду са сензорима, на чему му се искрено захваљујем.

Захваљујем се родитељима на бризи и подршци током целокупног школовања.

У Београду, 21. децембра 2021. године

Станко Алексић

Апстракт: Докторска дисертација има за тему три врсте сензорских система формираних од NTC термистора (дебелослојног типа). Термистори као сензорске компоненте су примењени за различита мерења: 1. температуре слоја земљишта по дубини, 2. протока воде и 3. вектора брзине ветра. Термисторске пасте су развијене од прахова NiMn_2O_4 (никл манганит) и праха $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ (модификовани прах) уз додатак органског носиоца прахова и везивног стакла. Дебелослојни термистори имају сложenu планарну вишећелијску структуру редно-паралелног (сегментираног) типа, која је оптимизована за праћење промена и преноса топлоте у испитиваним радним срединама (флуидима или земљи). Анализа електричних појава на дебелослојним сегментираним термисторима који се самозагревају вршена је за различите услове протока флуида. Температура земљишта (обрадивог слоја) по дубини мерена је свакодневно у више тачака за једногодишњи циклус. Електрични одзив на реализованим прототиповима сензорских системима са дебелослојним NTC термисторима је мерен а потом и анализиран као функција промене параметара амбијента: одређен је радни опсег, осетљивост и на крају је процењена несигурност мерења. Сва поменута истраживања и анализе електричних појава на дебелослојним термисторима и сензорским системима су вршена у циљу моделовања одзива и одређивања опсега примене. При томе су коришћени физички закони који описују рад термистора, а изведене су и одговарајуће релације математичко-физичког типа. Примена прототипова (сензорских система) описаних у овој дисертацији очекује се у индустрији, пољопривреди и метеорологији.

Кључне речи: дебелослојни NTC термистори, температурни профил тла, сензор протока воде, сензор брзине ветра.

Abstract : The topic of this dissertation are three kinds of sensor systems made of NTC thermistors (thick film type). The thermistors as sensor components were applied for different measurements: 1 ground temperature profile, 2. flow rate (liquids), and 3. wind velocity. Thermistors pastes are developed using the initial nickel manganese NiMn_2O_4 and modified nickel manganese $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ powders, organic vehicle and glass frits. Thick film thermistors have a complex planar cell-based structure of serial / parallel (segmented) type, which is optimized for monitoring a heat change and transfer in the operating media (fluids or ground). Analysis of electrical phenomena in thick film self-heating thermistors was done at different fluid flow regime. Analysis of ground temperature profile was based on daily temperature measurements at different depth points of the arable ground top layer during whole year cycle. The electrical responses on realized prototypes of sensor systems based on the NTC thermistors (thick films) were measured and initially analysed as a function of a few ambient parameters which affect the application range, sensitivity and inaccuracy of measurements. All mentioned experiments and analyses of electrical phenomena in the thick film thermistors and sensor systems were done with intention of modeling of the responses and defining of the application range. The physical laws which describe the thermistor operation were used and appropriate mathematical-physical equations were derived. The application of the described prototypes (sensor systems) in this dissertation is expected in industry, agriculture and meteorology.

Key words: thick film NTC thermistors, ground temperature profile, water flow rate sensor, wind sensor.

САДРЖАЈ :

1. УВОД	1
---------------	---

Теоријски део

2. NTC ТЕРМИСТОРИ : СИНТЕЗА, СВОЈСТВА, ПРИМЕНА	6
2.1. Опште о NTC термисторима	6
2.1.1. Принцип рада термистора	6
2.1.2. Температурска зависност отпорности	7
2.2. Материјали за NTC термисторе	8
2.2.1. Материјали за нискотемпературне термисторе	8
2.2.2. Материјали за високотемпературне термисторе	8
2.3. Добијање NTC термистора	9
2.3.1. Дијаграм тока добијања термистора	9
2.3.2. Карактеристике процеса добијања термистора	10
2.4. Синтеровање праха - идеални модел	10
2.4.1. Процес синтеровања	10
2.4.2. Температурни профил синтеровања	12
2.4.3. Параметри праха и синтеровање	12
2.5. Основна својства NTC термистора	13
2.5.1. Експоненцијални фактор (B)	13
2.5.2. Коефицијент релативне промене отпорности (α_R)	13
2.5.3. Проводност термистора (σ)	14
2.5.4. UI -карактеристика термистора	14
2.5.5. Хлађење термистора	15
2.5.6. Кашњење термистора при загревању	15
2.6. Примена NTC термистора	16
2.6.1. Принцип мерења температуре	16
2.6.2. Термистори у савременим уређајима и средствима	17
3. НИКЛ МАНГАНИТНИ ТЕРМИСТОРИ	18
3.1. Структура никл манганита	18
3.1.1. Кристална решетка спинела	18
3.1.2. Инверзни спинел	19
3.2. Добијање никл манганита	19
3.2.1. Карактеризација никл манганита	19
3.2.2. Фазни дијаграм система NiO-Mn ₂ O ₃ -O ₂	20

3.3. Синтеровање никл манганита	21
3.4. Својства никл манганита	23
3.5. Дебелослојни термистори	23
3.6. Танкослојни термистори	25
3.7. Примена NiMn ₂ O ₄ термистора	25
4. ДЕБЕЛОСЛОЈНИ СЕГМЕНТИРАНИ NTC ТЕРМИСТОРИ	27
4.1. Технологија дебелих слојева	27
4.2. Дебелослојне термисторске пасте	31
4.3. Дебелослојни сегментирани термистори	32
4.4. Прве примене сегментираних термистора	33
5. САВРЕМЕНИ СЕНЗОРИ ЗА МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ТЛА, ПРОТОКА ТЕЧНОСТИ И БРЗИНЕ ВЕТРА	34
5.1. Опште о сензорима	34
5.2. Мерење температуре	35
5.3. Пренос топлоте	37
5.3.1. Пренос топлоте кондукцијом	37
5.3.2. Пример преноса топлоте	38
5.4. Мерење градијента температуре тла	39
5.4.1. Размена енергије на површини земља-ваздух	39
5.4.2. Температурни профил горњег слоја земље	40
5.4.3. Сензори температуре тла	41
5.5. Мерење протока течности	41
5.5.1. Принципи рада сензора протока	42
5.5.2. Термички сензори протока течности	43
5.6. Мерење брзине ветра	43

Експериментални део

6. ТЕРМИСТОРСКИ НИЗ ЗА МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ТЛА	45
6.1. Конструкција термисторског низа	46
6.2. Карактеристике сензорских елемената	46
6.3. Калибрација термисторског низа	48
6.4. Мерење једнодневних температурних профила тла	48
6.5. Мерење месечних температурних профила тла	51
7. СЕНЗОРСКИ СИСТЕМ ЗА МЕРЕЊЕ ПРОТОКА ВОДЕ.	59
7.1. Конструкција новог сензорског елемената.	59

7.2. Електричне карактеристике сензорског елемента	60
7.3. Конструкција сензорског система А	61
7.4. Радна тачка сензорског система А	62
7.5. Одзив сензорског система А на проток воде	63
7.6. Конструкција сензорског система В	64
7.7. Одзиви сензорског система В на стационарни проток	66
7.8. Одзиви сензорског система В на импулсни проток	67
8. СЕНЗОРСКИ СИСТЕМ ЗА МЕРЕЊЕ БРЗИНЕ ВЕТРА.	69
8.1. Конструкција једноосног сензорског система С	69
8.2. Радна тачка сензорског система С	70
8.3. Одзив једноосног сензорског система С	71
8.4. Конструкција троосног сензорског ситема D	73
8.5. Одзив троосног сензорског ситема D на хоризонталном терену	74
8.6. Одзив троосног сензорског ситема D на нагибном терену	76
9. АНАЛИЗА И ДИСКУСИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА	78
9.1. Анализа мерења температуре тла помоћу термисторског низа	78
9.1.1. Анализа мерења температуре	78
9.1.2. Годишњи температурни профили	79
9.1.3. Температурни профили и топлотна дифузивност	81
9.1.4. Процена релативног садржаја воде у земљи	82
9.2. Анализа мерења протока воде помоћу сензорских система А и В	84
9.2.1. Оптимизација радне тачке сензорског система А	84
9.2.2. Температурни одзив сензорског ситема А	86
9.2.3. Анализа несигурности сензорског система А	86
9.2.4. Упоредна анализа са другим сензорским системима	87
9.2.5. Оптимизација радне тачке сензорског система В.	88
9.2.6. Температурни одзив термистора у сензорском ситему В	89
а). Температурни одзив за стационарни проток	89
б). Температурни одзив за импулсни проток	90
с). Температурна петља	91
9.2.7. Моделовање одзива сензорских система А и В	92
а). Моделовање струјног одзива	92
б). Моделовање температурног одзива	95
9.2.8. Анализа несигурности сензорског система В	96
9.2.9. Примена сензорских система А и В.	97

9.3. Анализа мерења брзине ветра помоћу сензорских система С и D	98
9.3.1. Оптимизација радне тачке сензорских система С и D	98
9.3.2. Зависност одзива сензорског система С од угла	99
9.3.3. Моделовање одзива сензорских система С и D.	100
9.3.4. Анализа несигурности сензорских система С и D.	102
9.3.5. Анализа карактеристика сензорског система D	102
9.3.6. Упоредивање сензорских система за мерење брзине ветра	104
10. ЗАКЉУЧАК	105
ЛИТЕРАТУРА	111
БИОГРАФИЈА	117
ДОДАЦИ : А) Изјава аутора о оригиналности докторске дисертације	122
Б) Изјава аутора о искоришћавању докторске дисертације	123

1. У В О Д

Мерење физичких величина помоћу савремених сензора и сензорских система подразумева добијање електричног сигнала и његову обраду. Добијени основни електрични одзив сензора је често ниског интензитета и потребно је да се појача, конвертује у дигитални облик и потом даље преноси и обрађује рачунаром. Свака од поменутих активности има своје карактеристике и ограничења, а оптимизација и моделовање служе да се сви делови уклопе у једну целину и да она функционише поуздано, дуготрајно и са што мањом несигурношћу мерења. Развој и израда сензорског елемента је први корак у развоју сензорског система а чине га: одабирање материјала за сензорски елемент (способност материјала да даје електрични одзив), конструкције сензорског елемента (функционални материјал и електроде), мерења побуде и одзива (баждарење и моделовање одзива аналитичким изразом). Већа осетљивост сензорског елемента и шири мерни опсег, оптимизација рада и минијатуризација су стални захтеви корисника, а осим тога стално се развијају нови сензорски елементи и сензорски системи који на тржишту конкуришу међусобно.

Два или више сензорских елемента (истих или различитих) које повезује и обрађује аквизициона карта и рачунар чине сензорски систем. За применљив и конкурентан сензорски систем потребни су оптимизовани сензорски елементи, аквизициона картица, контролер (персонални рачунар) са програмом за аквизицију, смештање података у меморију и посебни програми за обраду података. Аквизиција подразумева узимање података из одзива са мерног места у кратком интервалу и његову А/D конверзију. Међутим, подаци се могу узимати аквизиционом картом и за друге параметре на сензорском елементу као што су стање напајања и напони на предпојачавачу како би се комплетно пратио рад сензорског елемента и његових најважнијих стања (тзв. паметни сензорски системи). Ако се њихов одзив на више начина повеже са побудом, анализира програмом који даје поруке о стањима побуде и тако користи за управљање неким процесом, онда се овакав сензорски систем назива интелигентним (паметним).

У овој докторској дисертацији је реализован и испитиван нови наменски сензорски елемент - дебелослојни сегментирани NTC термистор, добијен на бази пасте од никл манганита (NiMn_2O_4) и модификованог никл манганита ($\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$). Истраживања су примењена за нове сензорске системе за мерење профила температуре тла, протока воде и брзине ветра. У уводу ће бити представљени укратко резултати на истраживању сваког од три поменута сензорска система.

Сензорски системи за мерење профила температуре тла су најчешће диск термистори постављени у низ на растојању од 30 cm до 50 cm па до дужине од неколико метара и намењени су за испитивање терена при постављању топлотних пумпи. Фино мерење градијента температуре тла (земље) на сваком сантиметру до дубине од 50 cm је захтев за

праћење подземног температурног режима за потребе истраживања у биологији и пољопривреди. Температурни режим обрадивог слоја земље (практично до 50 cm дубине) је врло променљив (дневно и у току године) и подложен је утицају из атмосфере (сунце, облаци, ветар, киша, снег) па је за детаљно праћење стања и анализу овог слоја конструисан и реализован нови прототип сензорског система састављен од низа дебелослојних термистора (сензорских елемената сегментираног типа) са 40 мерних тачака на дужини од 55 cm. Помоћу овог прототипа названог GST-1 је у току 2018. године свакодневно (ујутру и у подне) мерен профил (градијент) температуре тла. На основу ових података вршено је одређивање топлотне дифузивности и процена градијента влаге у земљи. У склопу климатских промена овиме је дат и допринос за прецизну контролу подземних стања у слоју земље који се користи за раст и развој биљака.

Сензори протока течности који се данас користе могу бити сврстани у више група (типова) као што су механички, електромеханички, електромагнетни, ултразвучни, оптички, термички на бази одвођења топлоте и други, а примењују се на водоводу, на рекама, у процесној индустрији и у пољопривреди. Примена и мерни опсег одређују врсту и конструкцију сензора. Сензори протока течности на бази одвођења топлоте раде при константној струји и примењују се за капиларне протоке течности, а много чешће за протоке гасова. Разлог томе је велики губитак топлоте грејача у течностима и брзина којом тај губитак треба надокнадити. Сензорски систем за мерење протока течности са дебелослојним термисторима (сегментираног типа) има интегрисан грејач и сензор температуре у један термисторски елемент који се самозагрева при константном напону, док је струја самозагревања истовремено и одзив на проток воде. Температура долазне воде је параметар при мерењу одзива система у функцији од протока воде, а напон напајања сегментираног термистора је адаптиван (мења се у малим скоковима на сваких неколико степени температуре долазне воде). Користећи ову идеју реализован је прототип сензорског система за мерење протока воде на водоводу са губитком топлоте и снаге термистора реда 0,5 W и мање. Коришћењем овог новог прототипа сензорског система вршена су мерења и анализа промене стања на термистору у стационарном и импулсном режиму протока. Посебно су анализирана термичка стања и кашњење одзива за побудом у реалном времену, снимљен је одзив за густ импулсни режим протока воде. Примена овог сензорског система осим у водоводима планира се у процесној индустрији и пољопривреди. Сензорски систем је повезан са вишеканалном аквизиционом картом и мери стање протока и одсуство протока помоћу интерних електрода на термистору као вишећелијском сензорском елементу (мерење градијента температуре услед протока).

Сензори брзине ветра (анемометри) такође се могу сврстати у више група (типова) као што су механички, електромеханички, ултразвучни, оптички, затим сензори на бази одвођења топлоте угрејане жице, притиска на мембрану и др. Примењују се у разним областима: у метеорологији, на аеродромима, ветропарковима, затим у пољопривреди, морнарици и спортовима. Сензор брзине ветра на бази губитка топлоте угрејане жице мења отпорност линеарно са брзином ветра. Нови сензорски систем за мерење брзине ветра реализован је са три сегментирана термистора (који се самозагревају сопственом струјом при константном напону).

Примењено је напајање термистора у циклусима: термистор се самозагрева сопственом струјом током периода од 30 s, а потом се током периода од 300 s прекида напајање, при чему се термистор хлади и враћа у почетно стање. Температура ваздуха (ветра) је параметар при мерењу одзива система у функцији од побуде, док је мерни опсег сензора издељен у више подопсега коме је придружен одговарајући напон напајања термистора (адаптивно напајање се мења у скоковима сваких 10 °C промене температуре ваздуха). Следећа иновација је употреба редуктора протока ваздуха чиме одзив постаје благо хиперболична крива. Када се поставе три сензора брзине ветра под правим углом у простору добија се троосни анемометар тј. сензорски систем са сегментираним термисторима који ради на бази одвођења топлоте у режиму напајања у циклусима од 30 s. Нови троосни анемометар је сензорски систем који поред брзине ветра мери температуру ваздуха и влагу у ваздуху као параметре. Сва мерења су обављена на прототипу сензорског система, док је потрошња снаге на самозагревање током 30 s била од 0,2 W до 0,6 W по сензорском елементу (сегментираним NTC термистору). Захтев за троосни анемометар проистекао је такође из пројекта TP 32016, као варијанта анемометра који нема покретне делове нити предпојачаваче и који има штедно напајање, а примењује се у метеорологији заједно са мерењем профила температуре тла у пољопривреди. Предмет истраживања је била оптимизација рада и веза између одзива и побуде. Анализиран је губитак топлоте, кашњење система, осетљивост и несигурност мерења. Одређен је вектор брзине ветра (интензитет, правац и углови у X, Y, Z координантном систему оријентисаном према компасу).

У овој докторској дисертацији целокупан научно истраживачки и технолошко развојни рад на примени сегментираних термистора за три напред поменута сензорска система, као и анализа и моделовање термичких појава на њима описан је у 10 глава од којих првих 5 представља Теоријски део, наредне три Експериментални део дисертације а у финалном делу су приказане Дискусија резултата и Закључак.

Теоријски део

У Теоријском делу после представљања предмета, циља и значаја докторске дисертације, у глави 2. NTC ТЕРМИСТОРИ: СИНТЕЗА, СВОЈСТВА, ПРИМЕНА дато је више целина које представљају теоријску основу за разумевање термистора од синтезе до примене: опште о NTC термисторима, материјали за NTC термисторе, добијање NTC термистора, синтеровање праха, основна својства NTC термистора и примена NTC термистора. После тога у глави 3. НИКЛ МАНГАНИТНИ ТЕРМИСТОРИ даје се теоријски осврт на термисторе од никл манганита потребан за разумевање настанка "custom designed" (наменских) дебелослојних пасти и израду дебелослојних сегментираних термистора: структура никл манганита, добијање никл манганита, синтеровање никл манганита, својства никл манганита, дебелослојни термистори, танкослојни термистори и примена NiMn₂O₄ термистора. У глави 4. ДЕБЕЛОСЛОЈНИ СЕГМЕНТИРАНИ NTC ТЕРМИСТОРИ даје се приказ припреме пасте од никл манганита и модификованог никл манганита и конструкција дебелослојних термистора: дебелослојне термисторске пасте, дебелослојни термистори, сегментирани термистори, моделовање сегментираних термистора и прве примене сегментираних термистора. У глави 5. САВРЕМЕНИ СЕНЗОРИ ЗА МЕРЕЊЕ

ТЕМПЕРАТУРЕ ТЛА, ПРОТОКА ТЕЧНОСТИ И БРЗИНЕ ВЕТРА кроз три посебне теме дат је шири осврт на мерење температуре, а затим приказ савремених сензора температуре, сензора протока течности и брзине ветра који се данас користе како би се директним поређењем са развијеним сензорским системима проналазиле сличности, разлике, предности и недостаци.

Експериментални део

У Експерименталном делу докторске дисертације су приказани резултати који се односе на израду и карактеризацију сензорских елемената (сегментираних термистора) и три различите врсте сензорских система (електрична анализа њиховог рада):

1) Дебелослојном (хибридном) технологијом реализоване су две врсте NTC термистора (сензорских елемената сегментиране конструкције) штампањем и синтеровањем $NiMn_2O_4$ и $Cu_{0,2}Ni_{0,5}Zn_{1,0}Mn_{1,3}O_4$ термисторске пасте, 2) Мерене су електричне карактеристике сегментираних дебелослојних термистора на собној температури: номинална електрична отпорност и капацитивност на сегментима, 3) Вршена су снимања зависности електричне отпорности R од температуре T у клима комори у опсегу од $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и одређене вредности експоненцијалног фактора NTC термистора (B), 4) Мерене су струјно напонске карактеристике $I(U)$ у функцији од температуре T у клима комори и одређене радне тачке и подопсези, 5) Вршено је мерење статичких карактеристика сензорских елемената у одсуству кретања флуида при различитим периодима самозагревања / хлађења, 6) Упоредно су мерени улазни проток воде ултразвучним сензором и помоћу сегментираних термистора: мерене су струје самозагревања и тренутни одзив на промене протока, 7) Мерени су термички одзив и термички хистерезис сензора протока, 8) Развијен је и карактерисан једоосни анемометар са сегментираним NTC термистором као сензорским елементом, 9) Развијен је и карактерисан троосни анемометар са X, Y, Z сегментираним термисторима за мерење вектора брзине ветра (интензитет, правац и углови према осама), 10) Вршено је снимање калибрационе криве за градијентни сензор температуре тла и једногодишње мерење температурног профила обрадивог слоја земље и процена влаге.

Најпре је у глави 6 приказан сензорски систем под називом ТЕРМИСТОРСКИ НИЗ ЗА МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ТЛА. Приказани су одељци: конструкција термисторског низа, карактеристике сензорских елемената, калибрација термисторског низа, а затим мерења једнодневних температурних профила и мерења месечних температурних профила тла. У глави 7 је приказан СЕНЗОРСКИ СИСТЕМ ЗА МЕРЕЊЕ ПРОТОКА ВОДЕ помоћу сегментираних термистора: прототип А који ради у циклусима и прототип В који ради континуално. Прво су приказане електричне карактеристике новог сензорског елемента, конструкција сензорског система А, радна тачка сензорског система А, одзив сензорског система А на проток воде. Затим су приказани конструкција сензорског система В, одзиви сензорског система В на стационарни проток, и одзиви сензорског система В на импулсни проток. У глави 8 је приказан СЕНЗОРСКИ СИСТЕМ ЗА МЕРЕЊЕ БРЗИНЕ ВЕТРА на бази одвођења топлоте сегментираних термистора: једноосни сензорски систем С и троосни сензорски систем D. Прво су приказани конструкција једноосног сензорског система С, радна тачка сензорског система С и одзив једноосног сензорског система С, а затим су

приказани конструкција троосног сензорског система D, одзив троосног сензорског система D на хоризонталном терену и одзив троосног сензорског система D на терену под нагибом.

АНАЛИЗА И ДИСКУСИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА приказани су у глави 9 за три врсте сензорских система и пет прототипова. Због тога ова глава има три одвојена дела. У одељку 9.1.-Анализа мерења температуре тла помоћу термисторског низа приказани су: анализа мерења температуре, годишњи температурни профили, температурни профили и топлотна дифузивност и процена релативног садржаја воде у земљи. У одељку 9.2.- Анализа мерења протока воде помоћу сензорских система А и В најпре су приказани: оптимизација радне тачке сензорског система А, температурни одзив, анализа несигурности и упоредна анализа са другим сензорским системима. Затим је приказана оптимизација радне тачке сензорског система В и температурни одзив: температурни одзив за стационарни проток, температурни одзив за импулсни проток и температурна петља. У наставку је приказано моделовање сензорских система А и В: моделовање струјног одзива и моделовање температурног одзива, анализа несигурности сензорског система В и примена одзива сензорских система А и В. У одељку 9.3.- Анализа мерења брзине ветра помоћу сензорских система С и D приказани су: оптимизација радне тачке сензорских система С и D, зависност одзива сензорског система С од угла ветра, моделовање одзива сензорских система С и D и анализа несигурности сензорских система С и D. На крају је дата анализа карактеристика сензорског система D и упоређивање сензорских система за мерење брзине ветра.

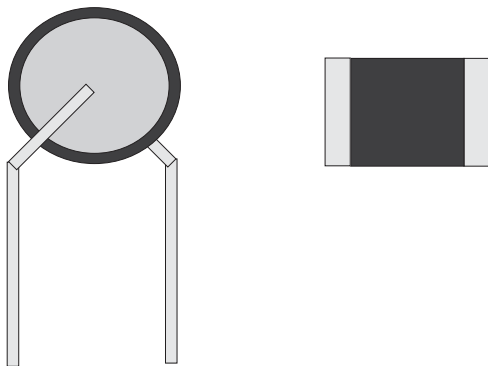
У ЗАКЉУЧКУ као посебној глави 10 су дати остварени резултати предмета и циља докторске дисертације за сваки од три типа сензорских система. Дати су правци могућих даљих истраживања на сензорским системима: аутоматизација мерења, мерења на удаљеним местима, брза калибрација сензорских система и доградња прототипова у паметне сензорске системе.

Теоријски део

2. NTC ТЕРМИСТОРИ : СИНТЕЗА, СВОЈСТВА, ПРИМЕНА

2.1. Опште о NTC термисторима

Термистор је електрична компонента са једним паром крајева и спада у групу отпорника. Појам термистор настао је комбинацијом две речи: **thermal** + **resistor** = **thermistor**, а означава компоненту чија се електрична отпорност нелинеарно мења са променом температуре. Уколико електрична отпорност термистора R расте са порастом температуре T , термистор има позитивни температурни коефицијент отпорности и обележава се са РТС, а уколико електрична отпорност термистора R опада са порастом температуре T , тада термистор има негативни температурски коефицијент отпорности NTC. Осим по вредности РТС и NTC термистори се као електричне компоненте разврставају по димензијама, снази коју троше услед загревања, температурном опсегу и врсти примене. На слици 1. приказани су NTC диск термистори са жичним изводима и NTC чип термистори за површинску монтажу са кратким изводима штампаним од дебелослојне проводне пасте на бочним странама компоненте.



Слика 1. Конструкција диск термистора (лево) и чип термистора (десно). Термисторски материјал (обележен црном бојом) и металне електроде (обележено сивом бојом) [1].

2.1.1. Принцип рада термистора

Први NTC термистори настали су 1930. године синтеровањем мешавине металних полупроводничких оксида. Сви елементарни полупроводници и мноштво оксида метала имају негативни температурни коефицијент отпорности NTC. Термистори на бази оксида метала имају полупроводничка својства: постојање малог броја слободних електрона и шупљина који на некој температури могу да савладају енергетски процеп. Већ при малом напону U доведеном на крајеве термистора, ови носиоци наелектрисања се крећу и дају струју I односно електричну отпорност термистора R . При томе струја кроз термистор је

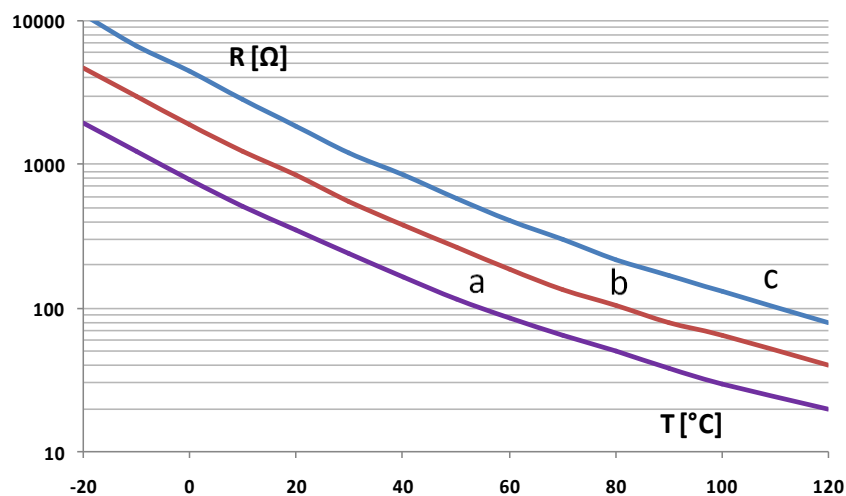
дата основном упрошћеном Shockley једначином (1) која важи за све полупроводнике [2]. Према тој једначини струја I зависи од напона баријере V_b полупроводничког оксида (тј. енергетског процепа E_g), броја носилаца наелектрисања n (слабо поларисани електрони) и њихове покретљивости (што све заједно даје струју I_0) и температуре термистора T :

$$I \approx I_0 \cdot \exp\left(\frac{qV_b}{kT}\right) \dots \dots (1),$$

где је q - елементарно наелектрисање, k - Болцманова константа.

2.1.2. Температурска зависност отпорности

Електрична отпорност R термистора је количник константог напона U и струје термистора I која је мења са температуром као у једначини (1) па се отпорност R такође мења експоненцијално са температуром као на слици 2.



Слика 2. Промена електричне отпорности R са температуром T за NTC чип термисторе, (www.murata.com, chip thermistors 04 02, $B \approx 2950$ K). Номинална електрична отпорност термистора: a - 350 Ω , b - 850 Ω , c - 1880 Ω .

Уколико је вредност енергетског процепа полупроводничких оксида метала велика ($E_g > 4$ eV, условно), материјал се сматра електричним изолатором и не користи се за термисторе. Уколико је енергетски процеп оксида метала реда 0,3 eV до 0,5 eV он се користи за нискотемпературске термисторе са радним опсегом -50 $^{\circ}\text{C}$ до 250 $^{\circ}\text{C}$, док се на пример оксиди метала са енергетским процепом преко 2,5 eV до 3 eV користе за високотемпературске термисторе са радним опсегом од 450 $^{\circ}\text{C}$ до 900 $^{\circ}\text{C}$. Наведена подела на температурне радне опсеге условљена је применом.

2.2. Материјали за NTC термисторе

2.2.1. Материјали за нискотемпературне термисторе

Материјали за нискотемпературне NTC термисторе су мешовити оксиди метала као на пример: $(\text{NiMn})_3\text{O}_4$, $(\text{NiMnCo})_3\text{O}_4$, $(\text{NiMnFeCo})_3\text{O}_4$, $(\text{Fe,Ti})_2\text{O}_3$ [3]. Они се често допирају у малим количинама другим оксидима као што су CuO , CoO , ZnO , ZrO_2 , Y_2O_3 , LiO , RuO_2 , ради стабилизације или модификације електричних својстава. Често се врши и варијација стехиометрије унутар истог система ради добијања ширег спектра промене отпорности, као на пример $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_y\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$ где се x, y мењају постепено $0 < (x, y) < 1$ [4,5]. Основна својства као што су T-опсег, специфична електрична отпорност ρ и експоненцијални фактор B материјала који се највише користе за нискотемпературне термисторе дати су у табели 1.

Табела 1. NTC материјали за нискотемпературне термисторе

Састав материјала	T- опсег [°C]	ρ [Ωcm]	B [K]
(Mn-Ni-Co)*	-50 до +130	0,5 -3	500-1500
$(\text{MnNiCoFe})_3\text{O}_4$ спинел	-50 до +150	4,5-400	2500-4500
$(\text{Fe,Ti})_2\text{O}_3$	-50 до +250	3-35	4000-4500

* LiO допиран, [1,3].

Поред наведених материјала у табели 1. за нискотемпературне термисторе у примени су још материјали као што су LaMnO_3 , BaCoO_3 , CaTiO_3 , NiMn_2O_4 - LaMnO_3 , NiMn_2O_4 - $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 0,3$), $\text{Ni}_{0,6}\text{Mn}_{2,4-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$, $\text{La}(\text{Cr,Mn})\text{O}_3$ [4-8].

2.2.2. Материјали за високотемпературне термисторе

NTC материјали за високотемпературне термисторе су обично композити две керамике како би се формирао што шири радни температурни опсег као на пример: $\text{Mg}(\text{Al}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$, LaCrO_3 - $\text{Mg}(\text{Al}_{0,7}\text{Cr}_{0,3})_2\text{O}_4$, $\text{Bi}_2\text{Zr}_3\text{O}_7$, ZrO_2/CaO , MAl_2O_4 - $\text{LaCr}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{O}_3$, $(a\text{Y}_2\text{O}_3+b\text{CeO}_2)_{0,4}\text{YCr}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{O}_3$, CaTiO_3 , $\text{Sr}_7\text{Mn}_4\text{O}_{15}$, $\text{Ce}_{1,2(1-x)}\text{Mn}_{1-x}\text{Si}_x$, BaTiO_3 , $\text{Ni}_{1,0}\text{Mn}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_4$, Fe_2TiO_5 , Al_2O_3 - Cr_2O_3 - ZrO_2 и многи други. Њихова основна својства дата су упоредно у табели 2. : T-радни опсег, специфична ел. отпорност ρ и експоненцијални фактор B материјала [9-13].

Табела 2. NTC материјали за високотемпературне термисторе

Састав материјала	T [°C]	ρ [Ωcm]	B [K]
$\text{Mg}(\text{Al}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$	20-1000	10^6 - 10^7	600-12000
LaCrO_3 - $\text{Mg}(\text{Al}_{0,7}\text{Cr}_{0,3})_2\text{O}_4$	500-1100	$2,67 \cdot 10^3$ - $3,72 \cdot 10^7$	6731-11886
CaTiO_3	300-500	$16,2 \cdot 10^4$ - $65,6 \cdot 10^6$	4000-15000
MgAl_2O_4 - $\text{LaCr}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{O}_3$	300-1000	$(1,76 - 1,22) \cdot 10^8$	2646-8711

2.3. Добијање NTC термистора

Процес добијања термистора обухвата добијање праха, пресовање праха и синтеровање испресака.

2.3.1. Дијаграм тока добијања термистора

Дијаграм тока процеса добијања NTC термистора приказан је на слици 3.



Слика 3. Дијаграм тока процеса за добијање NTC термистора.

2.3.2. Карактеристике процеса добијање термистора

Термисторски материјали за нискотемпературни опсег примене ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) се добијају хемијским путем из мешавине прахова металних оксида (Ni, Mn, Co, Fe, Zn, Cu,... Re: La, Ru...) и одгревањем на повишеној температури ($900\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Термисторски материјали за високотемпературни опсег примене такође се добијају из мешавине оксида метала (Y, Zr, Ti, Ca, Al, Nb, V, Cr, Ni, Mn, ..Re,...), међутим температуре одгревања полазних прахова оксида (слика 3.) су знатно више ($1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$) [14].

После одгревања примењује се процес млевења у кугличним млиновима, док се не добије погодна величина честице, односно агломерата честица. У производњи термисторских прахова све више се процес млевења (уситњавања) врши до нанометарске величине честица (10 nm до 50 nm). Нанометарске честице се међутим спонтано агломерирају услед влаге, електростатичких и механичких сила при млевењу у микронске агломерате (кластере) [15]. Карактеризација прахова подразумева мерење средње величине честица праха, микроструктуре односно величине агломерата (SEM) и проверу фазног састава једињења (XRD).

Пресовањем термисторских прахова у погодне облике (диск или чип) добијају се "зелени" узорци-испресци. У сам прах се убацује од 1 % до 2 % етил целулозе као "пластификатор" тј. као привремено везиво које омогућава лакше пресовање испреска и даје му чврстину док не почне процес синтеровања у коме ово везиво изгори. Испресци се синтерују на погодним температурама зависно од врсте материјала. Оптимална температура синтеровања T_{sint} и време синтеровања t_{sint} се одређују за сваки термисторски материјал посебно и држе у уским толеранцијама како би се у производњи одржала поновљивост основних својстава термистора у задатим границама. После тога врши се карактеризација синтероване керамике (микроструктура - SEM, провера састава XRD, густине, чврстине и електричних својстава).

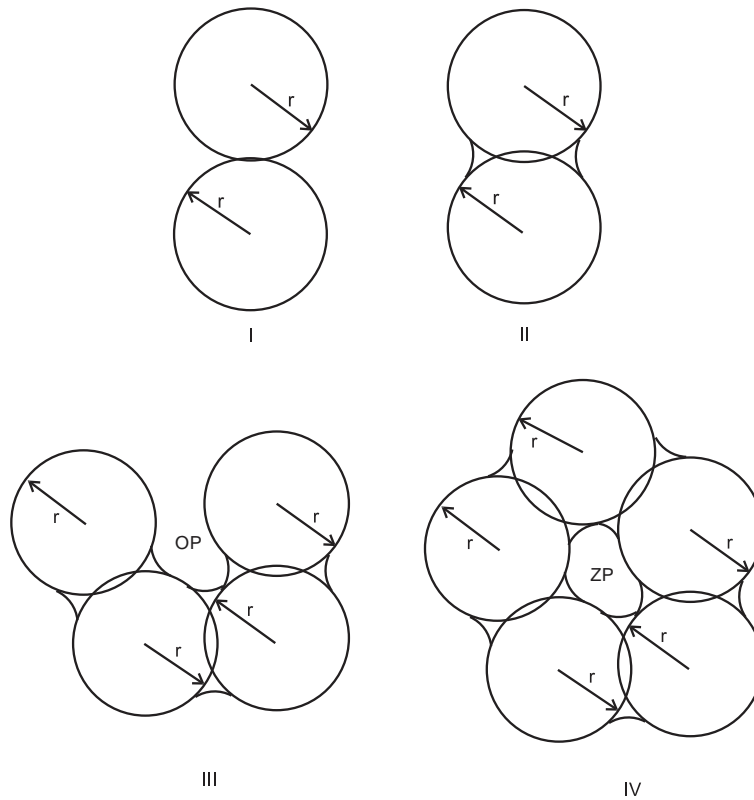
На синтероване термисторе наносе се дебелослојне електроде од PdAg пасте и синтерују на $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 10 min у конвејерској пећи. На крају се врше електрична мерења номиналне вредности отпорности термистора R_0 на собној температури ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) и провера вредности експоненцијалног фактора В, стабилности термистора, старења термистора итд.

2.4. Синтеровање праха - идеални модел

2.4.1. Процес синтеровања

Синтеровање праха као физички процес има неколико стадијума при чему се пресовање праха сматра претпочетним стадијум синтеровања, јер за време пресовања у калупима под великим притиском (0.2 GPa , на пример) настају први контакти између честица праха. Како даље повећање притиска не може довести до неког пропорционалног повећања густине, а технички је на граници прскања калупа и појединих делова пресе, повећање притиска изнад уобичајеног се ретко примењује. Да би се даље повећала густина испресака потребно је узорке ставити у пећ и постепено подићи температуру да границе честица праха на

површини омекшају и да се формира врат (први стадијум синтеровања) [16]. Даље повећање температуре доводи до раста врата и знатнијег повећања густине узорка. На слици 4. приказано је формирање врата (I) и раст врата (II) за модел две сферне честице (идеални модел).



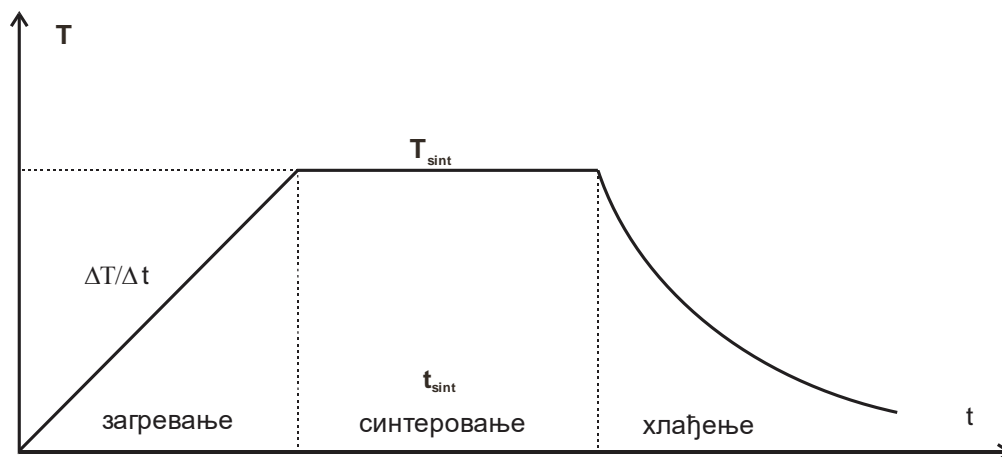
Слика 4. Стадијуми синтеровања за идеални модел са сферним честицама исте величине: I - формирање врата, II - раст врата, III - формирање отворених пора - OP, IV - формирање затворених пора - ZP, [16].

При даљем повећању температуре у пећи долази до формирања отворених пора (III) а затим и до формирања затворених пора (IV). У завршној фази синтеровања температура се не повећава већ је константна током времена реда величине неколико сати. У последњем стадијуму долази до смањења броја и величине затворених пора ради добијања поликристала густине блиске густини монокристала.

У пракси честице су неједнаке, неправилног облика, различите по слободној енергији на површини честице, па је идеални модел везан за просечну величину честице. Пошто ситније честице (нанометарске) агломерирају имамо појаву да се са повећањем температуре у пећи најпре агломерат по површини делимично истопа и слепи у кристално зрно које је по структури нанокристално. Затим се таква сложена зрна даље синтерују слично као микронска зрна.

2.4.2. Температурни профил синтеровања

Температурним профилем синтеровања у пећи се може управљати: брзином загревања, температуром и временом синтеровања, брзином хлађења (слика 5.).



Слика 5. Температурни профил $T(t)$ пећи за синтеровање : T_{sint} - температура синтеровања, t_{sint} - време синтеровања.

Осим тога могу се мењати својства праха, допанте и услови пресовања. Све заједно даје нова својства истог материјала зависно од начина управљања микро и наноструктуром и процесом синтеровања [17]. Уколико се током синтеровања јављају делимично и хемијске реакције (REDOX, на пример), затим појаве две или више фаза, промене кристалне решетке и друге појаве, тада управљање својствима поликристалног - синтерованог материјала постаје још сложеније [18].

2.4.3. Параметри праха и синтеровање

Према напред изложеном параметри процесирања електрокерамике се могу груписати у две групе: параметри праха и параметри синтеровања (табела 3.).

Табела 3. Параметри процесирања електрокерамике

Параметри праха:	Параметри синтеровања:
Величина и облик честице	Притисак при пресовању праха
Расподела величине честица	Температура / време синтеровања
Степен агломерације	Атмосфера
Присуство нечистоћа	Брзина загревања
Хемијски састав	Брзина хлађења

Синтеровање у течној и синтеровање у чврстој фази су два основна типа синтеровања. Синтеровање у течној фази у већој или мањој мери се јавља код полидисперзних честица

где се ситније честице брже топе или при додавању допаната који се топе испод температуре синтеровања [19]. Пример је синтеровање 96 % Al_2O_3 са додатком 4% SiO_2 на $1600\text{ }^\circ\text{C}$; иначе 99,5 % чист Al_2O_3 се синтерује на око $2000\text{ }^\circ\text{C}$.

Код синтеровања NTC термистора често се користе допанти посебно ради снижавања температуре синтеровања, подешавања и стабилности електричних својстава (табеле 2. и 3.). Поред тога прах термистора је полидисперзан и агломерисан тако да се увек очекује мање или веће присуство синтеровања у течной фази.

2.5. Основна својства NTC термистора

У основна својства NTC термистора спадају номинална електрична отпорност R_0 на собној температури T_0 ($293,16\text{ K}$) и експоненцијални температурски коефицијент термистора B , радни температурни опсег T -опсег и Кири тачка (Curie температура) изнад које термистор незнатно мења отпорност са температуром.

2.5.1. Експоненцијални фактор (B)

Промена отпорности термистора у функцији од температуре $R(T)$ је приказана на слици 2. као главна карактеристика термистора. Отпорност термистора $R(T)$ се мења приближно према формули (2) која се најчешће користи у пракси:

$$R \approx R_0 \cdot \exp\left[B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \dots \dots (2).$$

Међутим, промена електричне отпорност NTC термистора R је сложенија и мења се експоненцијално / логаритамски са температуром T према Steinhart-Hart формули [20]:

$$R = A \cdot \exp\left[\frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3} \dots \dots\right] \dots \dots (3),$$

где су A , B , C константе које се експериментално одређују са криве $R(T)$ за тражени уски температурни опсег. При апроксимацији ове једначине на први члан за две различите температуре T_1 и T_2 добијају се две различите отпорности R_1 и R_2 , а њихов однос је:

$$R_1 = R_2 \cdot \exp\left[B \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \text{ где је } B = \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \dots \dots (4).$$

2.5.2. Коефицијент релативне промене отпорности (α_R)

Користећи апроксимативни израз $R(T) = A \cdot \exp(B/T)$, добија се коефицијент релативне промене отпорности са температуром TCR:

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \dots \dots (5).$$

Коефицијент α_R (TCR) за NTC диск термистор отпорности $R_0 \approx 1 \text{ k}\Omega$ се мења са променом температуре T (табела 4.). Изнад Киријеве тачке (на пример $130 \text{ }^\circ\text{C}$, за изабрани NTC материјал) термистор се понаша као обичан отпорник (благо расте отпорност R) [21]. Узрок томе је појава да су сви носиоци наелектрисања изнад Киријеве тачке у полупроводнику већ искоришћени (засићење), па са даљим повећањем температуре они повећавају број судара са кристалном решетком и међусобно, што макроскопски резултује у повећању електричне отпорности термистора.

Табела 4. Промена коефицијента α_R (TCR) за NTC термистор

T [°C]	0	25	55	85	100
R [kΩ]	3.277	1.002	0.3014	0.1097	0.0695
α_R (TCR)[%/°C]	-5,21	-4,42	-3,71	-3,13	-2,9
$\Delta R/R$ [%]	5	4,5	4,0	3,4	3

2.5.3. Проводност термистора (σ)

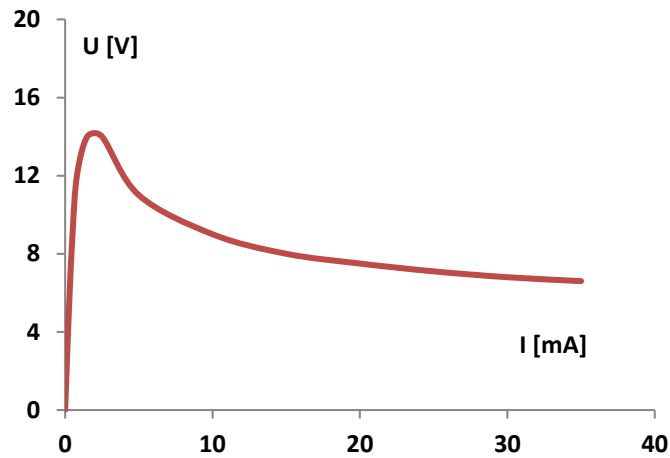
Проводност термистора σ је пропорционална кинетичкој енергији kT (k - Болцманова константа, T - апсолутна температура) што произилази из упрошћене Shockley једначине (1), већ дате у уводном делу. Проводност термистора σ зависи од енергије активације ΔE (потребне да се ослободи електрон у полупроводнику, тј прескочи баријера - енергетски процеп ка проводној зони) и може се описати следећим изразом:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \dots \dots (6),$$

где је σ_0 почетна проводност на собној температури T_0 . Овај израз важи за полупроводнике, полупроводничке легуре и полупроводничке оксиде [22].

2.5.4. UI - карактеристика термистора

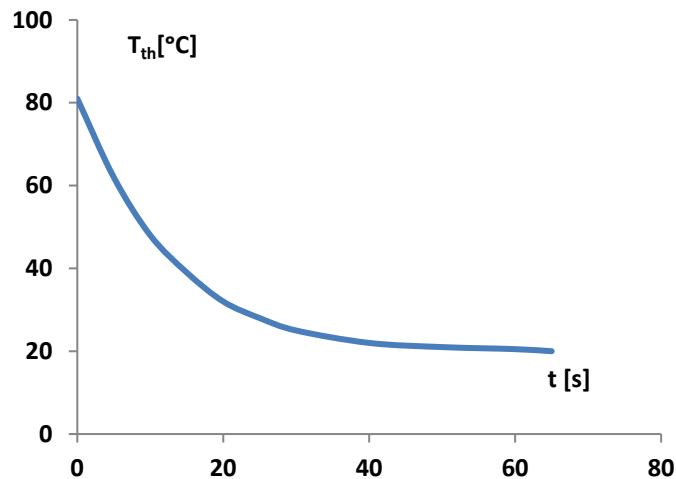
Осим електричне отпорности R и проводности σ за NTC термисторе су важне у примени UI карактеристика, карактеристика хлађења и кашњење термистора. UI - карактеристика је скоро линеарна на успонском делу криве (слика 6.) са повећањем струје I до 2 mA , одвођење топлоте са термистора у ваздух је ефикасно, промена температуре термистора је мала па се отпорност термистора R мало мења и напон U на термистору расте линеарно. После повећања струје I кроз термистор изнад 2 mA па до 40 mA хлађење није довољно ефикасно и термистор се греје, па отпорност термистора R опада експоненцијално, а тиме опада и напон на термистору [23].



Слика 6. Типична UI карактеристика NTC термистора [23].

2.5.5. Хлађење термистора

Када се струја кроз термистор прекине, он се хлади (конвекцијом ваздуха) $T_{th}(t)$ и потребно је одређено време t (око два минута и више) да се охлади до собне температуре (слика 7.).

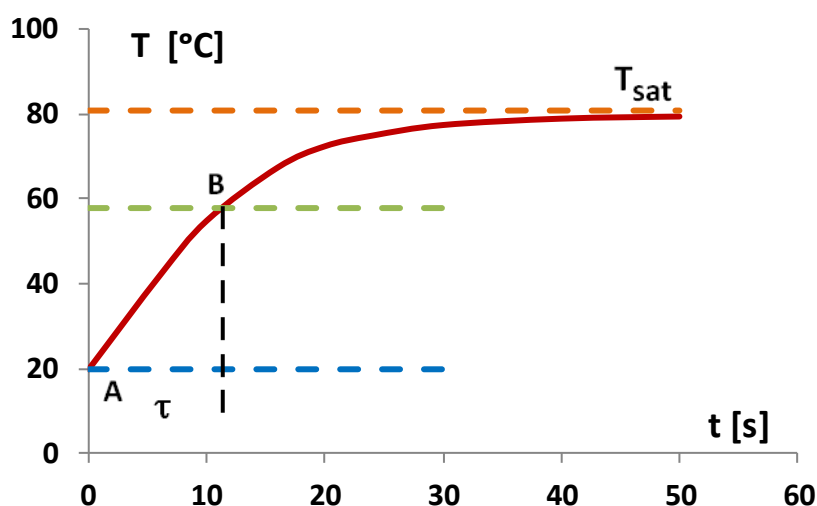


Слика 7. Типична крива хлађења NTC термистора [23].

2.5.6. Кашњење термистора при загревању

Типична крива загревања термистора сопственом струјом дата је на слици 8. где је приказано кашњење термистора и временска константа загревања. Кашњење термистора

настаје при укључењу на фиксан радни напон U . Временска константа термистора τ је време потребно да се термистор прикључен на фиксан напон U угреје сопственом струјом I од собне температуре T_A (тачка А) до температуре T_B (тачка В) која износи 62.3% од $\Delta T = T_{sat} - T_A$ где је T_{sat} температура засићења која настаје после дужег времена t при поменутом прикљученом напону: време протекло при прелазу из стања А до В је $\tau = t_B - t_A$ назива се временом кашњења при загревању [24].



Слика 8. Типична крива кашњења температуре NTC термистора T при укључењу на константан напон [24].

Осим наведених карактеристика термистора као што су R , B , α_R , за примену термистора је битна и поновљивост UI - карактеристике (постоји мали хистерезис, као код свих полупроводника) и поновљивост после дужег времена (старење термистора).

2.6. Примена NTC термистора

Основна примена NTC термистора је мерење температуре чврстих тела, течности и гасова, градијента температуре, преноса топлоте, мерење топлотног флукса. Мерење температуре може се обављати у једној тачки, у више тачака или на некој површини (топлотно зрачење).

2.6.1. Принцип мерења температуре

За мерење температуре у ваздуху, води или тлу помоћу термистора потребно је баждарење отпорности R_0 на собној температури $T_0 = 293,16 \text{ K}$ ($\approx 20 \text{ °C}$), мерење отпорности R_1 на некој температури T_1 и зависност $R(T)$ тј., аналитички модел за $R(T)$ у првој апроксимацији као у једначини (2) и израз за експоненцијални коефицијент B који је дат у једначини (4), па се из њих добија тражена температура T_1 :

$$T_1 = B \cdot T_0 / [B + T_0 \cdot \ln(\frac{R_1}{R_0})] \dots \dots (7).$$

Код мерења температуре T експоненцијални коефицијент термистора B је константан само у уском опсегу у околини собне температуре. Зато се при коришћењу термистора за мерење температура T које су далеко од собне температуре термистор поново баждари око те нове температуре тј. поново се одреди вредност коефицијента B у новом опсегу око тражене температуре.

За мерење преноса топлоте користе се калориметријске једначине за пренос топлоте, а мери се само улазна и излазна температура односно њихова разлика [25]. Мерење топлотног флукса који се зрачи мери се индиректно болометром [26]. Мерење протока флуида на бази губитка топлоте термистора који се загрева и мерења времена прелета топлотног импулса су сложенији облици примене термистора [27].

2.6.2. Термистори у савременим уређајима и средствима

NTC термистори се у електроници користе на разне начине: за компензацију промене отпорности у електронским колима, за израду мерних мостова са термисторима, постепено укључење неких склопова (уношење кашњења), за заштиту од прегревања, укључење вентилатора, термостата и других електричних направа (рачунари, штампачи, процесори, монитори, телекомуникациони уређаји итд).

У саобраћајним средствима мери се и спољашња и унутрашња температура, температура мотора на више места (аутомобил, аутобус, воз, авион, брод), затим климатизација и грејање у зградама, температура у ваздуху, на тлу, затим температура у малим и велики кућним апаратима, у пољопривреди, рударству, процесној индустрији, привредним објектима, медицини, војсци итд. Због тога је мерење температуре једно од најраспрострањенијих мерења.

Термистори су постали незаменљиви за мерење температуре, а у односу на капиларни термометар, термопарове и оптичке термометре имају низ предности: масовно се производе и јефтини су, имају велику осетљивост, дуготрајност, лако се повезују са електричним колима, малих су димензија, уклапају се у сложеније сензоре и еколошки су безбедни. Иако се производе и примењују већ пола века и даље се јављају нове примене и нови термисторски материјали, иновирани мерне методе и слично, што је део научно истраживачког и технолошко развојног истраживања многих лабораторија у свету.

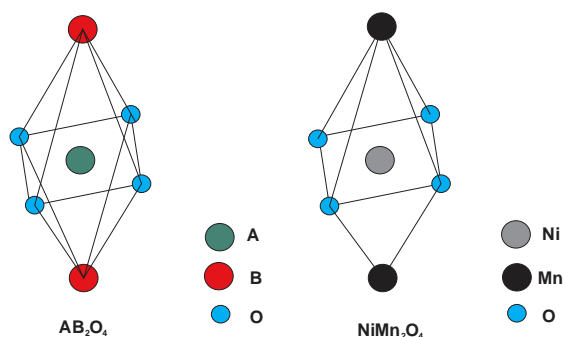
3. НИКЛ МАНГАНИТНИ ТЕРМИСТОРИ

3.1. Структура никл манганита

Никл манганит NiMn_2O_4 се добија индустријски хемиском реакцијом у чврстом стању - загревањем на $900\text{ }^\circ\text{C}$ до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ мешавине оксида прахова NiO и MnCO_3 у моларном односу $1 : 2$, при чему се ослобађа CO_2 који слободно излази из пећи у ваздух [28].

3.1.1 Кристална решетка спинела

Настало једињење има кристалну структуру типа спинела $\text{A}^{2+}\text{B}_2^{3+}\text{O}_4$ где се у тетраедарском положају у центру решетке налази атом $\text{A}=\text{Ni}$, а у октаедарском положају на крајевима атом $\text{B}=\text{Mn}$ као на слици 9.



Слика 9. Кристална решетка спинела $\text{A}^{2+}\text{B}_2^{3+}\text{O}_4$ и никл манганита NiMn_2O_4

У спинелу $\text{AB}_2\text{O}_4 = \text{AO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ на положају А могу да се налазе двовалентни метали као што су Ni , Co , Cu , Fe , Zn , Re (односно $\text{AO} = \text{NiO}$, CoO , CuO , FeO , ZnO , ReO), док се на месту тровалентних метала В могу наћи Mn , Fe (односно на месту B_2O_3 да се налазе оксиди Mn_2O_3 , Fe_2O_3) [29]. У руди гвожђа се налазе спинели као магнетит, хаузманит, мангано - ферит, гвожђе - манганит и други, чији су састави дати у табели 5.

Табела 5. Природни спинели у руди гвожђа [29]

магнетит	Fe_3O_4	$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
хаузманит	Mn_2O_4	$\text{MnO} \cdot \text{Mn}_2\text{O}_3$
манган-ферит	MnFe_2O_4	$\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
цинк-ферит	ZnFe_2O_4	$\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
никл-ферит	NiFe_2O_4	$\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
гвожђе-манганит	FeMn_2O_4	$\text{FeO} \cdot \text{Mn}_2\text{O}_3$

3.1.2. Инверзни спинел

Уколико дође до замене места за A^{2+} и B^{3+} атома у спинелу он се назива инверзни спинел у односу на нормални спинел $AB_2O_4 = AO \cdot B_2O_3$. Постоје и делимично инверзни спинели или мешовити спинели. Тако је цинк-ферит $ZnFe_2O_4 = Zn(Fe_2)O_4 = ZnO \cdot Fe_2O_3$ нормални спинел, док је никл-ферит $NiFe_2O_4 = NiO \cdot Fe_2O_3$ инверзни спинел јер има следећи распоред атома: $Fe^{3+}(Ni^{2+}Fe^{2+})O_4$. Код гвожђе-манганита $MnFe_2O_4$ који се користи као термисторски материјал распоред атома А и В у спинелу је: $Mn^{2+a}Fe^{3+b}(Mn^{2+c}Fe^{3+d})O_4$ (на пример $a=0,6$; $b=0,4$; $c=0,4$; $d=1,6$), па спада у мешовите или сложене спинеле.

Носиоци полупроводничких својстава $NiMn_2O_4$ термистора су јони који мењају положај из октаедарског у тетраедарски и обрнуто: $2 Mn^{3+} \rightarrow (Mn^{2+}, Mn^{4+})$, па Mn^{2+} попуњава место ваканције где недостаје Ni^{2+} , што ствара делимичну инверзију спинела и поправља полупроводничка својства термистора [30].

Снижавање запреминске отпорности $NiMn_2O_4$ постиже се делимичном субституцијом Ni, Fe атома са Cu, Zn атомима тј. додавањем CuO, ZnO у почетну смешу прахова оксида чиме настају сложени мешовити спинели који су делимично инверзног типа, на пример: $Cu_xZn_{1,0}Ni_{0,5}Mn_{1,5-x}O_4$ ($0 \leq x \leq 1$) [31].

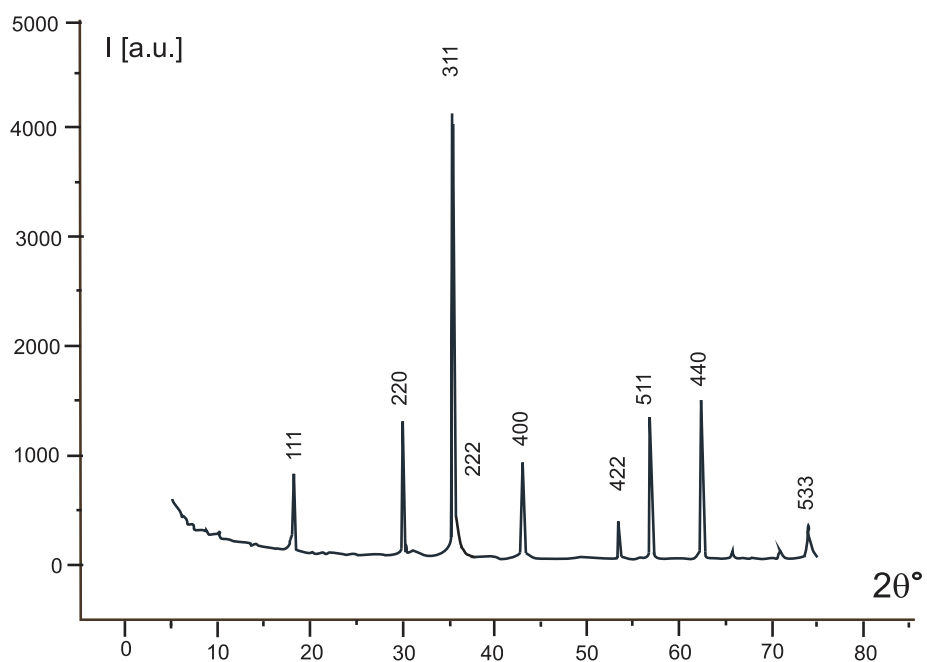
3.2. Добијање никл манганита

У производњи никл манганитних $NiMn_2O_4$ термистора примењује се класична технологија за припрему елетрокерамичких материјала са мешавином прахова оксида метала, описано у 2.3.1. и дато дијаграмом тока на слици 3.

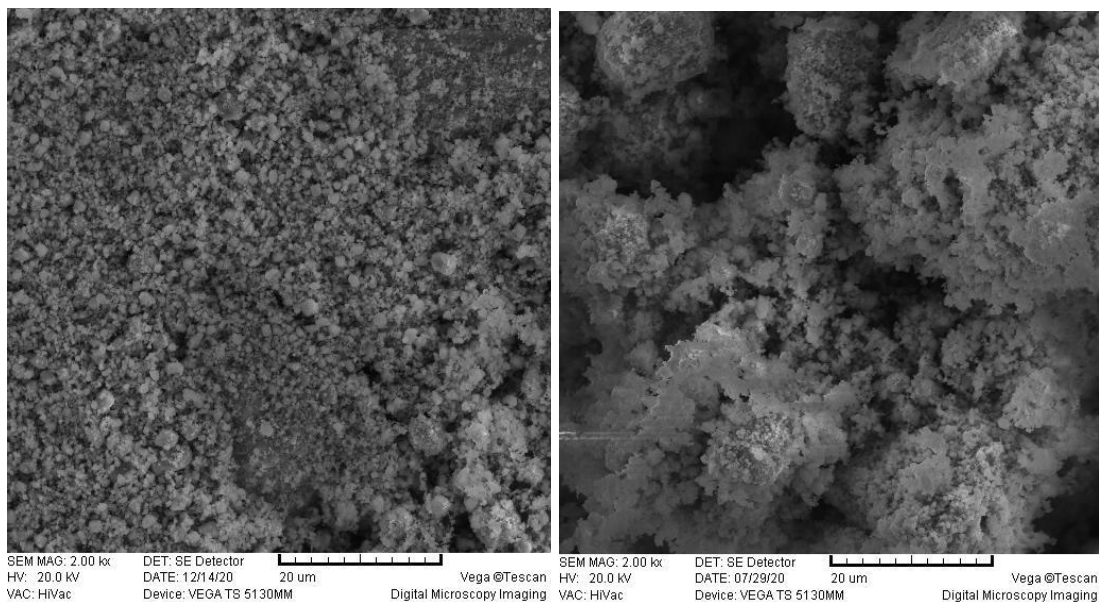
3.2.1. Карактеризација никл манганита

Користећи $NiMn_2O_4$ прах сопствене израде добијен према процедури приказаној у одељку 1.3. у Лабораторији за материјале, институт ИРИТЕЛ вршена је карактеризација праха: Снимљен је XRD - дијаграм за чист никл манганит (приказан на слици 10.). Структура праха је приказана SEM микрографијом на слици 11. Прах $NiMn_2O_4$ млевен 2 часа у кугличном млину је агломерисао па се на слици 11. уочавају агломерати честица. Мешањем овог праха и органског везива формирана је дебелослојна паста NTC 3К3, а синтеровани дебели слојеви су приказани у одељку 3.5.

Никл манганит припада групи Fd-3m (кубичној групи). Никл манганити прахови се могу добити и из других прекурсора (хлорида, нитрата, оксалата, цитрата, ацетата...) хидротермалном методом [32-34]. Тако се у лабораторијама добијају нанопрахови велике чистоће и танки слојеви никл манганита Пекинијевом (Pechini) методом [35, 36].



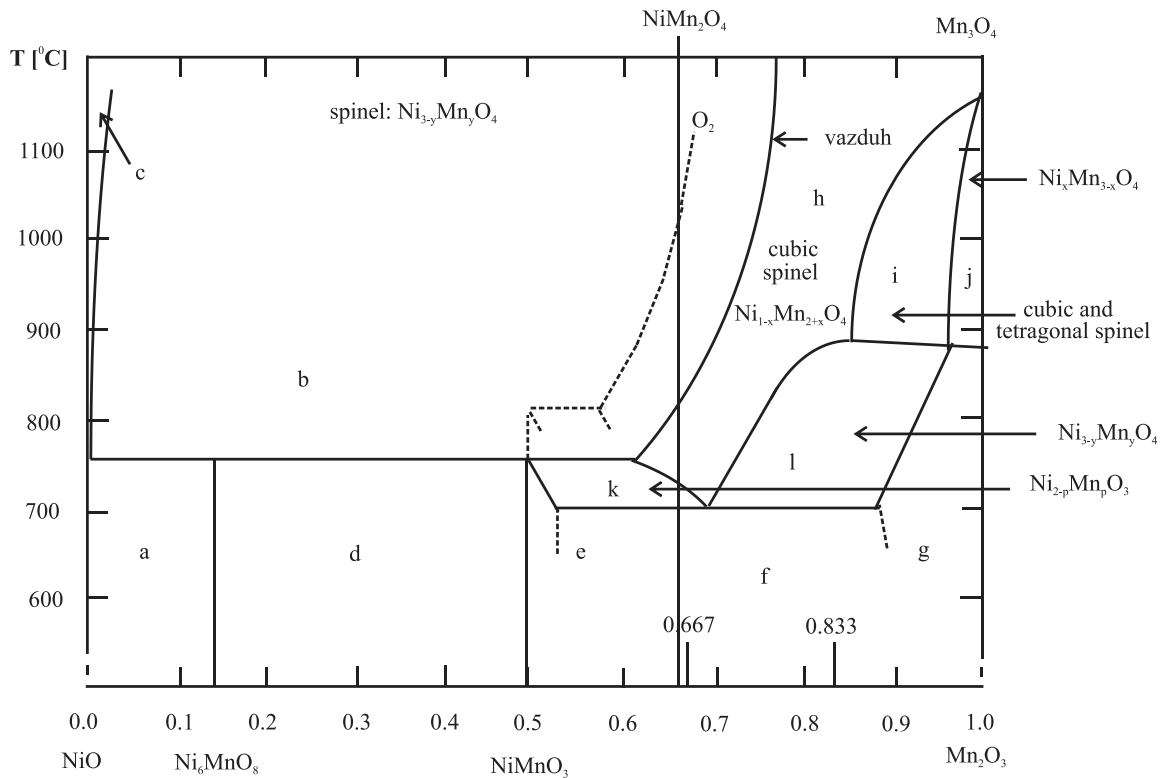
Слика 10. XRD - дијаграм за чист никл манганит NiMn_2O_4 прах.



Слика 11. SEM праха NiMn_2O_4 после млевења у кугличном млину Fritch IV.

3.2.2. Фазни дијаграм система $\text{NiO-Mn}_2\text{O}_3\text{-O}_2$

Фазни дијаграм система $\text{NiO-Mn}_2\text{O}_3\text{-O}_2$ од $500\text{ }^\circ\text{C}$ до $1200\text{ }^\circ\text{C}$ је дат на слици 12. према литератури [37].



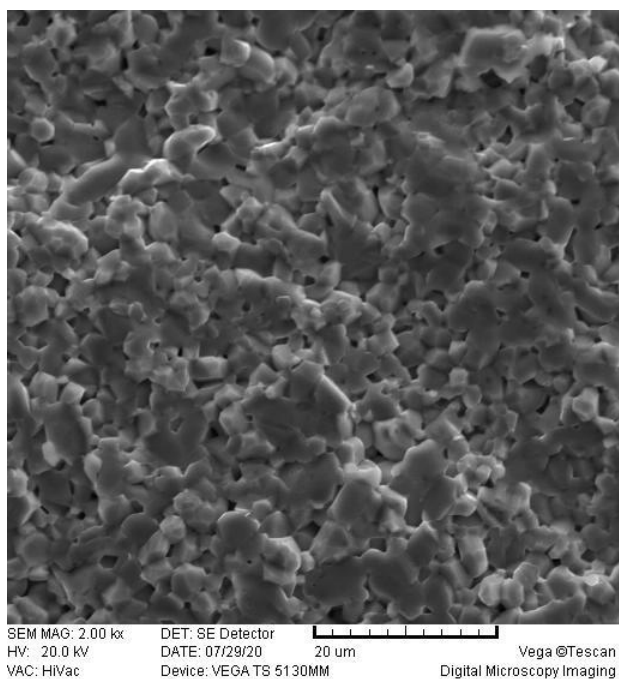
Слика 12. Фазни дијаграм система NiO-Mn₂O₃-O₂ [37].

Полазни прах MnCO₃ до 480 °C у ваздуху се распада и формира Mn₂O₃ а ослобађа се CO₂. Надаље изнад 500 °C реакције између NiO и Mn₂O₃ зависе од моларног односа поменутих оксида (фазни дијаграм на слици 12.). Зависно од моларног односа добијају се једињења типа Ni_{1-x}Mn_{2+x}O₄, Ni_xMn_{3-x}O₄, Ni_{3-y}Mn_yO₄ и Ni_{2+p}Mn_pO₃ обележена стрелицама. Никл манганит NiMn₂O₄ настаје у присуству ваздуха на око 1000 °C при моларном односу NiO и Mn₂O₃ од 0.667 (обележено вертикалном линијом на фазном дијаграму).

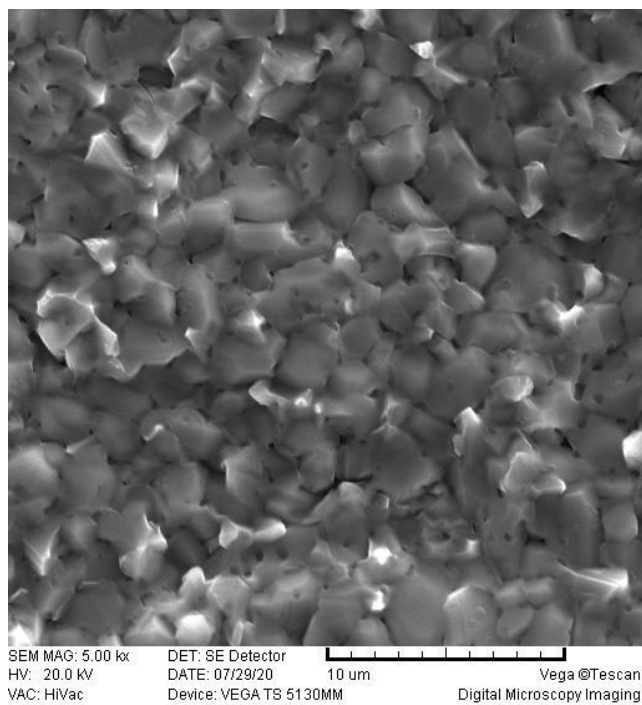
3.3. Синтеровање никл манганита

Синтеровање испресака од NiMn₂O₄ праха је оптимално на 1200 °C / 2 h. Међутим у функцији од времена активације праха (млевења у кугличном млину) температура синтеровања може да се мења. За испреске термисторског праха NTC 3K3 од чистог никл манганита NiMn₂O₄ пресоване при 0.2 GPa синтероване на 1200 °C / 2 h и 1250 °C / 2 h добијена је различита микроструктура приказана на сликама 13. и 14. респективно.

Док се на синтерованом диск узорку на 1200 °C / 2h виде отворене поре (III стадијум синтеровања), на другом узорку 1250 °C / 2 h пресованом под истим условима виде се углавном само затворене поре (IV завршни стадијум синтеровања). За веће финалне густине другачија су електрична својства (ниже вредности специфичне електричне отпорности, на пример).



Слика 13. SEM микрографија структуре диск узорака NiMn₂O₄ , синтерованог на температури 1200 °C / 2 h.



Слика 14. SEM микрографија структуре диск узорака NiMn₂O₄ , синтерованог на температури 1250 °C / 2 h.

3.4. Својства никл манганита

Својства никл манганита NiMn_2O_4 зависе од својстава праха и процеса синтеровања како је описано у 1.3. (табела 3.). Утицај млевења и активације праха никл манганита огледа се у извесном снижавању температуре синтеровања и повећању густине синтерованих термистора. Узрок томе је ситнији полидисперзни прах никл манганита и развијенија површина честице што доводи до агломерације и формирања зрна са нанокристалном структуром [38]. То доводи до значајног смањења специфичне електричне отпорности, а повећања топлотне проводности термистора. Веће смањење специфичне електричне отпорности добија се модификацијом спинела никл манганита тј. делимичном субституцијом полазних прахова NiO и Mn_2O_3 у једињењу NiMn_2O_4 са праховима CuO и ZnO . На тај начин формиран је термисторски прах $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ који је коришћен за припрему термисторске пасте за штампање сегментираних термистора са редукованим димензијама (глава 4.).

У табели 6. дата су важнија својстава синтерованог никл манганита NiMn_2O_4 као што су густина ρ , топлотна проводност λ , топлотни капацитет C_p , α_R - TCR, B-експоненцијални фактор промене отпорности [39].

Табела 6. Својстава синтерованог никл манганита

спинел	ρ [g/cm ³]	λ [J/s·cm·K]	C_p [J/g]	α_R [%]	B [K ⁻¹]
NiMn_2O_4	5,27	0,063	0,835	-5,5 %	$4 \cdot 10^3$

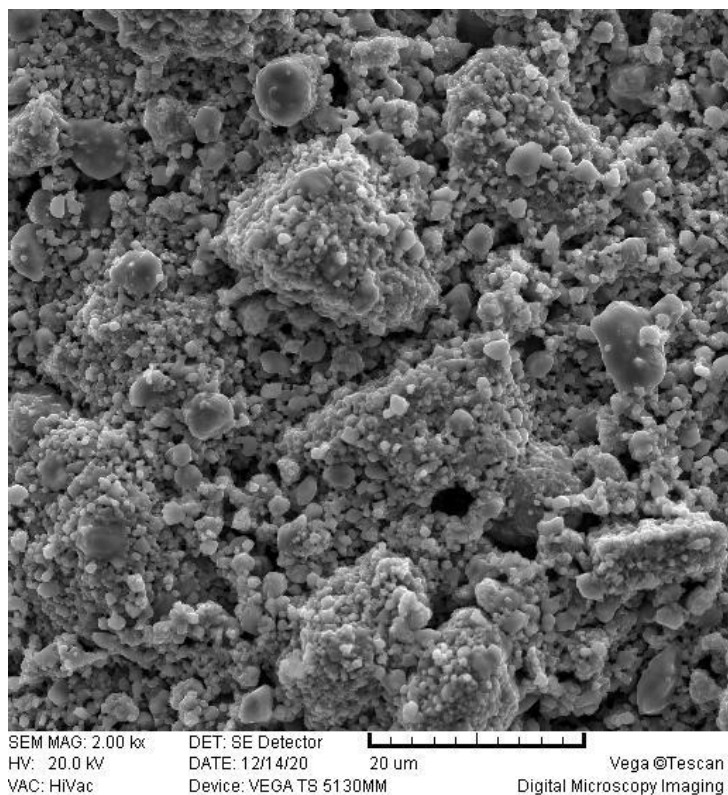
* B, α_R – мерено у опсегу око собне температуре.

Нанопрахови никл манганита се користе за чип термисторе и дебелослојне пасте (хибридна технологија), а танки слојеви за сензоре топлотног зрачења са брзим одзивом (малом инерцијом).

3.5. Дебелослојни термистори

Пасте за дебелослојне термисторе добијају се тако што се термисторски прах (NiMn_2O_4 , $d_{sr}=0.9 \mu\text{m}$, на пример) утисне у етил целулозу као носилац прахова и дода се мала количина праха бор силикатног стакла као везива. Улога стакла у пасти је да повеже термисторски дебели слој са подлогом (Al_2O_3 -алумина, танке плочице) и служи као матрица која механички држи поликристале термистора. На температури синтеровања дебелих слојева од $850 \text{ }^\circ\text{C} / 10 \text{ min}$ синтеровање термисторског праха је у стадијуму II (раст врата, види 1.3. слику 4.) па је структура таквог слоја дендритна и механички слаба. Термисторски слој NiMn_2O_4 не кваси алумину па је стакло незаменљиво везиво.

При томе стакло постаје вискозно на 850 °С и ствара контакт и са подлогом (лепи се адхезијом, кваси алумину) и повезује зрна термистора која су ситнија неколико пута од зрна стакла [40]. Улога етил целулозе је да буде привремени носилац прахова при штампању пасте кроз челично сито, да буде пластоеластична и има адхезију са подлогом, али да се не лепи за сито. Паста треба да има реолошка својства, вискозност, штампабилност и да се не разлива. Штампабилност (пластоеластичност) подразумева да целулоза под притиском гуменог ножа на ситиу нагло постане течна, а после проласка ножа брзо да очврсне. Тако се на подлози после дизања сита формира оштар отисак - дебели слој. Улога целулозе као носиоца је да сагори у пећи већ на 400 °С до 600 °С, а дебели слој термистора наставља да се синтерује на 850 °С / 10 min. На већим температурама од ове стакло се полако топи (зависно од састава) и на крају испливава на површину дебелог слоја. На слици 15. дата је SEM фотографија дебелог слоја NiMn₂O₄ термистора (паста NTC 3К3). Ова паста је коришћена при изради сегментираних термистора за сензорски систем који мери температурни профил обрадивог слоја тла (глава 6.).



Слика 15. SEM микроструктура дебелог слоја NiMn₂O₄ штампаног од термисторске пасте NTC 3к3 и синтерованог на 850 °С / 10 min.

Дебелослојни термистори су планарне хибридне направе које осим термисторског NTC слоја имају и електроде од PdAg - проводне пасте а према геометрији електрода и свом

облику се разврставају у правоугаоне, чешљасте, сендвич и вишеслојне конструкције термистора [41]. Посебно су погодни минијатурни дебелослојни тзв. флип-чип термистори који практично мере температуру диференцијално у једној тачки, затим мостови са термисторима и друге направе. Отпорност дебелослојних термистора зависи од величине, облика и растојања између електрода, а слојна отпорност зависи од састава пасте и дебљине слоја. Отпорност дебелослојног термистора се према Du Pont произвођачу пасте мери на дебелослојном термистору облика квадрата 2.5 mm x 2.5 mm, штампаним ситом SD-200 (окаца по инчу), дебљине синтерованог слоја 20 μm .

3.6. Танкослојни термистори

Танки слојеви NiMn_2O_4 могу се добити хемијским путем хидротермалном методом (како је већ наведено у 2.2). Тиме је термисторски материјал потпуно монофазног састава. У односу на масивне узорке и дебеле слојеве нема промене α_R , В температурних фактора јер се не мења полупроводник, док се површинска електрична отпорност мерена по квадрату површине ρ_{\square} разликује пре и после одгревања за неколико пута: на пример пре одгревања танког слоја $\rho_{\square} = 3.5$ до 21 $\text{k}\Omega/\square$, а после одгревања $\rho_{\square} = 0.47$ до 6.6 $\text{k}\Omega/\square$ [42]. Са одгревањем на температурама од 630 °C до 930 °C долази до уређивања структуре и пада специфичне електричне отпорности. RF поступком спатеровања (радиофреквентно) се помоћу убрзаних јона аргона Ag сударом са NiMn_2O_4 (метом) на катоде избија облак честица термисторског праха који се кондензује на подлози изнад катоде као танак слој. Танки слојеви никл манганита NiMn_2O_4 могу да се користе за инфрацрвене сензоре температуре, јер имају велику осетљивост на топлотни флуks [43].

3.7. Примена NiMn_2O_4 термистора

Примена NiMn_2O_4 термистора је ограничена Киријевом температуром на 130 °C (Curie) са стране виших температура, док је са стране нижих температура T- опсег спуштен до -50 °C из практичних разлога (отпорност постаје висока). Највише се користе термистори који на собној температури (293 K) имају номиналне вредности отпорности 1 $\text{k}\Omega$ до 10 $\text{k}\Omega$. Такви термистори се најлакше уклапају у мерну електронику, линеаризују, баждаре, моделују. Њихова примена је у сензорима температуре ваздуха, воде, чврстих тела, преносу топлоте, сензорима протока на бази губитка топлоте, болометрима, заштитним и температурно компензованим колима, алармима, термостатима итд, у саобраћајним средствима свих врста, примењују се у индустријској, телекомуникационој, рачунарској, војној, медицинској опреми, у метеорологији и агрикултури, биологији, на аеродромима, путевима, подземним коповима и на многим другим местима где се прати промена температуре.

У овом кратком осврту на NiMn_2O_4 термисторе није било довољно места да се размотре магнетна, диелектрична и оптичка својства. Међутим, треба напоменути да у наизменичном (AC) режиму рада термистора у електронским колима или мерним мостовима импеданса $Z(\omega)$ се мења са фреквенцијом и температуром $Z = R(T,t) + 1/(j\omega C(T,\omega))$, обзиром да се и диелектрична константа $\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + j \epsilon''(\omega)$ мења са фреквенцијом и температуром.

Диелектрична константа NiMn_2O_4 је реда 10^3 на собној температури а импеданса дебелих слојева већ на 1MHz брзо опадне са фреквенцијом. На сличан начин са фреквенцијом опада магнетна пермеабилност, а магнетни хистерезис овог материјала спада у групу полутврдих магнетних материјала и најближа му је група никл-цинк ферита [44]. Оптичка својства (инфрацрвена) су већ поменута у 2.6. одељку о танким слојевима NiMn_2O_4 и њиховој примени. Осим тога никл манганит се помиње као потенцијални материјал за спинотронику, складиштење енергије (суперкондензатор) и друге направе јер има добру комбинацију полупроводничких, диелектричних, магнетних и оптичких својстава [45]. Имајући у виду напред дат кратак опис синтезе, структуре и основних својстава NiMn_2O_4 , треба размотрити као закључак и техничке аспекте примене термистора. Користећи напред изнете податке о својствима NTC термистора уопште у главама 2. и 3., могу се сада извести и збирно дати основне техничке карактеристике термистора као електричне компоненте која се примењује у некој направи - сензору (табела 7.) [44, 45].

Табела 7. Основне техничке карактеристике термистора

Својства материјала (састав)	T-опсег [$^{\circ}\text{C}$], B [K^{-1}], α_R [%], E_g [eV]
Утицај структуре на својства	σ [g/cm^3], ρ [Ωm], λ [$\text{J}/\text{s}\cdot\text{cm}\cdot\text{K}$], C_p [J/g]
Утицај димензије термистора	R [Ω], UI , P [W], $R(t)$, C [nF], $T(t)$, t_k [s],
Остала својства	Магнетна, диелектрична, оптичка,
Мерна својства	шум [$1/f$], поновљивост мерења, старење t_k -време кашњења термистора, $T(t)$ -брзина грејања / хлађења термистора.

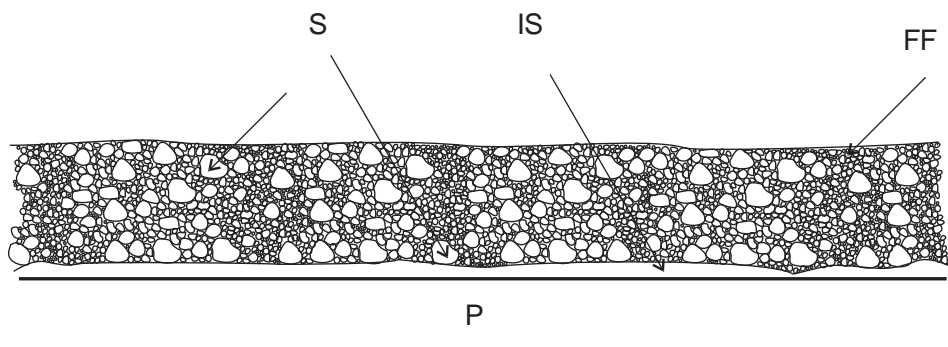
Прецизно дефинисана примена одређује да ли је потребно изабрати масиван, дебелослојни или танкослојни NiMn_2O_4 термистор.

4. ДЕБЕЛОСЛОЈНИ СЕГМЕНТИРАНИ NTC ТЕРМИСТОРИ

4.1. Технологија дебелих слојева

Дебели слојеви електротехничких материјала се могу добити штампањем густе пасте која се састоји од функционалног праха, органске смоле и везивног стакла. Функционални прах може бити проводан (метални), изолациони (оксидни), диелектрични (капацитивни), отпорнички (резистивни), полупроводнички (термисторски, варисторски), магнетни (феритни) и други са комбинацијом наведених својстава. Органска смола (етил целулоза, смола четинара) је привремени носилац прахова у пасту (до фазе синтеровања) а везивно стакло остаје трајно у синтерованом дебелом слоју. Структура дебелослојне пасте дата је на слици 16 и може се окарактеристи као дендритна, тј. најсличнија је фази формирања врата између зрна и настанку отворених пора [46].

Дебелослојна паста на бази органске смоле и праха оксида има високе вредности вискозности, високу адхезију за подлогу, ниску течљивост (не разлива се) и има својство промене вискозности под притиском (пласто-еластичност). Ова својства смоле су потребна ради nanoшења пасте на подлогу потискивањем кроз фино челично сито. Дебели слојеви се штампају на танке керамичке плочице (алумина, берилија, стакло и други материјали за подлоге). Вискозност пасте се мења са температуром и увек се мери пре штампања, а подешава се растварачем (алфа терпинол). Дебелослојна паста се истискује под притиском кроз сито помоћу гуменог ножа, који клизи по сити. При притиску на пасту органска смола промени вискозност око 10^3 пута па паста лако пролази кроз окца на сити. Међутим кад нож одклизи даље вискозност се врати на почетну вредност, одштампани лик тада очврсне и не разлива се. Челично сито се само одвоји од пасте, јер је јако затегнуто. Лик који се штампа на сити је негатив, а истиснута паста кроз сито је позитив који остаје на подлози.

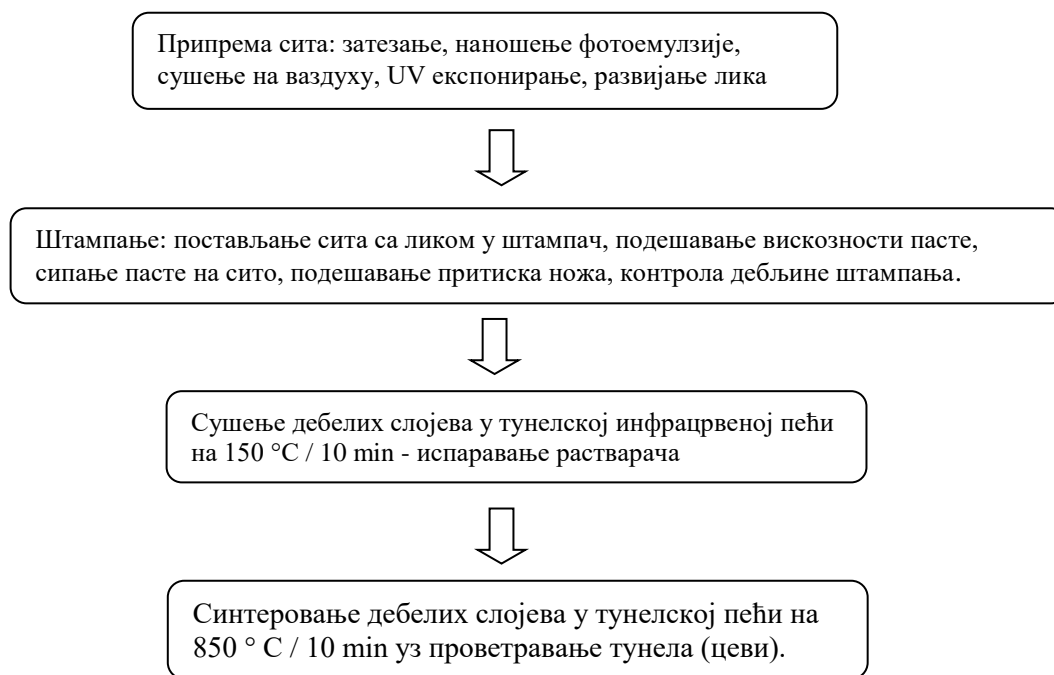


Слика 16. Принципијелна шема структуре дебелих слојева: P - алумина подлога на коју се штампа паста, FF - функционална фаза дебелог слоја: поликристална - дендритна структура, IS - делимично истопљено стакло на подлози, S - везивно стакло у дебелом слоју.

Лик се добија експонирањем фотоемулзије постављене у танком слоју на сито. Фотоемулзија при експозицији на UV - светлу очврсне (фотополимер) а неекспонирани део фотоемулзије се испере водом. Тако настаје лик на ситу, тј. позитив кроз који се штампа паста на подлогу.

Органска смола је привремени носилац прахова и током синтеровања одштампаних дебелих слојева потпуно изгори, па се зато у пасту на почетку при формирању пасте додаје стаклени прах као трајно везиво који се лепи за подлогу на температури синтеровања, а служи и као матрица која држи и честице функционалног праха. Средња величина честице функционалног праха је обично реда 1 μm до 5 μm , а стакленог праха 5 μm до 10 μm . Тежински однос функционалног праха према смоли је обично 70 : 30 док се стаклени прах додаје у износу од 5 % до 10 % зависно од врсте пасте [47]. Улога стакла је да на високој температури из чврстог пређе у густо вискозно стање и повеже функционални прах и подлогу, али не сме да се топи, испливава или кристалише. Основни дијаграм тока у дебелослојној технологији приказан је на слици 17.

Дијаграм тока процеса у дебелослојној технологији:



Слика 17. Основни дијаграм тока nanoшења дебелих слојева помоћу ситоштампе [48].

Због тога се дебели слојеви синтерују у присуству везивног стакла при посебном профилу синтеровања у тунелској пећи која се под малим притиском ваздуха проветрава због

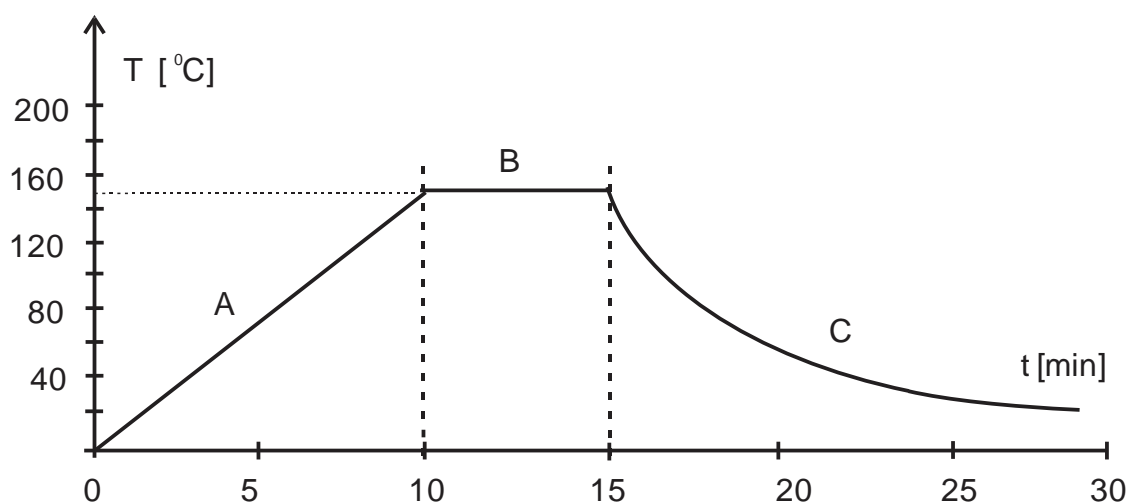
*ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ
СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА*

сагоревања целулозе [48]. Приказан је дијаграм тока само за један слој који се штампа од једне пасте. Обично се у првом слоју штампају дебелослојни проводни слојеви (проводни путеви, електроде) проводном пастом као што је PdAg, PdAu, PdAgPt паста, а у другом слоју се штампају дебелослојни отпорници, термистори, варистори, итд. Вишеслојне структуре се штампају, суше, и синтерују наизменично (секвенцијално) или се слојеви наизменично штампају и суше па на крају сви заједно синтерују (co-fire техника). Основна опрема за поступке дате дијаграмом тока на слици 17. састоји се од штампача дебелог слоја, сушнице и конвејерске пећи за синтеровање (слика 18.).



Слика 18. Опрема за дебелослојну технологију штампач за дебеле слојеве (горе лево), сушница за дебеле слојеве (горе десно) и петозонска конвејерска пећ за синтеровање (Ирител, а.д. Београд).

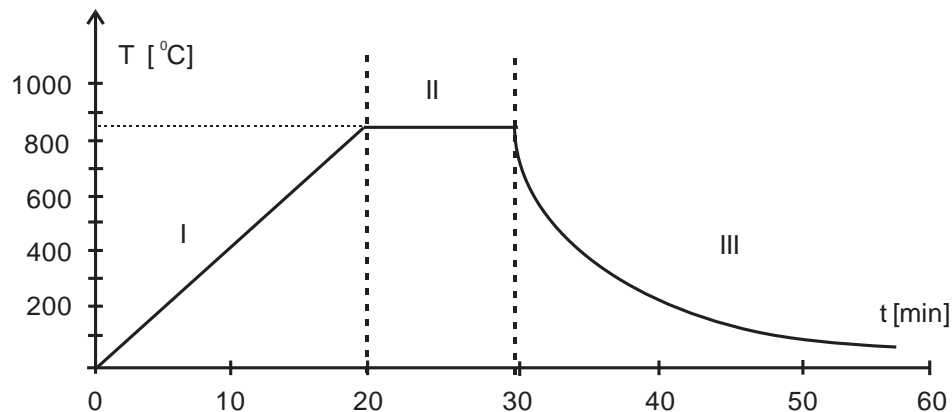
Температурски профил тунелске пећи се може подешавати на неколико грејача дуж тунела (цеви од синтерованог кварца), а дебелослојне узорке кроз тунелску пећ вуче трака одређеном брзином, која се такође може подешавати. Дебљина свеже штампаног слоја кроз сито густине отвора од 200 окаца / 2.5 cm дужине је реда 55 μm до 65 μm (мерено оптичким путем). После сушења дебели слојеви губе око 50 % дебљине. При сушењу користи се температурски профил сушнице на 150 °C/ 10 min. На нижим температурама од 25 °C до 80 °C најпре испаравају лако испарљиви растварачи-као етил алкохол на 80 °C до 150 °C испарава алфа терпинеол (зона А). На платоу (зона В) на 150 °C целулоза се полимеризује а дебели слој очврсне. Хлађење дебелог слоја врши се у зони С до собне температуре. Температурни профил сушења дат је на слици 19.



Слика 19. Типични температурни профил при сушењу дебелих слојева после штампања: Т-температура у сушници, t-време проласка узорака кроз пећ, А-зона испаравања, В-зона полимеризације целулозе, С-зона хлађења [48].

После сушења дебели слојеви се синтерују на 850 °C/10 min у вишезонској конвејерској пећи. Температурски профил синтеровања дат је на слици 20. У зони I сагорева целулоза на 450 °C до 600 °C, док везивно стакло додато у пасту постаје делимично истопљено и лепи се за подлогу и зрна функционалне фазе. У зони II на платоу долази до синтеровања и формирања дендритне структуре. У зони III дебели слој се хлади до собне температуре. Дебљина синтерованог слоја је око 50 % од дебљине осушеног слоја.

Систем пасте, на пример електрично проводних и резистивних је развијен од стране произвођача (Du Pont, Heraeus, ESL, EMCA...) и за њих се даје у процентима корекција слојне отпорности услед дифузије једне пасте у другу, односно синтерованих слојева који су у контакту (делимично или потпуно леже један преко другог). Утицај проводне пасте са металним праховима Au, Ag, Ni, Cu, PdAg, PdAgPt и других на остале пасте са праховима металних оксида је проучаван ради праћења дифузије метала у различите електронске керамике на различитим температурама синтеровања [49].



Слика 20. Типични температурни профил синтеровања дебелог слоја у конвејерској пећи: Т - температура у пећи, t - време проласка узорка кроз пећ, I - зона постепеног загревања и сагоревања целулозе, II - зона синтеровања узорка, III - зона хлађења [48].

Код дебелог слоја штампаних на зелене листове керамике (технологија вишеслојне керамике) у PdAg проводну пасту се ставља и до 30 % Pd који има вишу температуру топљења од сребра Ag па се та паста синтерује заједно са ламинираним зеленим листовима на 1110 °C / 1 h у заштитној атмосфери (завршни део синтеровања). На крају треба напоменути да се поред стандардних паста могу код произвођача паста наручити наменске пасте за различите намене као и подлоге различите величине и од различите керамике. Наменске пасте захтевају додатни технолошки развој, што подиже цену пасте од 10 до 20 пута у односу на оне пасте које се налазе у каталогу.

4.2. Дебелослојне термисторске пасте

Дебелослојне термисторске пасте су сврстане углавном у наменске пасте. Производе се по потреби за хибридну микроелектронику, али се ретко налазе у каталозима произвођача (Electro Science Laboratories, USA, NTC - 2100 series, KOARTAN Microelectronic interconnect materials: KOARMISTOR series 7380). Уколико корисник постави неке своје захтеве у погледу нагиба NTC криве, номиналне вредности термистора, димензија и стабилности компоненте, одговор је увек самосталани развој наменске пасте или компоненте (custom design).

Оксиди метала имају мању или већу промену отпорности са температуром, али се за ниске температуре од -30 °C до +120 °C највише користи никл манганит NiMn_2O_4 и његове модификације (погледати претходну главу). Поступак израде термисторске пасте је исти како је већ дато у претходном одељку (4.1.). У литератури [50-55] се дају основна својства за нискотемпературне термисторске пасте $\text{Mn}_{1,5}\text{Co}_1\text{Ni}_{0,5}\text{O}_4$, $\text{Cu}_{0,37}\text{Zn}_{0,52}\text{Ni}_{0,44}\text{Co}_{0,44}\text{Mn}_{1,23}\text{O}_4$, $\text{BaCo}^{\text{II}}_{0,02}\text{Co}^{\text{III}}_{0,04}\text{Bi}_{0,94}\text{O}_3 + \text{Ba}_{0,7}\text{Bi}_{0,3}\text{Fe}_{0,9}\text{Sn}_{0,1}\text{O}_3$, $\text{NiMn}_2\text{O}_4 - \text{CuMn}_2\text{O}_4 - \text{MnCo}_2\text{O}_4$, NiMn_2O_4 , La-Mn-Al-O и друге термисторске пасте. Коефицијент промене отпорности (В) са температуром TCR код ових термисторских материјала је реда величине од 10^3 K до 10^4 K зависно од количине субституената или допаната. Прахови термистора у пастама имају

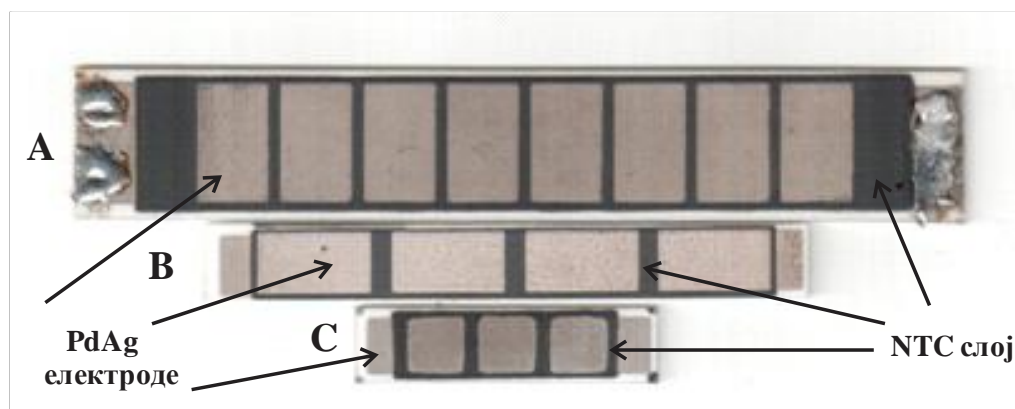
средњу величину честице реда $1 \mu\text{m}$ до $2 \mu\text{m}$ микрона или мање (микронски прахови). Препорука је да се за електроде користе проводне пасте типа PdAg.

4.3. Дебелослојни сегментирани термистори

Дебелослојни термистори као планарне компоненте могу имати неколико карактеристичних облика: правоугаони, чешљасти, сендвич, вишеслојни и сегментирани. Разликују се по величини и распореду електрода и дебљини NTC термисторског слоја.

Геометрија дебелослојног термистора утиче на номиналну отпорност, на пробојни напон и дисипирану снагу (топлоту). За прорачун номиналне отпорности прво се користи идеални модел који узима у обзир номиналну слојну отпорност ρ_{\square} (по јединици површине) дужину l и ширину w , површину електрода S , растојање између електрода d (дебљину NTC слоја), број ћелија n (сендвича, чешљева или сегмената), а затим се поред номиналне слојне отпорности ρ_{\square} додаје корекциона крива која урачунава дифузију метала из електроде у термисторски слој.

Сегментирани термистори су настали комбинацијом редно-паралелне везе n сендвича. Између горњег и доњег реда електрода које су у цик-цак поретку постављен је NTC термисторски слој. Сегменти (ћелије) код ове геометрије повезани су редно и имају исту струју кроз средњи слој термистора тј. цик-цак ток струје између горњег и доњег слоја електрода. Размак између суседних електрода у истом слоју је $l/3$ где је l дужина електроде. Сви сегментирани термистори реализовани до сада штампани су и синтеровани на хибридној линији и приказани на слици 21. Приказане су три конструкције сегментираних термистора различите снаге дисипације А, В, С (5W, 2W, 1W), респективно.



Слика 21. Дебелослојни сегментирани термистори: А - димензије $75 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$, снаге 5 W штампан NiMn_2O_4 пастом, В - димензије $50,8 \text{ mm} \times 6,35 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$, снаге 2 W , штампан NiMn_2O_4 пастом и С- димензије $25,4 \text{ mm} \times 6,35 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$, снаге 1 W , штампан $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ пастом. PdAg-електроде - метално сиве површине, NTC - термисторски слој је црне боје. Штампано и синтеровано на хибридној линији (ИРИТЕЛ а.д., Београд).

Због близине електрода и велике дифузије метала са електроде у термисторски слој, NTC слој- средњи слој је штампан, сушен и синтерован 3 пута узастопно, а на крају је штампањем нанет горњи слој електрода. На собној температури $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ вредности номиналне отпорности сегментираних термистора приказаних на слици 22. су редом $R_A=1294\ \Omega$, $R_B=7215\ \Omega$, $R_C=631\ \Omega$, док је вредност експоненцијалног фактора била $B_{A,B}=3863\ \text{K}$ (NiMn_2O_4) а $B_C=3356\ \text{K}$ ($\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$). Капацитивности C мерене RLC - метром на 1kHz су биле реда $1150\ \text{pF}$, $280\ \text{pF}$ и $105\ \text{pF}$, (за геометрије А, В, С респективно).

У оквиру припреме за реализацију сензорских система са сегментираним термисторима зановљене су две пасте NiMn_2O_4 и $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ и поново штампане две нове серије сегментираних термистора В и С типа респективно (слика 21. В, С) на истој хибридној линији.

4.4. Прве примене сегментираних термистора

У периоду од 2000. до 2011. започета су истраживања на дебелослојним термисторима: осим развоја и карактеризације термисторске пасте NiMn_2O_4 покушавана је и прва примена дебелослојних термистора за мерење протока воде и ваздуха. Већ са првим мерењима уочени су бројни недостаци у почетној примени сегментираних термистора али су сагледане и разне могућности за унапређење примене. Требало је смањити велике димензије, велике отпорности термистора, високе напоне рада за В - тип сегментираног термистора, пад радне тачке са температуром итд. Због високе отпорности сегментираног термистора типа В, ради достизања струје самозагревања од $30\ \text{mA}$ био је потребан напон напајања од 30 до $120\ \text{V}$ што је непогодно у електроници и тражи дебљи слој хидро - изолације на термистору.

После 2011. истраживања су настављена у више праваца: нове термисторске пасте, редукација геометрије, снаге, напона и струје, увођење мерних подопсега, мерења са аквизиционом картом, и моделовање термичких појава, што је довело до више иновација, и нових примена сегментираних термистора. Нова нискоомска термисторска паста настала је на бази нанометарског праха никл манганита NiMn_2O_4 модификованог делимичном субституцијом NiO и Mn_2O_3 са CuO и ZnO да би се добио $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$. Овај напредак омогућио је минијатуризацију дотадашњих сегментираних термистора 2 пута, рад са мањим номиналним отпором термистора 5 пута, смањени су напони напајања 10 пута, што је омогућило развој три нова сензорска система са дебелослојним сегментираним термисторима. Унете су и следеће иновације: редуктори протока воде, и ваздуха, импулсни рад (циклични рад сензора), подопсези рада, мерење импулног протока, мерење градијента температуре, дигитализација мерења аквизиционом картом. На новим сензорским системима вршено је моделовање и анализа температурних појава при стационарном, импулсном и прелазном режиму рада сегментираних термистора као сензора, што је такође предмет ове докторске дисертације.

5. САВРЕМЕНИ СЕНЗОРИ ЗА МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ТЛА, ПРОТОКА ТЕЧНОСТИ И БРЗИНЕ ВЕТРА

5.1. Опште о сензорима

Најшире посматрано сензор је направа, склоп или уређај који детектује неку величину и промену те величине у околини где је постављен. Савремени сензори имају електрични сигнал као излаз који може да се преноси, појачава, обрађује, приказује и записује. Сензорски систем је систем од више сензора исте или различите врсте који све сигнале повезује истовремено на вишеканалну аквизициону картицу и тако преноси у рачунар који затим те сигнале обрађује, приказује и памти.

Подела сензора (табела 8.) врши се према величини коју детектују, принципу рада, намени, својствима и конструкцији. Сензори који детектују исту величину упоређују се по мерном опсегу, осетљивости, резолуцији, брзини одзива, одступању (несигурности), стабилности, хистерезису, улазно излазној импеданси, линеарности, димензијама и цени [56-58].

Табела 8. Подела сензора

<p>1. Детекција величине: сила, брзина, убрзање, притисак, вибрације, еластичност, чврстина, позиција растојање, температура, влажност, интензитет светла, звук, магнетно поље, електрично поље, електричне величине (струја, напон, фреквенција, фаза), радијација и сл.</p>
<p>2. Принцип рада: магнетомеханички, фотоелектрични, фотоеластични, фотопроводни, фотомагнетни термооптички, магнетоеластични, термоеластични, термомагнетни, магнеторезистивни, пиезоелектрични, итд.</p>
<p>3. Примена: индустрија, пољопривреда, рударство, саобраћај, телекомуникације, јавне зграде, домаћинства, метеорологија, поморство, војна примена, безбедност, космос, спорт, играчке, софицистирана научна примена (физика, хемија, биологија, медицина, астрономија, геологија, наука о материјалима) итд.</p>

Осим ових подела постоје и поделе сензора на активне и пасивне, на апсолутне и релативне, поделе према материјалима од којих су направљени итд. Не улазећи даље у класификацију, представнике врста сензора и сензорских система треба напоменути да су сензори и сензорски системи уз телекомуникације, рачунаре и рачунарске мреже област која је у сталном успону. Сензори су као компоненте везани за материјале и физику материјала са једне стране, а као сензорски системи везани су за микроелектронику и рачунарску технику. Пре употребе неопходно је да се сензори тестирају (мере и сортирају) а после уградње и калибришу. Развој и истраживање на сензорима су мултидисциплинарни и тимски, дуго трају и захтевају пуно иновација да би се реализовао нови и на тржишту конкурентан прототип.

Како је дато у уводу ове докторске дисертације предмет истраживања су сензорски системи засновани на дебелослојним сегментираним NTC термисторима као и термичке појаве на њима. Због тога је у овој глави један део излагања посвећен сензорима температуре и основним законима који описују пренос топлоте. На бази дебелослојних сегментираних термистора као сензорским елементима развијена су три нова сензорска система који мере градијент температуре тла, проток воде у цевима и брзину ветра. Ова три сензорска система су различита по величини коју мере, по конструкцији и начину рада. Због тога се у овој глави кратко описују сензори исте намене али који раде на различитим принципима.

5.2. Мерење температуре

Мерење температуре је најчешћа врста мерења, а сензори температуре су најбројнији и најшире распрострањени од свих сензора уопште. Мерење температуре се користи скоро свуда где човек борави: у домаћинству, у свим врстама зграда, у индустрији, у свим средствима саобраћаја, у метеорологији и пољопривреди, у електронској опреми, у медицини, хемији, физици и биологији, за војне примене и многе друге [59]. Опсег мерења температура је подељен у више подопсега. Опсег ниских температура - криогени опсег се простире од апсолутне нуле ($-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ или 0 K) па до температура течног CO_2 ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Метеоролошки опсег температура је дефинисан минимумом и максимумом температура на земљи (на половима и на полутару) који је приближно у границама од око $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (осим изузетно кад се те границе прелазе). Опсег око собне температуре се креће од $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а собна температура од $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ је усвојена као температура на кој се мере многе номиналне величине. Опсег изнад собних температура је подељен на нижи, средњи и виши и опсег јако високих температура на којима се на пример топе ретки метали. За сваки од поменутих температурних опсега постоје различити термометри-сензори температуре као што су платински отпорници, термопарови, термистори, PN-спојеви и пирометри. Посебно је значајно прецизно мерење температуре у физици (многе величине зависе од температуре), хемији (синтеза једињења, детекција помоћу DTA, TGA, DSC), биологији, метеорологији, медицини где се употребљава и термовизија за детекцију оболења, и другим областима рада и истраживањима. Сензори температуре раде на различитим принципима:

Платински отпорници. Платински отпорници од Pt жице намотане на керамички штапић служе као линеарни сензори температуре у опсегу температура од -200 °C до 600 °C [60 - 62]. Платину је као сензор температуре предложио Сименс (Sir William Siemens) 1871. године. Коефицијент температурске промене отпорности α_R дат у [$\Omega / \Omega \cdot ^\circ\text{C}$]:

$$\alpha_R = (R_{100} - R_0) / (100 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot R_0) \dots \dots (8),$$

где су отпорности платине R_0 и R_{100} мерене на 0 °C и 100 °C, респективно. Коефицијент отпорности α_R у опсегу од 0 °C до 100 °C износи од 0,0003916 [$\Omega / \Omega \cdot ^\circ\text{C}$] до 0,003902 [$\Omega / \Omega \cdot ^\circ\text{C}$] и зависи од чистоће Pt жице. Платински отпорници Pt су дуготрајно стабилни и користе се као еталонски сензори за мерење температуре иако имају спор одзив (1 s - 50 s). Платински отпорници праве се данас танкослојном технологијом (спатеровањем) на керамичкој подлози да би се добио бржи сензор (и тако смањило временско кашњење). Тако имамо познате танкослојне платинске сензоре температуре Pt 100 који на температури 0 °C има око 100 Ω и Pt 1000 који на 100 °C има вредност отпорности реда 1000 Ω .

Термопарови. Термопарови су спојеви жица два различита метала који настају заваривањем Волтиним луком или ласером. Термоелектрична електромоторна сила ТМФ настаје на слободним крајевима жица као напон $E_{ТМФ}$ који нелинеарно зависи од температуре:

$$E_{ТМФ} = aT + bT^2 + cT^3 + dT^4 \dots \dots \dots (9),$$

где су a, b, c, d,... константе које се експериментално одређују. Парови метала који имају велику ТМФ у одређеном температурском опсегу могу бити на пример: (Cu/Ni)- Константан на 300 °C ТМФ достиже 13 [mV], (Ni/Cr/Cu) - Хромел-Алумел на 1200 °C ТМФ достиже 80 [mV], (Ni/Mn/Al/Si) - Алумел на 1200 °C ТМФ достиже 50 [mV], (Ni/Cr/Si) - Никросил, (Ni/Si/Mn) - Нисил, затим (Pt/W), (Pt/Rh) на 1600 °C ТМФ достиже око 20 [mV], (W/Rn) и други спојеви [64-66]. Њихов опсег примене је различит зависно од састава и подељен је у типове J, K, T, S, R, B (укупан опсег је -270 K до 2000 K), [63].

Осим термопарова насталих заваривањем две жице од два различита метала све више се користе и танкослојни термопарови настали спатеровањем Pt-Pt/Rh метала до дебљине од 10 nm, међутим танки слојеви рекристалишу и деламинарају са подлоге, па не достижу високу температуру примене као жични термопарови [67].

Полупроводнички Si сензор температуре. PN-спој силицијума Si може да се користи као сензор температуре [68]. Напон на PN - споју V_{BE} је зависан од температуре: разлика напона база-емитер ΔV_{BE} на два паралелна транзистора је дата као:

$$\Delta V_{BE} = (k \cdot T / e) \ln(N) \dots \dots \dots (10),$$

где је $N = I_{c1} / I_{c2}$ однос колекторских струја два транзистора, k - Болцманова константа, T - температура ваздуха, а e - елементарно наелектрисање електрона. Овине се знатно олакшава

калибрација полупроводничког Si сензора температуре. За ове намене могу да се користе и биполарни и униполарни транзистори (BJT и CMOS). Si сензори температуре обично се интегришу са операционим појачавачем у једно IC коло. Мерни опсег не прелази 150 °C, јер PN - спој може да откаже.

Пирометри. Пирометри се користе као безконтактни сензори температуре или радијативни термометри јер раде на бази мерења инфрацрвеног зрачења које емитују тела на врло високим температурама које термопарови не могу да мере [69]. Зрачење пада на инфрацрвени детектор пирометра, а електрични сигнал детектора се појачава и баждари у функцији температуре. Могу да мере интезитет зрачења које има таласну дужину од 0,7 μm до 20 μm. Веза таласне дужине и температуре даје се за црно тело, а узима се у обзир и Вин-ов закон померања максимума зрачења ка нижим таласним дужинама. Двоканални пирометри мере емитивност тела са две блиске површине A₁ и A₂ (на телу-мети) и дају две таласне дужине λ₁ и λ₂ па су мерена температура T_m и температура тела T₁ у односу [70]:

$$(1/T_m) = (1/T_1) + [(\lambda_1 \cdot \lambda_2) / (C_2(\lambda_1 - \lambda_2))] \ln (A_1/A_2) \dots \dots (11),$$

где је C₂ радијациона константа у [μm·K]. Са овим двоканалним приступом олакшава се калибрација пирометра.

5.3. Пренос топлоте

Пренос топлоте са чврстог тела (земља, тло) на дебелослојни термистор и пренос топлоте са самозагрејаног дебелослојних термистора на флуид (воду, ваздух) мења температуру на термистору као сензору. Најважнији механизми преноса топлоте су кондукција, конвекција и зрачење. У случају дебелослојних термистора примењеним у сензорским системима за мерење градијента температуре тла, протока воде и брзине ветра доминантан механизам преноса топлоте је кондукција.

5.3.1. Пренос топлоте кондукцијом

Пренос топлоте кондукцијом (провођем) одвија се кроз чврсто тело, течност или гас због разлике температура T₁ и T₂ између две тачке А и В на неком растојању. При томе формира се градијент температуре [71]:

$$\frac{dQ_x}{dt} = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \dots \dots (12),$$

где је dQ_x / dt - пренета топлота у времену у правцу x, dT/dx - градијент температуре T у правцу x, K- топлотна проводност материјала у правцу x између две тачке, A- површина кроз коју се топлота преноси. Знак " - " у једначини је због градијента температуре који увек има негативан знак јер се топлота преноси од више ка нижој температури.

Топлотна проводност K [W / m·K] мерена на 300 K има најмање вредности за ваздух 0.026 [W / m·K], земљу 0,1 до 0,55 [W / m·K], воду 0,6 [W / m·K], дрво 0,087 [W / m·K], стакло

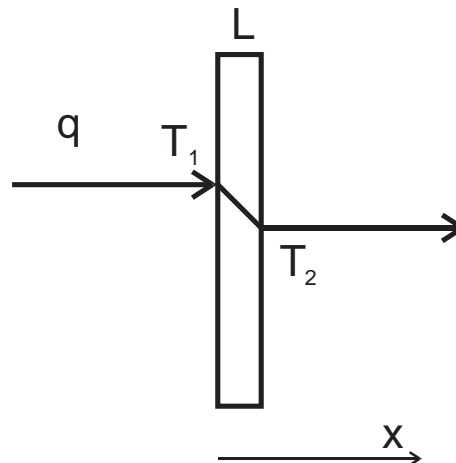
0,81 [W / m·K] а највеће за метале као гвожђе 80,2 [W / m·K], алуминијум 237 [W / m·K] и бакар 385 [W / m·K] [72]. Температура T у правцу x се мења са временом t према једначини (13) [73]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots \dots \dots (13),$$

где је α_T - топлотна дифузивност која износи $\alpha_T = K/\rho \cdot C_p$; K - топлотна проводност, ρ - густина материјала а C_p -топлотни капацитет при константном притиску.

5.3.2. Пример преноса топлоте

Пренос топлоте кроз танку плочу топлотне проводности K , дебљине L и површине A која са једне стране има температуру T_1 а са друге температуру T_2 где је $T_1 > T_2$ приказан је на слици 22. Ако се градијент температуре у плочи не мења са временом пренос топлоте је стационаран.



Слика 22. Стационарни пренос топлоте кондукцијом кроз танку равну плочу.

Користећи једначину (12) уз граничне услове T_1 , T_2 , дебљину плоче L , површину A и топлотну проводност K добија се решење за пренету топлоту у јединици времена dQ_x/dt [74]:

$$\frac{dQ_x}{dt} = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} = K \cdot A \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{L} \right) \dots \dots \dots (14).$$

По аналогији са електричним колима ($I = U/R$) уводи се топлотна отпорност $R_q = L/K \cdot A$ и разлика температура $\Delta T = T_1 - T_2$ па се претходни израз своди на [75]:

$$dQ_x/dt = \Delta T/R_q \dots \dots \dots (15).$$

5.4. Мерење градијента температуре тла

На површини Земље температура је променљива (од $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, ван полова). Испод површине Земље температура расте са дубином. Испод земљине коре (литосфере) дубине од 300 km до 400 km налази се вискозан растоп оксида и лакотопљивих метала од којих је и сама кора састављена. Они на површину излазе кроз пукотине и вулкане као лава температуре $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Испод тог слоја на дубини од 700 km до 2900 km по теорији је мање вискозан растоп који чине тешко топљиви метали, а температура се пење са дубином од $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $2700\text{ }^{\circ}\text{C}$. У средишту земљине кугле је чврсто језгро са температуром од преко $6700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Топлота Земљине кугле процењена је на 10^{31} J . Са површине Земље стлаано у космос одлази $4,42 \cdot 10^{13}\text{ J/s}$ енергије [76]. Земљина кугла генерише своју топлоту у слоју изнад чврстог језгра услед нуклерних распада U^{238} , U^{235} , Th^{232} и K^{40} [77].

Мањи део енергије долази нам од Сунца а прима га атмосфера (ваздух) и земљина кора највећим делом до дубине од $0,5\text{ m}$. У летњој сезони максимална дубина преноса топлоте из ваздуха иде и до 20 m [78]. Једна од тема ове дисертације је управо температурни профил обрадивог тла до дубине $0,5\text{ m}$ и како се он мења у току године.

5.4.1. Размена енергије на површини земља-ваздух

На површини Земље између атмосфере и обрадивог слоја (тло) одвија се размена енергије која долази од Сунца. Ако енергију који са Сунца долази до Земље и њене атмосфере означимо са 100% онда имамо следећи биланс енергије [79]:

а.) Од 100% упадне енергије зрачења 31% се рефлектује у космос, 20% абсорбује атмосфера а осталих 49% стиже на површину земљине кугле.

б.) Површина земљине кугле од тих 49% израчи инфрацрвеним зрачењем 12% директно у свемир, а око 7% енергије зрачењем и конвекцијом се враћа у ваздух, 23% у латентну топлоту (топљење леда и испаравање воде у океанима и на копну). Топлота загревања, испаравања и кондензације воде поново доприносе загревању ваздуха, што износи 30% енергије од примљених 49% енергије.

ц.) Атмосфера добија 50% енергије: 20% на почетку абсорпцијом + 30% са површине земљине кугле. Са оних 7% добијених инфрацрвеним зрачењем са површине земље које и сами осећамо као топлоту атмосфера има 57% енергије која ће се инфрацрвеним зрачењем послати у космос.

д.) У космос тј. у вакуум се враћа 31% рефлектоване енергије, 12% израчене директно са земљине површине и 57% енергије израчене из атмосфере.

У просеку израчунатом на нивоу године површина земље има релативно сталну температуру, која варира око $\pm (1^{\circ}\text{C до } 2^{\circ}\text{C})$ у последњих 100 година.

5.4.2. Температурни профил горњег слоја земље

Температура ваздуха је од великог утицаја на температуру горњег слоја земље. Обично ваздух предаје топлоту слоју земље дању а прима топлоту из земље ноћу. Пренос топлоте се одвија кад год постоји разлика између температура тла и ваздуха. Дневна варијација температуре горњег слоја тла опада по дубини од површине до неке дубине после које се врло мало мења (практично је константна у неком периоду времена, ако је температура у ваздуху стабилна). Осим промене по дубини температура горњег слоја тла се мења из дана у дан у функцији од температуре ваздуха тако да се максимум температуре тла добија иза поднева тј. око 14 часова, а минимум око 6 часова ујутру. Температура на површини тла (земље) варира са сезоном зима-лето и лето-зима приближно као синусна функција (са краћим одступањима кад је време нестабилно) [80]. Са дубином слоја земље одступања су мања, пригушена инерцијом при преносу топлоте.

Температура на површини тла се разликује за неколико степени од температуре ваздуха која се мери у хладу на 2 m висине од површине. Како земља загрева ваздух и обрнуто температуре на граници земља-ваздух је често виша од температуре ваздуха мерене на 2 m висине. Поред тога облик температурног профила са дубином и висином и његов градијент dT/dz зависе од састава земљишта, хомогености структуре и влаге. Обрадиво тло је мешавина глине, песка, хумуса, воде и ваздуха чије топлотне проводности K утичу на температурни профил $T(z)$, градијент dT/dz и топлотну дифузивност D .

У табели 9. дате су вредности топлотне проводности K и топлотне дифузивности D различитих материјала који улазе у састав обрадивог слоја земље. Температурна проводност варира са влагом; сува глина и сув песак имају веће вредности топлотне проводности него мокра глина и песак, а најмању термалну дифузивност има вода [72]. Вредности топлотних параметара варирају и са саставом и са структуром земље.

Табела 9. Топлотна проводност и топлотна дифузивност земље

материјал:	K [W / m·K]	$D \cdot 10^6$ [m ² / s]
песак (сув)	0,3-0,55	0,19-0,34
песак (мокар)	1,7-5	0,59-1,72
глина (сува)	0,4-1	0,25-0,62
глина (мокра)	0,9-2,3	0,26-0,68
иловача-блато	0,37-1,42	0,37-1,90
вода	0,56	0,143

* напомена: вредности се односе на собну температуру од 20°C [72].

Топлотна дифузивност $D(t,z)$ је дефинисана једначином [81]:

$$D(t, z) = \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] / \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \dots \dots \dots (16),$$

где је $\partial T / \partial t$ градијент промене температуре земље T са временом t , а $\partial^2 T / \partial z^2$ је други извод промене температуре T по дубини слоја земље z .

5.4.3. Сензори температуре тла

Температура тла се мери најчешће до дубине од 20 cm живиним термометром. За дубине до 0.5 метара постоје комерцијални сензори у облику штапа са 5 сензора температуре (размак 10 cm) или до дубине од 80 cm са размаком од 2, 5, 10, 20, 50 cm [82]. Сензори температуре који се за ова мерења користе су најчешће чип термистори, а ређе се користе платински отпорници или термопарови.

Температура тла на дубинама реда 2 m до 3 m мери се за потребе топлотних пумпи које компримују ваздух са те дубине, топлоту убаце у систем за етажно грејање преко размењивача топлоте, а сабијени ваздух експандују ван зграде [83].

Температура земље мери се и на дубинама до 300 m или више ради налажења топлих геотермалних вода и водене паре под притиском која покреће турбине и генераторе електричне енергије.

У последњих неколико година развијен је наменски сензорски низ са густо постављеним дебелослојним термисторима (40 мерних тачака на растојању од 55 cm) ради прецизног свакодневног праћења температурног профила горњег слоја земље, профила термалне дифузивности и профила садржаја везане воде у земљи.

5.5. Мерење протока течности

Мерење протока течности је широко распрострањено и врши се на цевоводима и речним токовима. Мерење протока воде на цевоводима се примењује у домаћинству, индустрији и скоро свим објектима где човек борави или ради. Мерење протока воде у рекама се примењује у хидрометеорологији, екологији и водоснабдевању. Осим мерења протока воде мери се и проток нафте у нафтоводима или нафтних деривата код претакања у цистерне и саобраћајна средства која их користе (аутомобили, бродови, авиони, радне машине). Бројни су типови сензора протока течности на тржишту, јер су и услови за мерење протекле количине течности, њихове брзине и притисци врло различити. Тако се на пример протоци крећу од милилитара у минути (у медицини), литара у минути (домаћинства), до метра кубних у минути (индустрија). Најтраженији су сензори протока воде са електронским читавањем и даљинским преносом резултата мерења

Мерење протока течности врши се углавном помоћу четири групе сензора протока које раде на различитим принципима: механички (притисак воде), инференцијални (покретни делови при протоку), електрични и други [84].

Принцип рада, димензије, конструкција, мерни опсег, начин калибрације, тачност и друга својства одређују примену сваког од њих. У дисертацији су сензори протока течности описани укратко, а једино су издвојени сензори протока воде на бази одвођења топлоте обзиром на то да су у експерименталном делу проучавани дебелослојни сензори протока течности са сегментираним термисторима који раде на том принципу.

5.5.1. Принципи рада сензора протока

Механички сензори протока. Механички сензори протока користе млазнице, отворе, Вентуријеву цев, Питоову цев и померај ротирајућег тела [85]. Сензори протока са млазницама и отворима имају комору, а разлика притисака пре и после проласка кроз млазницу или отвор пропорционална је протеклој запремини воде у цевима. Питоова цев користи се за мерење разлике притисака у води која тече (динамички притисак), док се брзина воде израчунава из Бернулијеве једначине. Принцип рада Вентуријеве цеви је разлика притисака која настаје услед протока воде и пропорционална је том протоку. Сензор помераја воде има два ротациона тела у комори и услед протока запремене воде кроз комору има ротацију која је пропорционална брзини воде.

Инференцијални сензори протока. Инференцијални (посредни) сензори протока користе мале роторе, турбине (пропелере) и дискове постављене у водени ток [86]. Ротаметри користе роторе који мењају попречни пресек цеви и тако стварају ротацију као мерни ефекат пропорционалан протоку воде. Мале турбине (пропелери) услед протока воде окрећу се брзином која је пропорционална протоку воде. Диск постављен у водени ток трпи притисак водене струје, а мери се сила на диск која је пропорционална протоку воде.

Електрични сензори протока. Електрични сензори користе физичке принципе као што су електромагнетни, ултразвучни, оптички, термички и други [87]. Код електромагнетног сензора протока настаје електрична струја у води која протиче кроз магнетно поље. Она се мери на двема наспрамно постављеним електродама постављеним кроз зид цеви (попречно на проток). Дужина пута струје кроз воду (електрична отпорност) зависи од брзине протока. Код ултразвучног сензора протока синусни талас се преноси кроз цев са водом од предајника до рефлектора и назад до пријемника. Кад се повећава брзина протока воде кроз цев линеарно расте и фреквентни померај између послатог и примљеног таласа. Ласерски мерач протока користи рефлексију светлости и време прелета светлости кроз воду и мери брзину протока. Кориолисов сензор протока и пиезо-сензор протока користе фиксну вибрацију (импульсе константне учестаности). Протоком воде вибрација се мења па настаје фазни помак који се мери у функцији од протока.

Остали сензори протока. У остале сензоре протока спадају регулатори протока, попречно-корелациони сензори, вртложни сензори, прекидачи протока [88]. Регулатори протока дају константан проток без обзира на пад притиска кроз славину. Брзина протока зависи од градијента излазно / улазног притиска и отпора протоку кроз регулатор. Попречно-корелациони сензори протока (ултразвучни и ласерски) мере време прелета основног сигнала који се одбије од грудвице честица или турбулентни ток помоћу два сензора постављена по оси цеви. Измерено време прелета је у корелацији са брзином протока.

Вртложни сензори протока стварају у цеви вртлоге помоћу вртложног тела - препреке: вибрације услед вртлога су у корелацији са протоком течности. Пиезо-електрични детектор пребројава импулсе услед вртлога а број импулса је пропорционалан брзини протока. Прекидачи протока фреквенцијом прекидања протока регулишу проток течности у цевима.

5.5.2. Термички сензори протока течности

Принцип рада термичких сензора протока течности се може представити на следећи начин: у цеви се налази грејач који преноси топлоту на воду, а разлика температура улазне и одлазне воде је директна функција брзине протока [89]. Разлику температура мере улазни и излазни термометар. Код капиларних протока грејач је намотан око капиларе, а термометри су наслоњени на капилару. Грејач може имати константну струју, напон или снагу или радити у импулсима. За микропротоке користе се и чип интегрисани сензори протока који раде на истом принципу, али често у импулсном режиму. Предности ових сензора протока су то што нема покретних делова и имају неометани проток течности. За веће протоке сензор одведене топлоте захтева већу снагу грејача, а за брзе промене протока и већу брзину одзива термометара.

5.6. Мерење брзине ветра

Анемометри су направе за мерење брзине ветра. Има их у метеоролошким станицама, на аеродромима, ветропарковима, на бродовима у морнарици, великим фармама, спортским објектима и другим местима. Постоје три типа анемометра: први мери брзину ветра по једној оси, други у хоризонталној равни и трећи у тродимензионалном координатном систему. Брзина ветра је векторска величина па је потребно мерити компоненте тог вектора по осама, интензитет и углове према осама. Анемометри раде на различитим принципима: анемометар са чашицама, са угрејаном жицом, пропелером, затим на бази притиска, еластичне мембране, микрофона, ултразвука, ласера, и одвођења топлоте.

Анемометар са две, три или четири чашице је механичко коло које се окреће на ветру услед притиска ваздуха у хоризонталној равни [90]. Број обрта механичког кола је пропорционалан са брзином ветра: мерење броја обрта се врши електричним, оптичким и магнетним сензорима. Овај тип анемометара се користи као стандардни у метеорологији.

Анемометар са угрејаном жицом ради на бази одвођења топлоте тј. хлађења услед ветра. Тада се отпорност жице мења, у корелацији са брзином ветра. У каналима за климатизацију се користи за мерење протока ваздуха. Он је уједно први професионални анемометар, направљен почетком прошлог века [91].

Цак за ветар и данас на аеродромима показује интензитет и правац ветра: на дну цака се постави мали тег тако да при порасту брзине ветра тег се подиже више од земље.

Питоова цев, еластичне мембране и микрофони мере притисак ваздуха који ствара ветар и доводе га у корелацију са брзином ветра [92]. Анемометар са малим пропелером се усмерава у правцу ветра. Број обрта пропелера је пропорционалан брзини ветра. Користи се за повремено мерење брзине ветра (по потреби), малих је димензија и преносног је типа [93].

Ултразвучни анемометар

Ултразвучни анемометар има предајник и пријемник ултразвучних импулса на ваздушном путу-растојању реда 0.5 m. Када ветар дува долази до деформације ултразвучних импулса у односу на поворку из предајника (референтни сигнал). Величина одступања ова два сигнала зависи од брзине ветра [94].

Ласерски анемометар

Ласерски анемометар такође користи поређење два сигнала (једног који иде кроз ветар и другог - референтног који је затворен у уређају). Помак између ова два сигнала (на бази Доплеровог ефекта) је директно пропорционалан са брзином ветра [95].

Анемометри са одвођењем топлоте

Анемометри на бази одвођења топлоте развијани су са грејачем и диск NTC термисторима као сензорима. При томе спољашња температура није узимана као параметар већ је вршена компензација у уском опсегу промене температуре око собне температуре [96].

Експериментални део

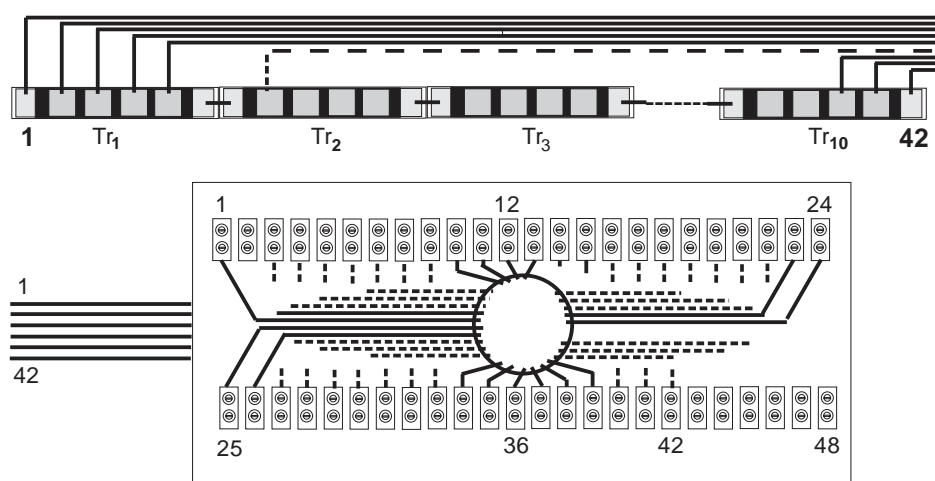
6. ТЕРМИСТОРСКИ НИЗ ЗА МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ТЛА

У оквиру ове дисертације развијен је термисторски низ за мерење температурног профила тла (обрадивог слоја земље) који се састоји од 10 редно постављених сегментираних термистора. Укупна дужина термисторског низа као сензорског система је 55 cm и има 40 мерних тачака (на сваких 12,7 mm по један сегмент-једна мерна тачка). Термисторски низ реализован је за потребе детаљног мерења температурног профила тла (по дубини) и промене температуре са временом. Овај сензорски систем намењен је за истраживања утицаја промене температурног профила тла на развој биљака у биологији и пољопривреди. Поред тога у метеорологији тла могуће је пратити корелацију са надземном температуром у склопу праћења климатских промена испод површине тла. Сегментирани термистор В-типа као појединачни сензорски елемент приказан је у глави 4., слика 21. Првобитна идеја је била да се овај термистор примени да ради као сензор протока флуида на бази одвођења топлоте, али је та идеја напуштена јер је имала велики недостатак: електрична отпорност сегментираних термистора је била висока, што захтева висок радни напон при самозагревању.

Садашња примена термисторског елемента В-типа је нова и другачија: термисторски низ за мерење температуре тла је пасивно коло а отпорност сваког сегмента на одређеној дубини зависи од температуре тла на тој дубини и мери се унимером у 40 мерних тачка у низу. За потребе реализације термисторског низа за мерење температуре тла штампана је нова серија сегментираних термистора као сензорских елемента од NiMn_2O_4 термисторске пасте. Добијање термисторског праха NiMn_2O_4 описано је у глави 3. а поступак штампања дебелих слојева термисторске пасте је описан у глави 4. Карактеризација нове серије сензорских елемената, штампане са зановљеном NiMn_2O_4 пастом, вршена је у клима комори: нова серија термистора имала је нешто већу номиналну отпорност (поновљивост код хибридних кола је условљена бројним технолошким поступцима). Карактеристике сензорских елемента из нове серије коришћене за термисторски низ приказане су касније у овом поглављу после описа конструкције термисторског низа.

6.1. Конструкција термисторског низа

Конструкција термисторског низа за мерење температурног профила тла приказана је на слици 23. Низ се састоји од редне везе 10 сегментираних термистора постављених на носачу низа тј. пластичној вођици за каблове и танке алуминијумске цеви дужине 85 cm и пречника 20 mm. Са доње стране цев има пластични чеп, а са горње пластичну кутију са 48 контаката за 42 жична извода од танке изоловане жице. Термистори су после лемљења извода од бакарне жице покривени танким слојем VF-лака из спреја (прва водоотпорна изолација). Пластична вођица са термисторима и жицама је потом испуњена силиконском смолом и затворена пластичним затварачем (друга изолација од влаге). Вођица је потом смештена у алуминијумску цев (трећа изолација од влаге) а жице из вођице су спојене на конектор.

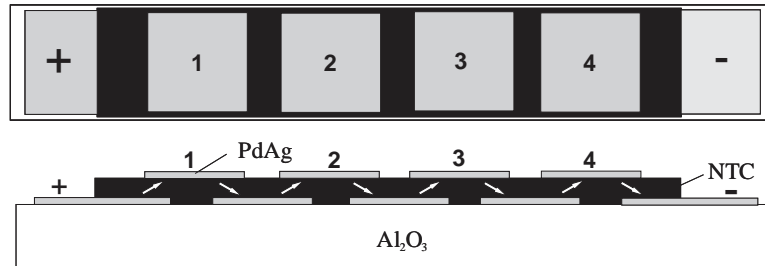


Слика 23. Еквивалентна блок шема термисторског низа састављеног од 10 сегментираних термистора везаних редно: Tr₁ до Tr₁₀, - сегментирани термистори (горе) и конектор са 48 контаката за жичне изводе (доле).

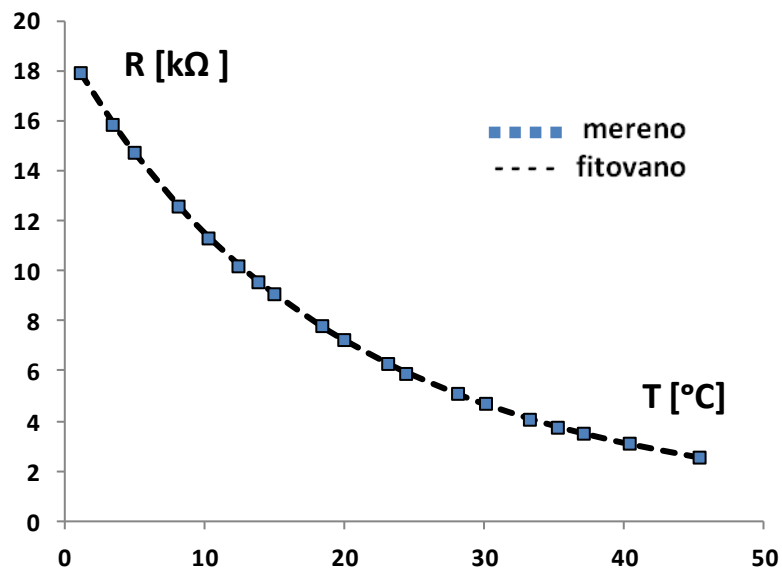
Након тога сензорски систем (цев са термисторским низом) је постављен у вертикално позиционирану рупу на травњаку дубине 55 cm и пречника 20 mm. Већи део цеви (термисторски низ) је у земљи а остали део дужине 30 cm цеви је изнад земље. После више година стајања у земљи и бројних мерења температуре под свим климатским условима нису уочене промене основних карактеристика термистора.

6.2. Карактеристике сензорских елемената

Основне карактеристике NiMn₂O₄ сегментираних термистора из нове серије од којих је формиран термисторски низ мерене су у клима комори (Heraeus-Vötsch типа VK I 08 / 450). Мерена је номинална отпорност R_0 и зависности отпорности термистора од температуре $R(T)$, а одређен је експоненцијални температурни фактор B термистора. На слици 24. приказана је конструкција сегментираних термистора (поглед одозго и његов попречни пресек) а на слици 25. зависност отпорности термистора од температуре $R(T)$:



Слика 24. Конструкција сензорског елемента - дебелослојног NiMn_2O_4 сегментираног термистора са четири унутрашње електроде : Al_2O_3 - керамичка подлога, PdAg - електроде у два нивоа (горње и доње), NTC - NiMn_2O_4 термисторски слој, "+" и "-" означавају спољашње електроде а 1, 2, 3, 4 унутрашње електроде (мерне тачке). Величина сензорског елемента је 50,8 mm x 6,35 mm x 0,5 mm.



Слика 25. Зависност отпорности R од температуре T за сегментирани термистор штампан од NiMn_2O_4 пасте: ■■■■ - мерене вредности отпорности R, - - - - фитована крива R(T).

Дебели слојеви NiMn_2O_4 су штампани ситом (SD-200, BOPP) сушени и синтеровани на температури од $850\text{ }^\circ\text{C} / 10\text{ min}$ три пута узастопно да би се добила дебљина термисторског слоја реда $36\text{ }\mu\text{m}$. Горњи и доњи слој електрода су штампани помоћу PdAg пасте, сушени а затим синтеровани под истим условима у хибридној - ковејерској пећи. Номинална отпорност добијених сегментираних термистора је била реда $7\text{ k}\Omega - 8\text{ k}\Omega$ а појединачних сегмента $1,5\text{ k}\Omega - 2\text{ k}\Omega$ што је било погодно за нову примену тј. мерење температуре тла. Експоненцијални фактор B је одређен на основу једначине (4) (одељак 2.5.2., глава 2.), у уском опсегу температура од $10\text{ }^\circ\text{C}$ до $30\text{ }^\circ\text{C}$ на R(T) кривој и износи $B=3863\text{ K}$, при чему је номинална отпорност била $R_0=7215\text{ }\Omega$.

6.3. Калибрација термисторског низа

Пре мерења температурног профила у земљи обављена је калибрација термисторског низа у клима комори тако што је цео низ унет у клима комору на температуру од 20 °C и измерене вредности свих 40 сегмената један по један. Тиме су добијене номиналне вредности термистора на сваком сегменту R_{0i} ($i=1\dots 40$) са грешком реда 0.1 %. Мерење температурног профила тла вршено је коришћењем номиналне вредности R_{0i} и експоненцијалног фактора B и једначине (7), (одељак 2.6.1.) а за сваку нову вредност отпорности сегмента R_{xi} одређена је температура T_{xi} на дубини d_i на којој се та мерна тачка налази. На слици 26. приказан је прототип уређаја тј. термисторски низ (градијентни сензор температуре тла GST-1) и његово постављање за мерење температурног профила горњег слоја земље:

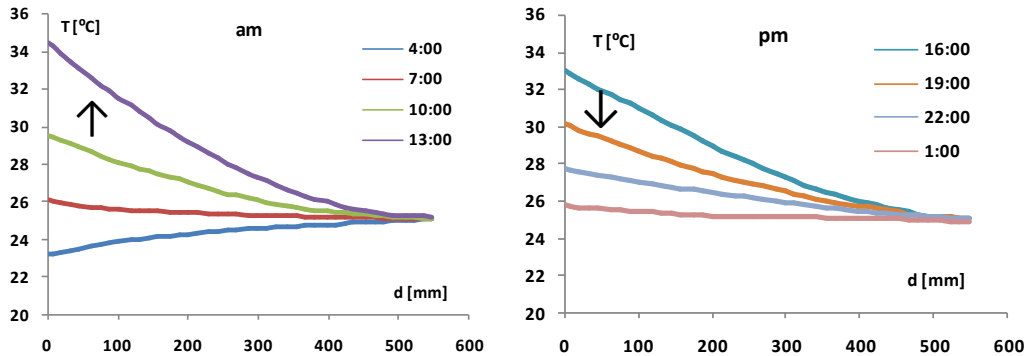


Слика 26. Термисторски низ за мерење температурног профила тла (GST-1): а- прототип у хоризонталном положају (лево) и б- прототип у вертикалном положају постављен на мерно место (десно).

6.4. Мерење једнодневних температурних профила тла

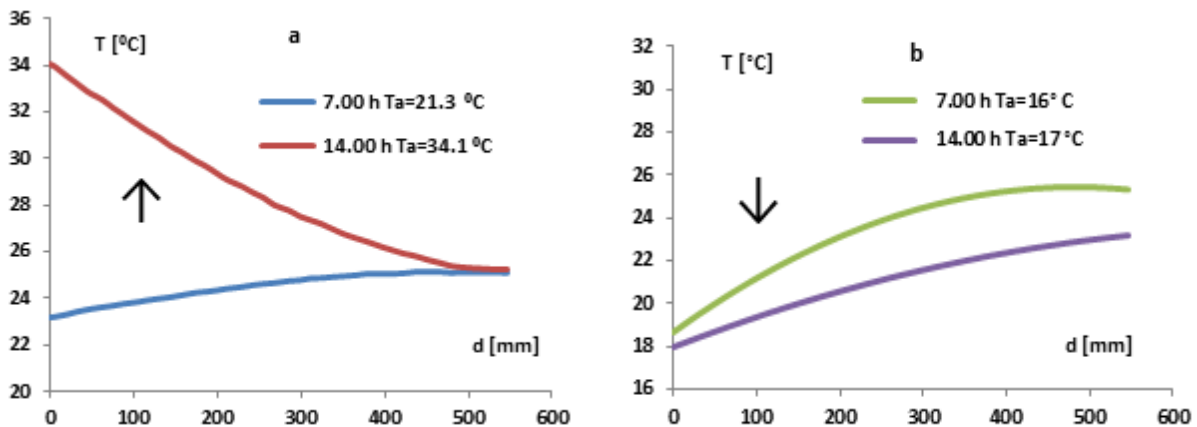
Мерење промене температурног профила тла помоћу термисторског низа (GST-1) за мерно место на травњаку приказано као на слици 26.б вршено је у току 24 часа и приказано је на слици 27. Температурни профил тла је мерен на сваких 3 часа од јутра 28. јуна до јутра 29. јуна 2017. Мерење је вршено за топао летњи дан без падавина и облака или ветра. Јутарња температура ваздуха у 7.00 часова у сенци на 2 m висине је прелазила 20 °C а највиша дневна у 14.00 часова је била око 34 °C. Температурни профил тла је растао по интензитету у првом делу дана (обележено стрелицом на горе), а опадао у другом делу дана и током ноћи (обележено стрелицом надолу).

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



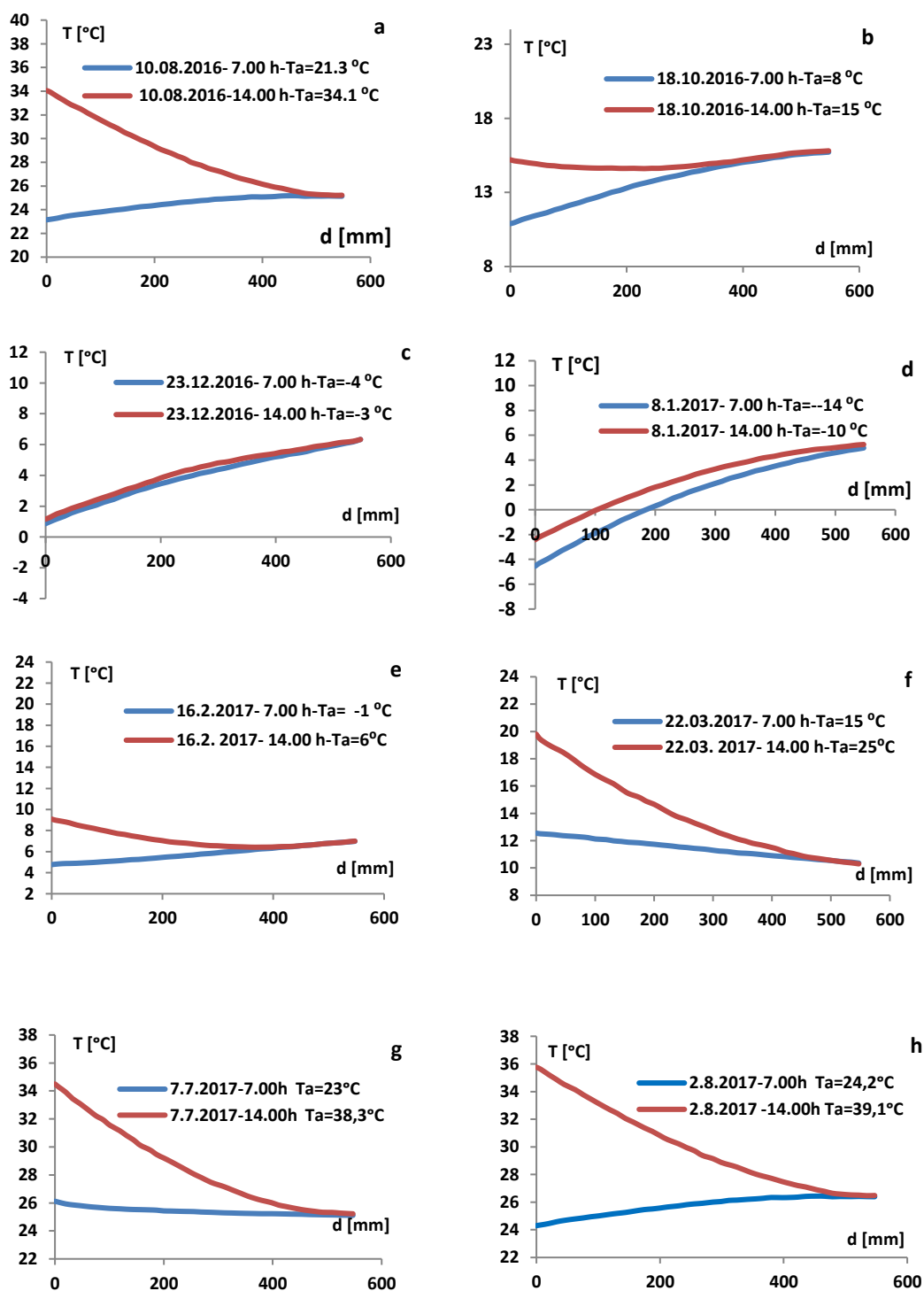
Слика 27. Промена температурног профила тла мерена помоћу термисторског низа (GST-1) на свака 3 часа у току 24 часа за летњи дан 28. јуни 2017. године: T -температура, d -дубина у земљи, време t у часовима као параметар, стрелице обележавју раст и пад температуре са временом (am - пре подне, pm - после подне).

На основу ових мерења било је очигледно да је температурни профил тла најнижи око 7.00 часова пред излазак сунца, а највиши око 14.00 часова. Тако је посматрано за целу годину најпогодније (ради упоређивања резултата) да се дневна мерења профила температуре тла у току године врше управо у 7.00 h и 14.00 h. На слици 28. дати су измерени типични дневни температурни профили мерени за два узастопна летња дана: први када је било топло време, и други када је пала киша (нагла промена времена - релаксација) 10. и 11. августа 2016.:



Слика 28. Промена температурних профила тла (релаксација) мерена у 7.00 и 14.00 часова помоћу термисторског низа (GST-1) на дан 10. и 11. августа 2016. (слика а и б, респективно): T -температура тла, T_a -температура ваздуха на 2 m од површине тла, [97].

У току године запажени су карактеристични профили за пролеће, лето, јесен и зиму мерени у периодима кад нема наглих промена времена који су приказани на слици 29.a-h.



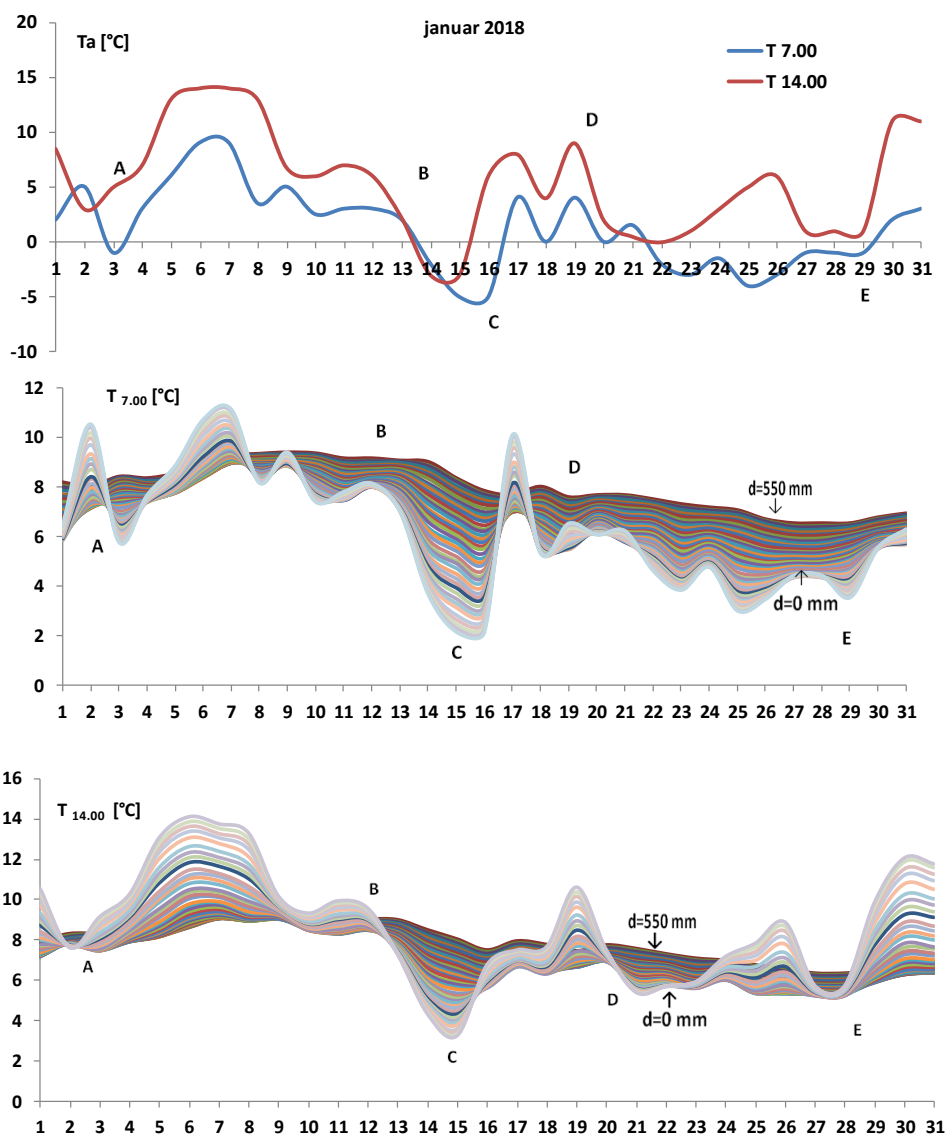
Слика 29. Температурни профили тла мерени у 7.00 и 14.00 часова зависно од годишњег доба у различитим периодима када нема наглих промена времена: а - лето, б - јесен, с, d, е - зима, f - пролеће, g, h - поново лето, [97].

Нагиби кривих на сликама 28. и 29. тј. градијенти dT/dz - температуре по дубини су различити: када је $dT/dz < 0$ нагиб је негативан и тло прима енергију од сунца и загрева се, насупрот томе када је $dT/dz > 0$ нагиб је позитиван и земља преноси енергију из дубине према површини. Приказани су дани када су и јутарњи профили у 7.00 часова и поподневни профили у 14.00 часова позитивни (зими с, d) и дани када су и јутарњи и поподневни профили негативни (пролеће-лето f, g). Преподневни и поподневни профили могу бити различитог знака (лето-јесен a, b, h), јер пре подне се земља загрева и нагиб на профилу је негативан, а ујутру је ваздух хладнији од површине земље и нагиб обрнут тј. позитиван. На крају треба запазити и температурне профиле типа седла а и равне линије када у земљи настаје баланс (равнотежа) примљене енергије и враћене енергије назад у атмосферу. На дубини од 550 mm температура је практично константана и криве јутарњег и поподневног профила се практично састају у једној тачки, док је на површини земље дневна промена температуре T земље и до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а ваздуха и до $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (криве a, h). Велики значај градијента температуре тла био је разлог да прототип термисторског низа буде назван GST-1 (градијентни сензор температуре).

6.5. Мерење месечних температурних профила тла

Спајањем 30 јутарњих температурних профила тла мерених у 7.00 часова (температурни минимуми) и 30 поподневних профила мерених у 14.00 часова (температурни максимуми) за сваки месец у години могу се добити месечни профили температуре тла по дубини. Мерења температурних профила помоћу термисторског низа (уређаја GST-1) вршена су током 2017.- 2019. године (18 месеци) на исти начин како је описано у одељку 6.3. на слици 26.b на травњаку (земља која није прекопавана више од 20 година). У овом одељку због обима података могу бити приказани једино профили за неколико изабраних месеци за свако годишње доба. Осим температурног профила тла мерена је и локална температура ваздуха у 7.00 и 14.00 часова на 2 m висине у сенци ради корелације температуре између ваздуха и земље. При томе бележене су и промене у атмосфери као што су киша и снег, а то се одражава на температурни профил горњих слојева земље наглим променама градијента dT/dx на температурним профилима.

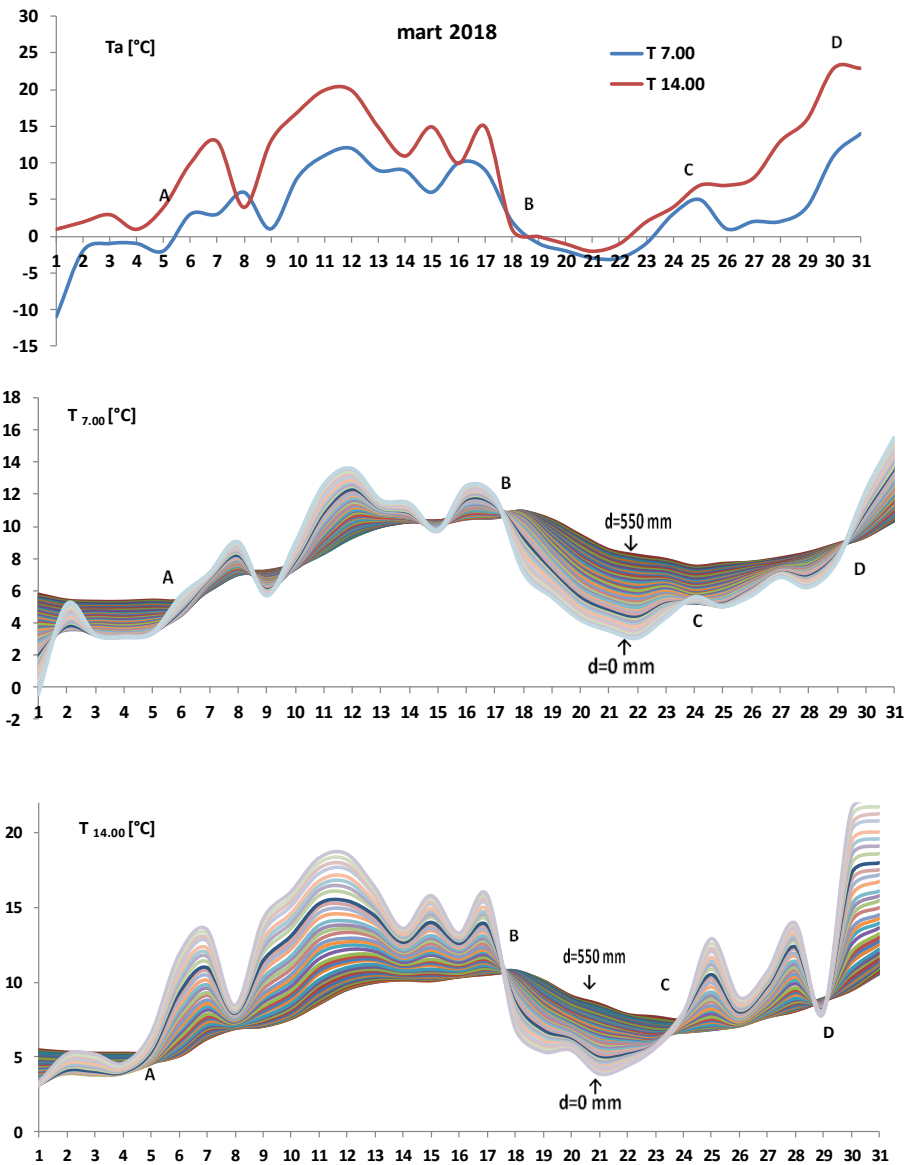
На сликама 30.-35. дати су месечни температурни профили мерени у поменутом периоду - по 40 кривих у снопу за дубину од 0 mm до 550 mm мерено од површине земље надоле. Растојање по дубини између две суседне мерне тачке у термисторском низу је 12,7 mm, што важи и за две суседне криве на температурним профилима. На овај начин температурни профили $T(t,z)$ су приказани у функцији од времена t (дани у месецу) као $T(t)$ -криве, где је дубина d узета као параметар. За мерење јутарњег и поподневног профила (у 7.00 и 14.00 часова, респективно) потребно је 80 мерних тачака у два мерења дневно, за један месец око 2400, а за 18 месеци око 43000 тачака. Укупан број једнодневних профила је био око 550, а сви су сврстани у месеце и то посебно јутарњи, а посебно поподневни профили, додајући томе и локалну температуру ваздуха у тренутку мерења тј. око 1100 мерења. Криве у снопу на површини земље обележене су са $d=0\text{ mm}$ а на највећој мерној дубини са $d=550\text{ mm}$.



Слика 30. Промена температурних профила тла у 7.00 и 14.00 часова за месец јануар 2018: T_a - температура ваздуха, $T_{7.00}$ - температурни профил тла мерен у 7.00 часова, $T_{14.00}$ - температурни профил тла мерен у 14.00 часова.

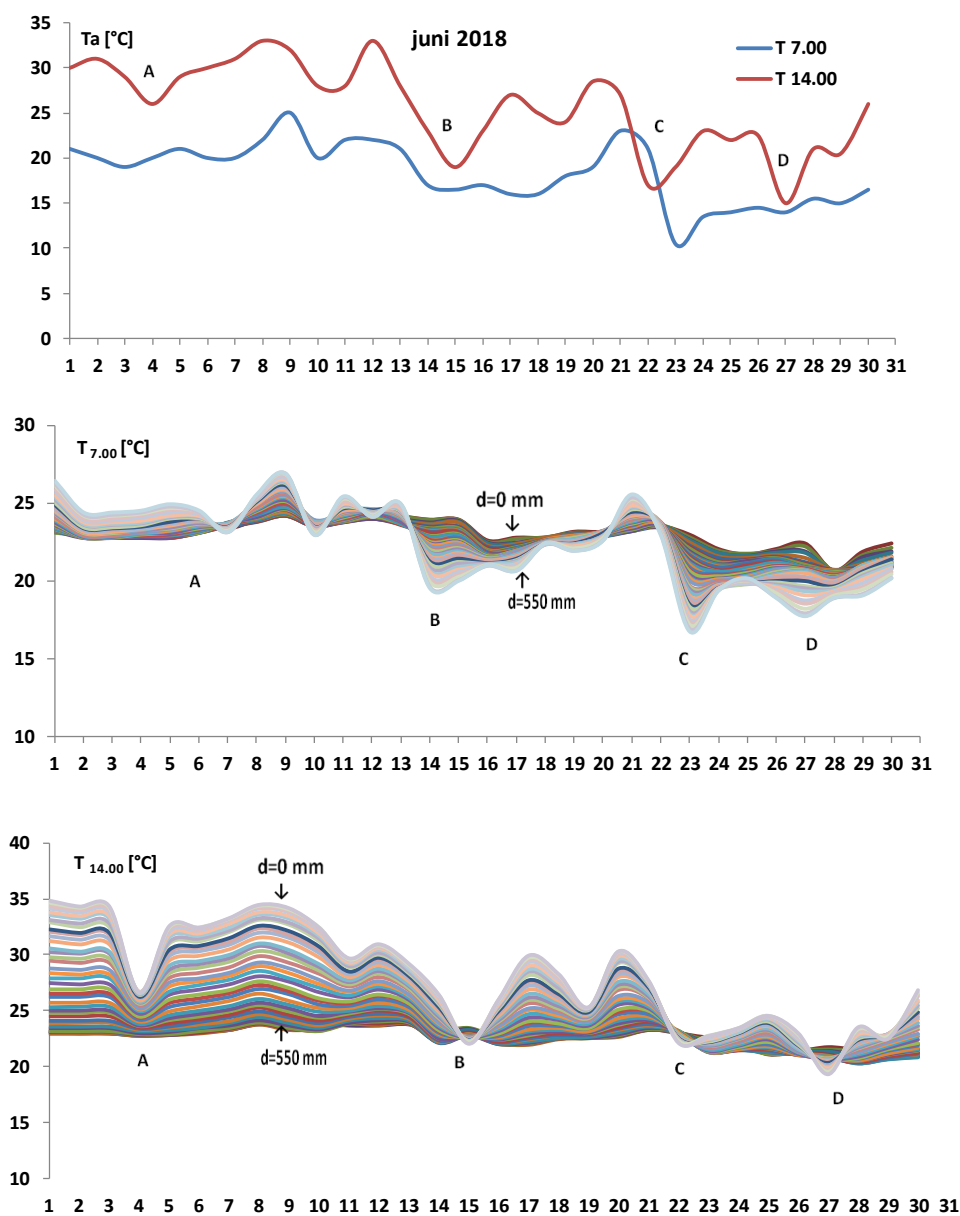
Јануар 2018. је био топао првих 12 дана (од тачке А до В $T_a > 0$, у ваздуху), али је пао снег 13. јануара и задржао се до 28. јануара (после тачке В па до тачке Е): тада је у ваздуху било $T_a < 0$, а ретко кад $T_a > 0$ (од С до D) и било је укупно 7 ледених дана. Код температурних профила тла мереног у 14.00 h од 12.-14. јануара (В до С) промена градијента $dT/dz > 0$ (по вертикали мења се распоред кривих у снопу). Температура површине земље T_0 мерена на $d=0$ mm пада испод температуре T_{550} на максималној дубини мереној на $d=550$ mm. Јутарња температура земље T_0 мерена у 7.00 h на површини је ретко прелазила T_{550} , а поподневна температура на површини земље T_0 знатно више пута је прелазила T_{550} , сем у периодима већих захлађења 12.-18., 20.-24. и 27.-28. јануара када долази до инверзије профила.

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



Слика 31. Промена температурних профила тла у 7.00 и 14.00 часова за месец март 2018: T_a - температура ваздуха, $T_{7.00}$ - температурни профил тла мерен у 7.00 часова, $T_{14.00}$ - температурни профил тла мерен у 14.00 часова.

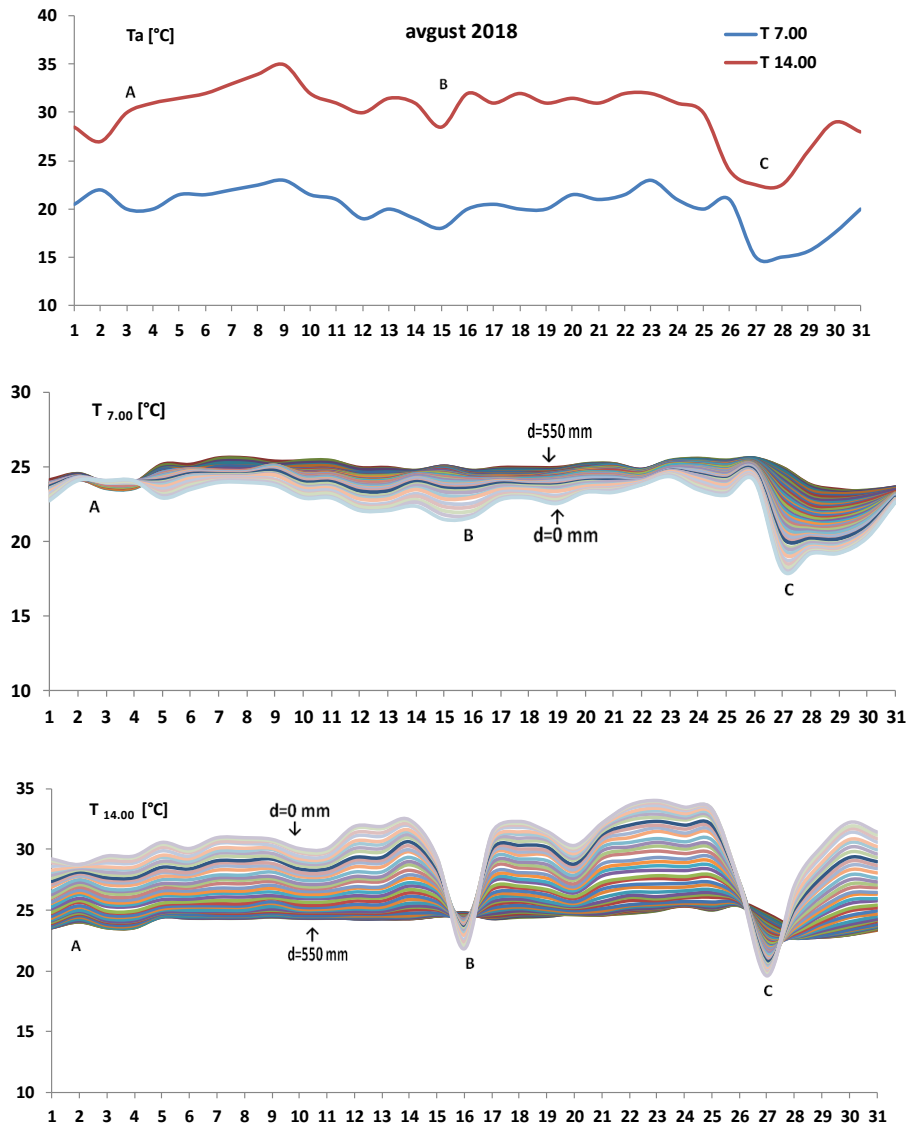
Између 5. и 17. марта 2018. су били топли дани (од тачке А до В) и градијент температуре на поподневном профилу је био $dT/dz < 0$. У периоду од 17.-23. марта је било кише и у том периоду (од тачке В до С) у ваздуху је било $T_a < 0$. Градијент температуре тла dT/dz у том периоду се променио у позитиван тј. $dT/dz > 0$. Сноп кривих температурног профила се преокреонуо за оба профила (јутарњи и поподневни). Релаксација услед кише је била и 29. марта. На јутарњем и на поподневном профилу температуре земље ова појава се види као превој (седло - тачка D), као да је сноп кривих везан у чвор, а градијент температуре тла је тада $dT/dz \approx 0$.



Слика 32. Промена температурних профила тла у 7.00 и 14.00 часова за месец јуни 2018: T_a - температура ваздуха, $T_{7.00}$ - температурни профил тла мерен у 7.00 часова, $T_{14.00}$ - температурни профил тла мерен у 14.00 часова.

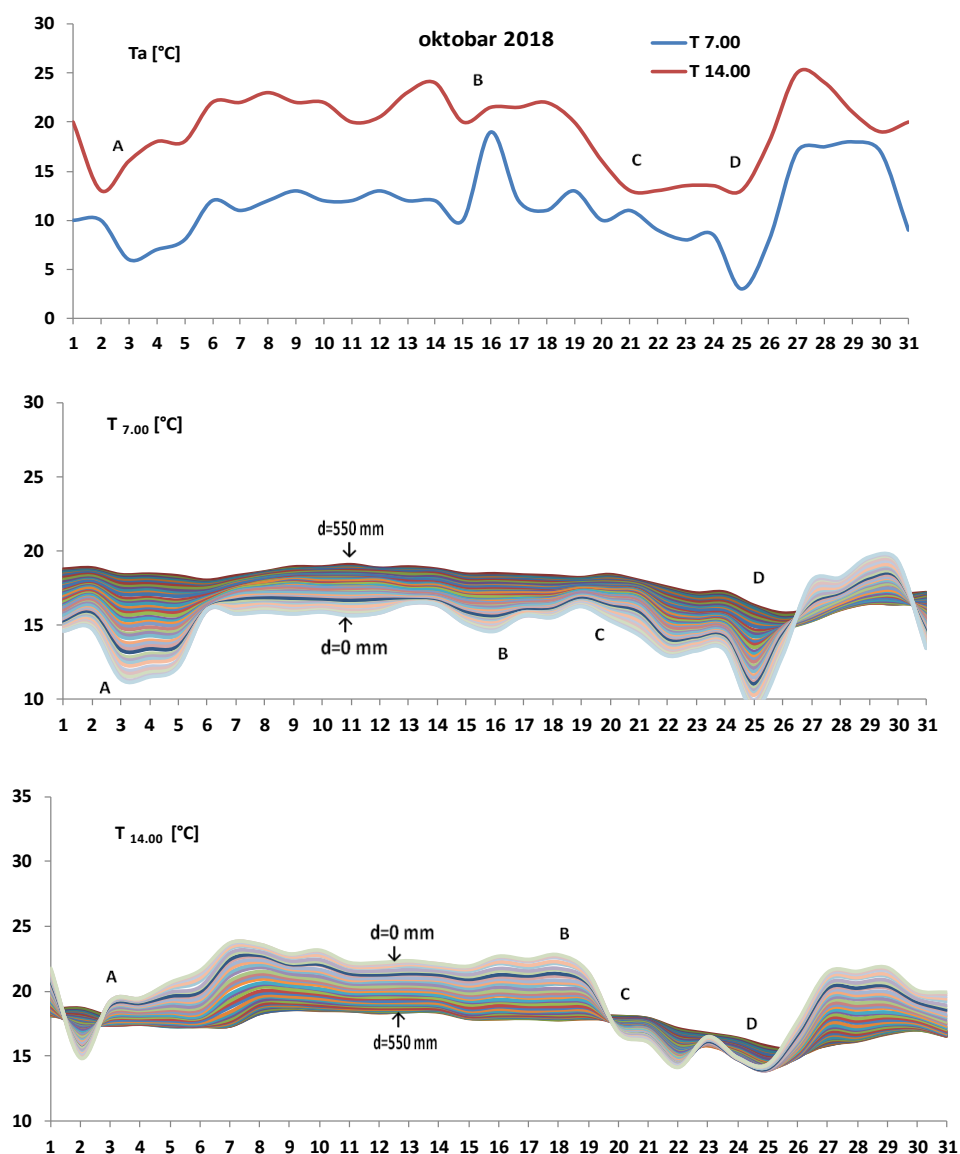
Почетак јуна 2018. је био сунчан, а кише је било у периоду од 4.-5. (A), 14.-15. (B), 21.-22. (C), 26.-27.(D) и у тим периодима температура ваздуха је пала на $T_a \approx 20$ °C. Градијент температуре тла dT/dz у тим периодима се променио тј. постао позитиван $dT/dz > 0$. Релаксација температуре услед кише 14.-15. јуна и 21.-22. јуна (у тачкама В и С, респективно) на јутарњем профилу се види као инверзија, а на поподневном профилу се види као седло, где је $dT/dz \approx 0$. Постоји јака корелација између дневне температуре ваздуха мерене у 7.00 и 14.00 часова и T_0 температуре површине земље, док је на дубини од 550 mm утицај дневне температуре ваздуха на температуру T_{550} много мањи.

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



Слика 33. Промена температурних профила тла у 7.00 и 14.00 часова за месец август 2018: T_a - температура ваздуха, $T_{7.00}$ - температурни профил тла мерен у 7.00 часова, $T_{14.00}$ - температурни профил тла мерен у 14.00 часова.

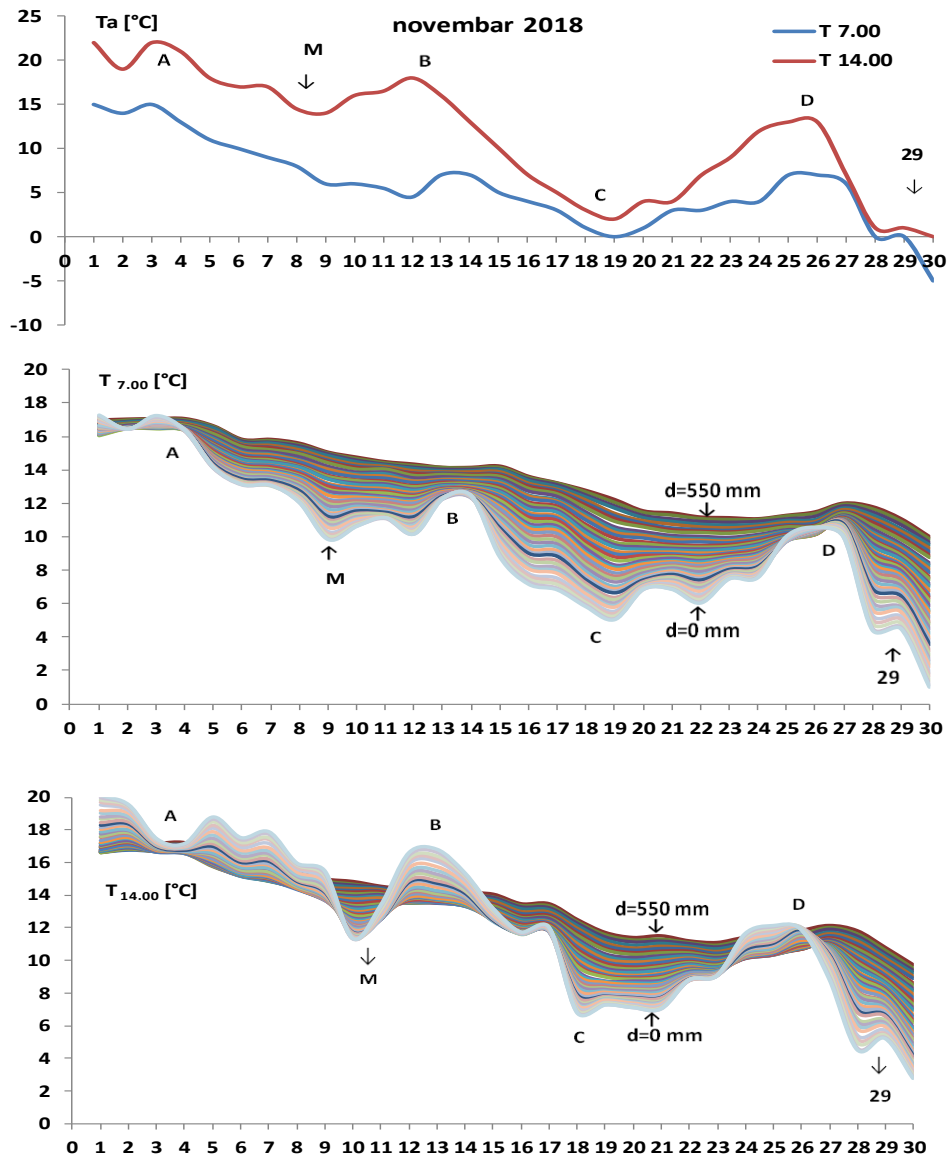
Од 3.-26. августа 2018. (од тачке А па све до два дана пре тачке С) температура ваздуха у 7.00 часова је била око $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ а у 14.00 часова око $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Градијент температуре на јутарњем профилу је био позитиван $dT/dz > 0$, а на поподневном $dT/dz < 0$. Јутарњи температурни профил земље мерен у 7.00 часова се инвертовао па је на дубини од 550 mm температура $T_{550} > T_0$ на површини земље. За поподневни профил мерен у 14.00 часова на дубини од 550 mm температура T_{550} је била око $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ а на површини T_0 око $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Две реалаксације услед кише су биле 15.-16. и 27.-28. августа (тачке В и С) када се и на поподневном профилу појавила мања инверзија снопа кривих.



Слика 34. Промена температурних профила тла у 7.00 и 14.00 часова за месец октобар 2018: T_a - температура ваздуха, $T_{7.00}$ - температурни профил тла мерен у 7.00 часова, $T_{14.00}$ - профил тла мерен у 14.00 часова.

Од 3. до 19. октобра 2018. било је Михољско лето (од тачке А до В): јутарња температура ваздуха у 7.00 часова је била око $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ а поподневна у 14.00 часова око $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Јутарњи температурни профил земље је био инверзан тј. $dT/dz > 0$ од тачке А до тачке D док је на поподневном температурном профили од тачке А до В градијент $dT/dz < 0$. У периодима од 1.-3. и 19.-26. октобра пала је киша, а дувала је и кошава па је до инверзије температура у земљи дошло и на поподневном профили мереном у 14.00 часова у тачки А и у интервалу од тачке С до D. Од 26.-30. октобра је отоплило у ваздуху, па су оба температурна профила мерена у земљи постала негативна $dT/dz < 0$. У том периоду T_0 на површини земље је била виша од T_{550} у дубини земље.

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



Слика 35. Промена температурних профила тла у 7.00 и 14.00 часова за месец новембар 2018: T_a - температура ваздуха, $T_{7.00}$ - температурни профил тла мерен у 7.00 часова, $T_{14.00}$ - температурни профил тла мерен у 14.00 часова [98].

Почетак новембра 2018. (од А до В) је био сличан почетку октобра и по температури ваздуха и по облику температурних профила мерених у земљи. Недељу дана после 8. новембра (M=Митровдан) дошло је до захлађења тј. температурне инверзије од 14.- 27. новембра (од тачке В до тачке D). Минимум температуре T је био око тачке С а на оба профила $dT/dz > 0$: изузетак је 23.-25. новембар кад је поподневни профил имао $dT/dz < 0$. Велико захлађење за 29. новембар (29↑) види се на оба профила.

Сличне појаве постоје и на температурним профилима мереним у 7.00 и 14.00 часова у месецима који овде нису приказани због мноштва података, али ће температуре за целу годину бити анализирани у дискусији. Овде треба поменути да је температура у обрадивом слоју земље у јакој корелацији са температуром ваздуха, али да је промена температурног профила земље мања него у ваздуху, јер земља има бар за два реда величине већи топлотни капацитет тј. моћ апсорпције и зрачења топлоте у односу на ваздух.

Уочава се да су промене температурних профила као релаксације и цикличне промене везане за неке датуме из Народног календара још из средњег века. Тако се 15. фебруар (Сретење) и 8. новембар (Митровдан) узимају као велике прекретнице у времену, исто као и равнодневнице 22. марта и 22. септембра, затим 22. децембар и 22. јуни. Осим тога на сликама 31.- 36. на температурним профилима земље уочени су периоди као Михољско лето, кише у јуну, пад температуре крајем августа, октобра и новембра. Све ове појаве праћене су променом градијента температуре dT/dz у земљи мереним у 7.00 и 14.00 часова (дневним минимумима и максимумима на једнодневним профилима температуре). Примена ових мерења за праћење подземне метеорологије, развоја корена и целе биљке, одређивање топлотне дифузивности и процену садржаја везане воде у земљи биће дате у дискусији.

7. СЕНЗОРСКИ СИСТЕМ ЗА МЕРЕЊЕ ПРОТОКА ВОДЕ

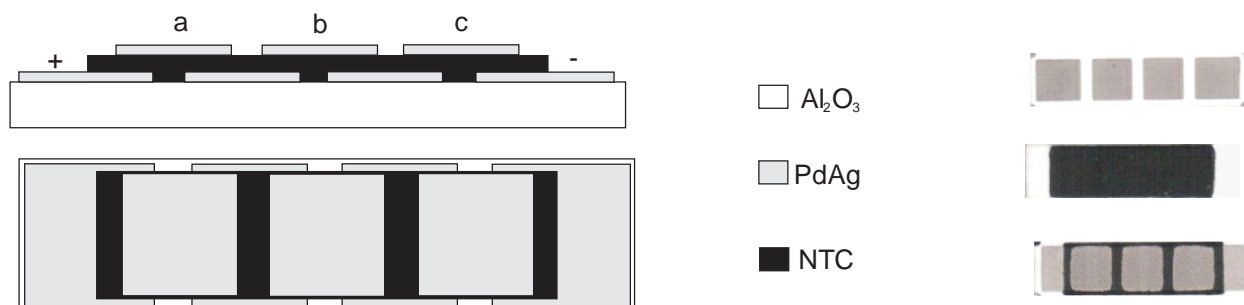
Сензорски систем за мерење протока воде се састоји од пара сегментираних термистора са редукованим димензијама (25,4 mm x 6,35 mm x 0,5 mm), штапаних новом термисторском пастом. Нова паста формирана је од термисторског праха $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ који је настао модификовањем никл манганита NiMn_2O_4 тако што је одговарајући део NiO и Mn_2O_3 замењен са ZnO и CuO . Нови сегментирани термистор као сензорски елемент штампан је у серији од 100 комада помоћу зановљене термисторске пасте NTC 3k3 настале мешањем праха $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ средње величине честице око 0,25 μm , органске смоле - етил-целулозе и праха бор силикатног стакла (1 μm честице у просеку) а према тежинском односу 70 g : 30 g : 5 g, респективно. Термисторски прах $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ настао је одгревањем одговарајуће мешавине прахова NiO , Mn_2O_3 , CuO и ZnO на 900 °C / 4 часа. Чистоћа полазних прахова је била индустријска 99,9 % (Aldrich). После одгревања термисторски материјал је карактерисан помоћу XRD - дифрактометра, а затим је млевен у планетарном кугличном млину 2 часа са 275 обрта у минути (млин FRITCH IV, 300 g челичних куглица пречника 12 mm и 30 g термисторског материјала). Средња величина честица добијеног термисторског праха после млевења била је око 0,25 μm у просеку што је одређено употребом Скенирајуће електронске микроскопије (SEM).

Карактеристике нових сегментираних термистора (сензорских елемената) штапаних од нове пасте дате су у наредном одељку. Димензије новог сегментираних термистора су смањене два пута у односу на димензије сегментираних термистора од чистог никл манганита, а номинална отпорност термистора смањена је за више од десет пута. Сензорски систем са два сегментираних термистора примењена за мерење протока воде истраживан је у више корака као део истраживања на пројекту примене нових материјала и сензорских компоненти у пољопривреди и индустрији. Проток воде се мери као струјни одзив на сегментираним термистору који се самозагрева сопственом струјом при константном напону напајања. Прво је реализован једноставнији сензорски систем (А) који ради у циклусима и штеди напајање а мери само стационарне протоке, а затим сложенији сензорски систем (В) који се напаја континуално и мери и стационарне и импулсне протоке воде.

7.1. Конструкција новог сензорског елемената

Конструкција новог сензорског елемената на бази дебелих слојева термистора је приказана на слици 36. Сегментирани термистори са редукованим димензијама (25,4 mm x 6,35 mm x 0,5 mm) штампани су на подлогама од алумине (Al_2O_3) дебљине 0,5 mm које су нарезане ласером по површини (групна подлога). Најпре су на алумини штампане доње електроде помоћу PdAg пасте, затим три термисторска слоја помоћу $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$ пасте и на крају су преко њих штампане горње електроде такође од PdAg пасте.

Штампање сваког слоја вршено је ситом SD - 200 (отвора по инчу), слој је потом осушен 15 min / 150 °C а затим синтерован у хибридној конвејерској пећи. Процес је понављан 5 пута (пет слојева) док није добијен нови сегментирани термистор, приказан на слици 36.



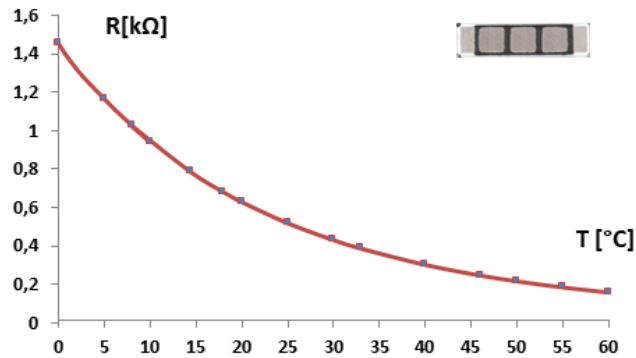
Слика 36. Конструкција новог сегментираног термистора: попречни пресек и поглед одозго (лево) и синтеровани слојеви термистора (десно). Al_2O_3 -алумина подлога, PdAg - проводна паста, NTC- термисторски слој. "+", "-" напојање, a, b, c - унутрашње електроде на сегментима. Димензије сегментираног термистора: 25,4 mm x 6,35 mm x 0,5 mm.

7.2. Електричне карактеристике сензорског елемента

Номинална електрична отпорност сегментираног термистора са редукованим димензијама мерена је на собној температури (20 °C), а промена отпорности термистора са температуром $R(T)$ мерена је у опсегу температуре од 0 °C до 60 °C (тип клима коморе VK I 08 / 450, Heraeus-Wötsch) и приказана дијаграмом на слици 37.

На собној температури (20 °C) измерена је номинална отпорност термистора $R_0 = 630,55\Omega$. Експоненцијални фактор термистора B је одређен на основу једначине (4) одељак 2.5.2., у уском опсегу температуре од 10 °C до 30 °C на кривој зависности отпорности термистора од температуре $R(T)$ приказаној на слици 37. Експоненцијални фактор промене отпорности сегментираног термистора са температуром износи $B=3356 K$.

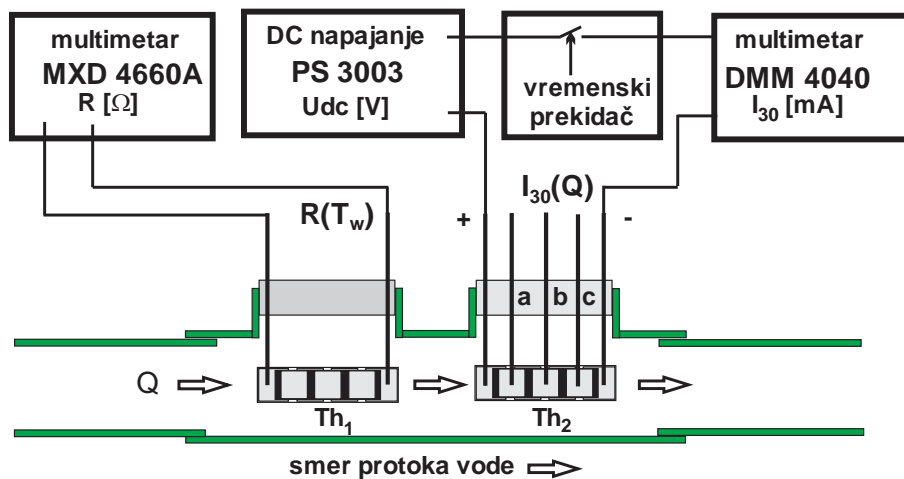
Коришћењем номиналне вредности електричне отпорности термистора R_0 и вредности експоненцијалног фактора B за сваку нову вредност отпорности термистора R_x одређена је нова температура долазне воде T_{wx} дата једначином (7) (одељак 2.6.1.) која ће у свим мерењима протока воде бити параметар. При мерењу струје самозагревања термистора тј. мерењу протока воде сегментирани термистор има две улоге: самозагрева се као грејач и користи сопствену струју самозагревања да мери проток воде. Овај сензорски елемент се користи и у сензорском систему за мерење брзине ветра такође на бази одвођења топлоте.



Слика 37. Зависност електричне отпорности сегментираног термистора R од температуре T мерене у клима комори. Изглед новог сегментираног термистора (у горњим углу).

7.3. Конструкција сензорског система А

Сензорски систем А са новим сегментираним термисторима за мерење протока воде и радом у циклусима (штеди напајање) приказан је на слици 38. Он се састоји од два сензорска елемента типа сегментираног термистора. Први сегментиран термистор Th_1 је пасиван и мери температуру долазне воде T_w помоћу промене сопствене отпорности $R(T_w)$. Други термистор Th_2 има двоструку намену: самозагрева се помоћу једносмерне струје I (при константном напону U) и мери проток воде на бази одвођења топлоте. Излаз овог самозагревајућег сензора је струја термистора I која се мења са протоком воде Q као $I(Q)$.



Слика 38. Еквивалента блок шема сензорског система А за мерење протока воде у штедном режиму напајања: Th_1 - пасивни сегментиран термистор мери температуру долазне воде T_w помоћу електричне отпорности $R(T_w)$. Th_2 - термистор који се загрева сопственом струјом $I_{30}(Q)$ при константном напону напајања U_{dc} .

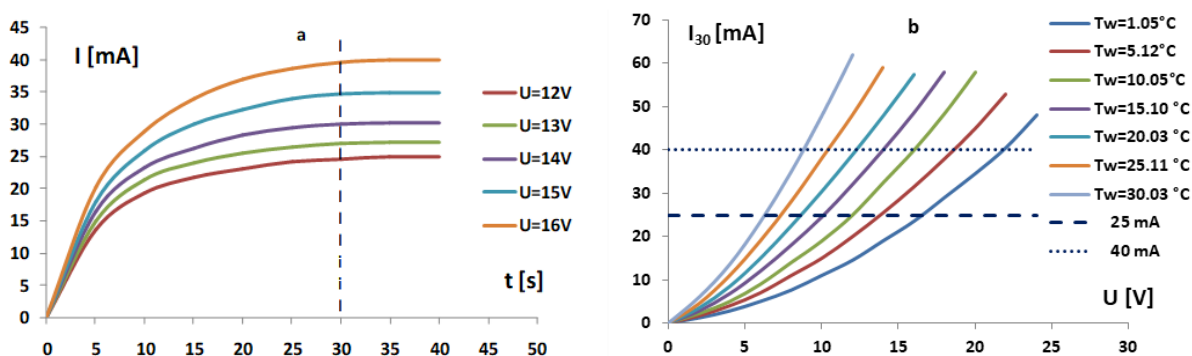
Пластично кућиште се састоји од два спојена Т- елемента за водоводне цеви и отворено је у доводном и одводном смеру. Термистори су од воде изоловани танким слојем епоксида за комформно облагање.

Први прототип сензорског система ради у циклусима: 30 s самозагревања термистора сопственом струјом I при константном напону U , после чега се прекида напајање U , а термистор се хлади природно наредних 90 s до почетног стања. Струја самозагревања термистора I мери се непосредно пред искључење напајања U у последњој тридесетој секунди као I_{30} и претставља меру протока воде $I_{30}(Q)$. Овај режим рада назван је штедним режимом рада јер штеди напајање (батерију) да би систем био преносив и радио на упит по потреби.

Мултиметар MXD 4066A мери отпорност $R[\Omega]$ термистора Th_1 , док DMM 4040 мери струју I_{30} [mA] из извора PS 3003 која пролази кроз термистор. Timer - мери време од 30 s и прекида струју самогревања.

7.4. Радна тачка сензорског система А

Радна тачка сензора Th_2 који се загрева сопственом струјом при константном напону у одсуству протока воде ($Q=0$) зависи од времена протеклог од укључења t , константног напона напајања U и од температуре долазне воде T_w као на слици 39.а. Код цикличног рада напајање и самозагревање термистора траје до 30 s, а затим настаје природно хлађење које траје 90 s. Струја самозагревања I_{30} је дата у функцији напона напајања U као на слици 39.б. При томе температура статичке воде у суду који је постављен на средину клима коморе заједно са термистором мењана је у корацима од по 5 °C у опсегу од 5 °C до 30 °C.



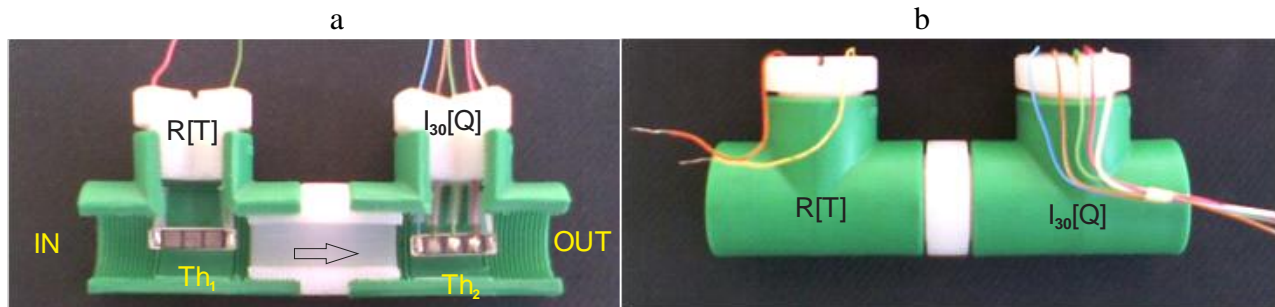
Слика 39. Статичке карактеристике сегментираног термистора (кад нема протка воде): (а) - струја самозагревања I у функцији времена t протеклог од укључења и (б) - струја I_{30} у функцији од напона напајања U . T_w - температура долазне воде као параметар. U -напон напајања термистора [99].

Помоћу статичких карактеристика $I(t)$ (слика 39.а) одређено је време од $t=30$ s када струја самозагревања достиже плато и надаље се незнатно мења: вертикална испрекидана линија

за $t=30$ s показује управо струју I_{30} . Статичке карактеристике $I_{30}(U)$ (слика 39.b) служе да се на сваких 5 °C температуре воде (кад нема протока) одреди радни напон U а да струја термистора I_{30} буде у опсегу између 25 mA и 40 mA (испрекидане хоризонталне линије).

7.5. Одзив сензорског система А на проток воде

Сензорски систем А са два сегментирана термистора у пластичном кућишту (прототип) приказан је на слици 40. Систем мери проток воде Q на основу одвођења топлоте Th_2 термистора и величине струје самозагревања I_{30} (шtedни режим напајања). Сензорски систем је спојен на водовод са леве стране стране (IN) док је са десне стране (OUT) прикључен на излазну цев дужине 2 m после чега вода истиче у отворен простор. Сензорски систем у шtedном режиму напајања (у циклусима од 30 s / 90 s) захтева да проток воде буде континуалан и константан у периоду мерења од 30 s.

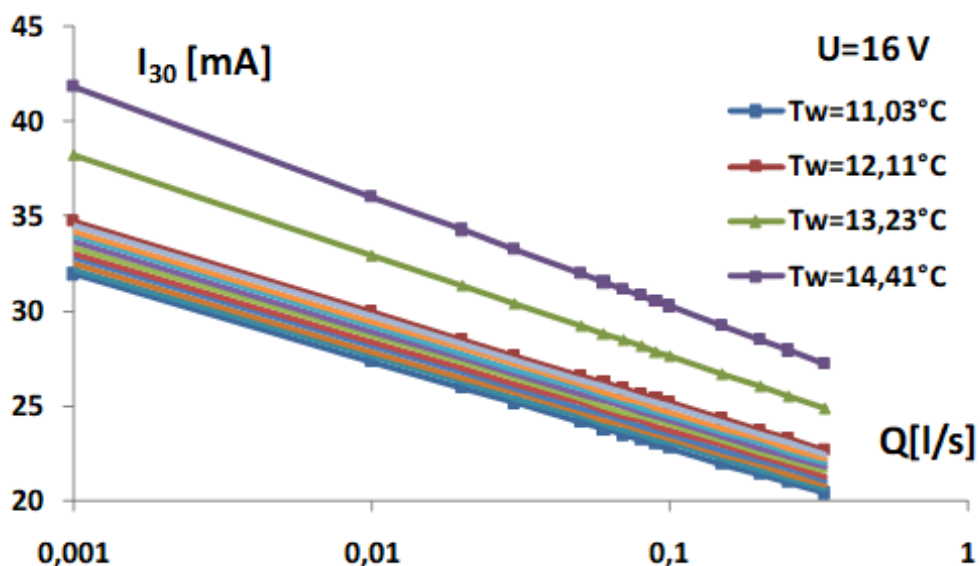


Слика 40. Сензорски систем А за мерење протока воде: поперчни пресек (а) и поглед са стране (б). Th_1 - пасивни термистор мери температуру долазне воде преко $R[T]$. Термистор Th_2 се самозагрева и мери проток воде Q помоћу зависности $I_{30}(Q)$. Стрелица означава смер протока воде. Димензије прототипа сензорског система А: 160 mm x 60 mm x 40 mm.

Сензорски систем А је спојен на водовод на цев пречника $12,7$ mm ($1/2$ ") а проток воде Q кроз сензорски систем је мерен на излазу воде из цеви у отворен простор као $Q= V/t$ где је V протекла запремина воде а t је протекло време. Резултати мерења струје $I_{30}(Q)$ термистора Th_2 у функцији од T_w као параметра дати су на слици 41. Зависности $I_{30}(Q)$ су у $\ln Q$ размери праве линије које опадају са порастом $\ln Q$ (слика 41.) и називају се калибрационим кривама $I_{30}(Q)$. Густо постављене криве у доњем делу слике са кораком $0,1$ °C рачунате су на основу израза (17) и називају се помоћне калибрационе криве:

$$I_{30}=a \cdot \ln Q+b \dots \dots (17),$$

где је a - нагиб праве према $\ln Q$ оси ($Q>0,003$ l/s), b - је параметар који се мења скоковито у једнаким корацима између две мерене калибрационе криве.



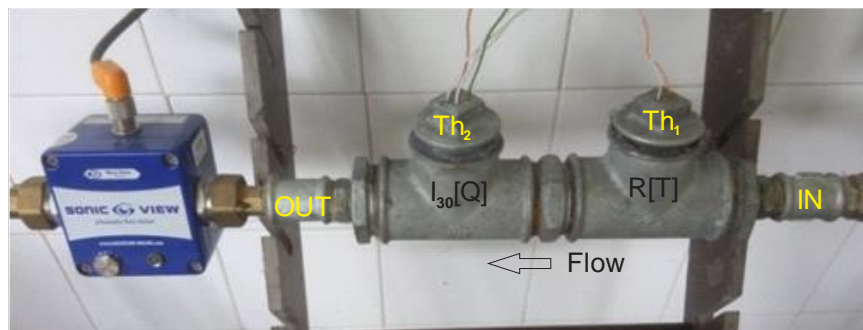
Слика 41. Зависност струје темистора I_{30} у функцији од протока воде Q (калибрационе криве). Температура долазне воде T_w је коришћена као параметар. Између две суседне криве одзива $I(Q)$ за $T_w= 11,03$ °C и $12,11$ °C интерполисане су додатне криве калибрације са кораком $0,1$ °C [99].

Температура воде из водовода је стабилна на мерном месту у лабораторији за климо-механичка испитивања у Ирителу, која лежи на земљи. Анализа несигурности мерења биће дата у дискусију у глави 9.2. Сензорски систем А мери стационарне протоке воде: прекид протока или промена брзине протока воде Q утиче на промену струје самогревања I_{30} .

Мерење импулсних протока воде $Q(t)$ на сегментираним термистору Th_2 који се самогрева остварено је на сензорском систему В који има континуално и стабилно напајање а струја самогревања $I(t)$ је мерена у свакој секунди.

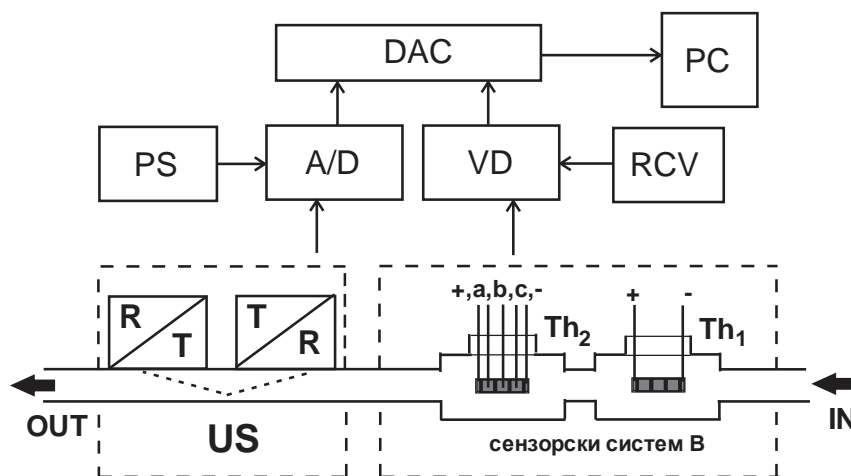
7.6. Конструкција сензорског система В

Сензорски систем са континуалним напајањем В има сличну конструкцију као сензорски систем А са два сегментираним термисторима Th_1 и Th_2 . Разлика је у томе што је кућиште у коме су термистори смештени ливено од метала и састоји се од два спојена Т- елемента за водовод као на слици 42. Сензорски систем В као независни систем је постављен на водоводну цев пречника 12.7 mm ($1/2$ ") а на ред са њим је постављен ултразвучни сензорски систем SONIC VIEW L030. Ултразвучни систем за мерење протока воде даје одзив на стационарни и импулсни проток воде, не зависи од температуре воде и има кашњење одзива око $0,5$ s. За разлику од њега сензорски систем В ради на бази одвођења топлоте: термистор Th_2 се самогрева, температура долазне воде је параметар а термичке појаве на термистору касне у односу на побуду.



Слика 42. Два независна сензорска система за мерење протока воде постављена на водоводну цев: ултразвучни систем (лево) и термисторски систем на бази одвођења топлоте (десно). Димензије прототипа сензорског система В: 160 mm x 100 mm x 50 mm.

Мерно место је додатно опремљено аквизиционом картицом (DAC) и рачунаром (PC) са програмом за аквизицију који мери 10 узорака у секунди, а средњу вредност мерења уноси у базу као вредност одзива у тој секунди. Сваки систем има своје напајање константним напонем (PS) и (RCV) респективно. Код ултразвучног система (US) коришћен је аналогни излаз у функцији од протока воде Q тј. струја $I_{us}(Q,t)$, а код сензорског система В струја самозагревања Th_2 термистора $I(Q,t)$, док електрична отпорност термистора Th_1 служи за мерење температуре долазне воде T_w на основу једначине (7). Прилагодна картица (VD) са осам пасивних делитеља напона омогућава мерење напона на интерним електродама термистора ради комплетног праћења свих мерних тачака сензорског система В. Блок шема мерења са два сензорска система приказана је на слици 43.

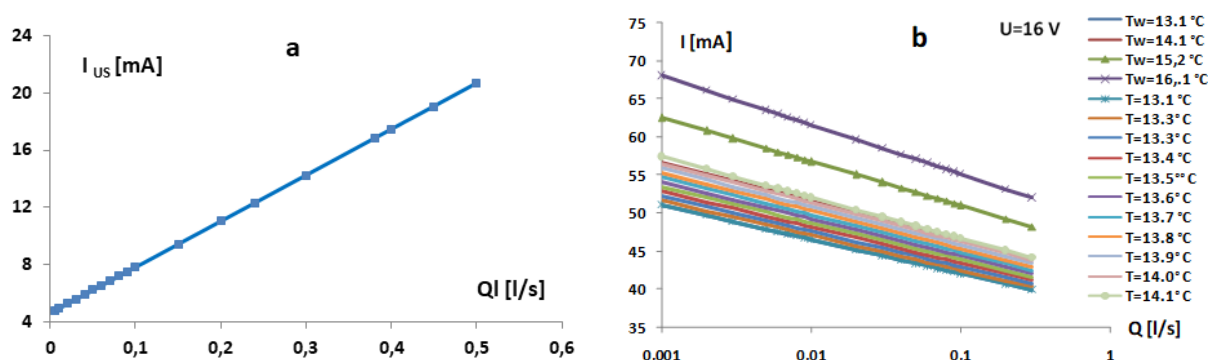


Слика 43. Блок шема мерења са два независна система за мерење протока воде: US-ултразвучни систем (лево) и сензорски систем В (десно): Th_1 - хладни термистор, Th_2 - термистор који се самозагрева, ултразвучни пријемник R/T и предајник T/R, а, b, c - електроде, PS - извор једносмерног напона, A/D - аналогни и дигитални излаз, RCV-адаптивно напајање, V/D-делитељи напона, DAC- аквизициона картица, PC-рачунар.

Намена мерног места на слици 43. са два сензорска система постављена на ред је да мери тренутне одзиве струје $I(t)$ на проток воде $Q(t)$ који може бити стационаран и нестационаран (периодичан, апериодичан, променљив по интензитету, прекидачки, импулсни, мешовит, стохастичан итд.). Овакви протоци постоје на кућном водоводу. У одељку 7.7. који следи најпре су приказани одзиви оба система за стационарни проток а затим одзиви за импулсни проток. На крају су дати одзиви на две тест секвенце са различитим густо постављеним троугаоним и квадратним импулсима.

7.7. Одзиви сензорског система В на стационарни проток

Одзиви ултразвучног система US и сензорског система В са два термистора на стационарни проток воде (калибрационе криве) приказани су на слици 44.



Слика 44. Калибрационе криве излазне струје $I(Q)$: за ултразвучни сензорски систем (а) и сензорски систем В на бази одвођења топлоте (б). T_w - температура долазне воде као параметар. Криве између $T_w=13,1$ °C и $14,1$ °C су интерполисане са кораком $0,1$ °C.

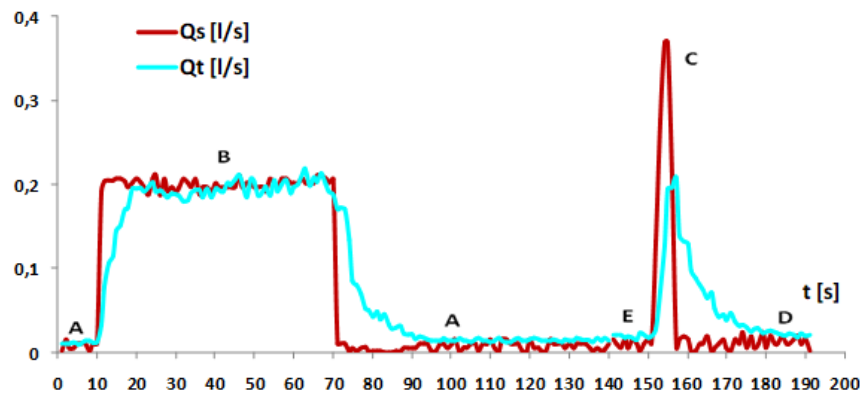
Калибрациона крива $I_{us}(Q)$ за ултразвучни сензорски систем L-30 (SONIC VIEW) је линеаризована излазном електроником од стране произвођача. Ултразвучни сензор не мери протоке испод 50 ml/s. Ултразвучни сензор има несигурност мерења у температурном опсегу од 1 °C до 60 °C око 5 до 10 [%]. Додатном калибрацијом у опсегу температура од 10 °C до 15 °C несигурност мерења опада и износи око 3 %. Калибрациона крива сензорског система В са два термистора на слици 44. је слична калибрационим кривама на слици 41. и с обзиром да је $I(Q)$ права линија ($Q > 0,003$ l/s) у semi-log размери може се аналитички представити:

$$I = a_1 \cdot \ln Q + b_1 \dots \dots (18).$$

Несигурност мерења сензорског система В у температурном опсегу од 5 °C до 25 °C не прелази 3 %. Кашњење сензорског система В у односу на ултразвучни сензорски систем US је испитано и приказано у следећем одељку. Анализа несигурности мерења дата је у Глави 9., одељак 9.2.

7.8. Одзиви сензорског система В на импулсни проток

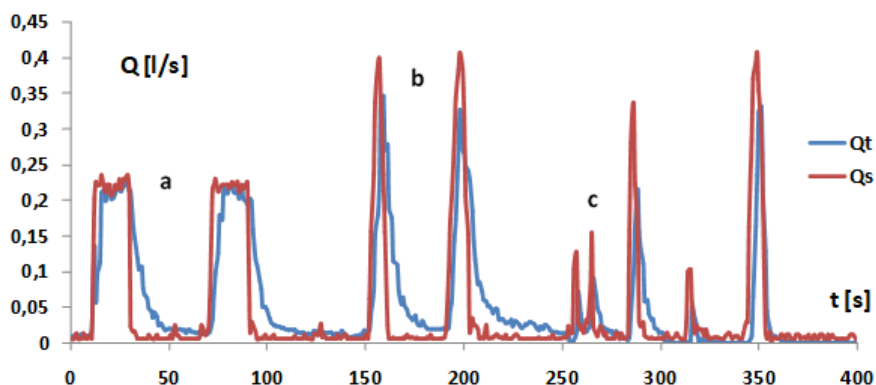
Кашњење сензорског система В у односу на ултразвучни сензорски систем US мерено је помоћу аквизиционе картице (DAC) и приказано је на слици 45. Мерене су излазне струје $I(t)$ за оба система а затим су преко калибрационих кривих $I(Q)$ (на слици 44.) одређене вредности протока $Q_s(t)$ за ултразвучни сензорски систем и $Q_t(t)$ за сензорски систем В на бази одвођења топлоте. Побудни сигнал су била два водена импулса: квадратни (АВА) у трајању од 60 s и уски тоугаони (ECD) у трајању од 5 s са размаком од 80 s између њих (слика 45). Побудни сигнал је мерен ултразвучним сензорским системом који мери проток Q_s са кашњењем од 0,5 s. Одзив сензорског система В са два термистора $Q_t(t)$ касни на предњој ивици одзива око 5 s, док на задњој ивици одзива касни око 25 s. Прво кашњење настаје услед хлађења термистора при наглном укључењу (отварању) протока воде, а друго кашњење настаје после наглог престанка протока воде тј. при самозагревању термистора до претходног стања. Код другог импулса (троугластог) за прве три секунде термистор се није довољно брзо охладио па је максимум импулса нижи за 40 %: после 3 s проток воде је заустављен и термистор је почео да се самзагрева и враћа у почетно стање током наредних 25 s. Температура долазне воде је била константна $T_w=14.5$ °C. Напон напајања термистора је био $U_{RCV}=16$ V.



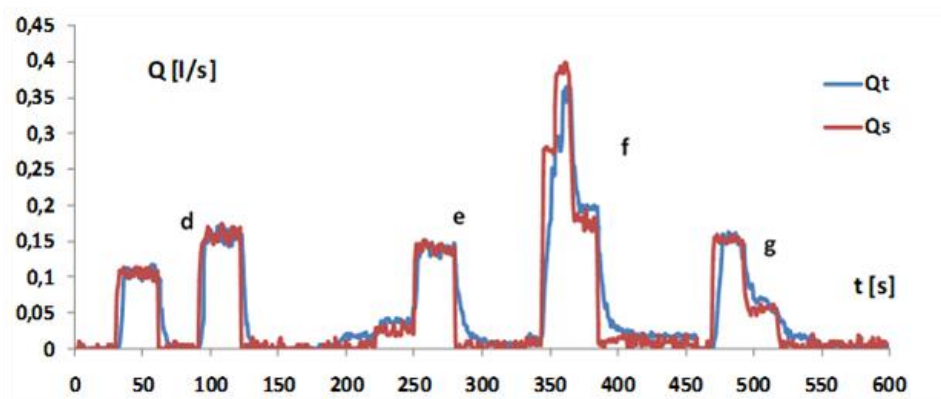
Слика 45. Одзиви ултразвучног сензорског система $Q_s(t)$ и сензорског система В са два термистора $Q_t(t)$: А, Е, D- одзиви кад нема протока, В, С- максимуми протока.

Са слике 45 се види кашњење одзива $Q_t(t)$ тј. да узастопни квадратни и троугаони импулс имају кашњење од 25 s. Ширина импулса треба да буде већа од 5 s и временски размак између импулса већи од 25 s да би $Q_t(t)$ одзиви били што мање деформисани и да се не би одзиви спајали. За две тест секвенце настале честим прекидањем воденог тока са густо распоређеним импулсима квадратног и троугаоног облика различитог интензитета и трајања приказани су одзиви $Q_s(t)$ и $Q_t(t)$ ултразвучног система и термичког сензорска система В на сликама 46. и 47. На слици 46 уочавају се деформације $Q_t(t)$ одзива које настају услед кашњења предње или задње ивице импулса (а, b) и спајање одзива услед временског размака који је мањи од 25 s као и снижавање максимума (c) за импулсе уже од 5 s.

Појаве на предњој и задњој ивици Q_t одзива сензорског система В на бази одвођења топлоте су прелазне промене означене као кашњење термистора који се самозагрева и предаје топлоту води док се не успостави равнотежно стање. То стање се уочава као плато на импулсним одзивима и може се сматрати као део стационарног одзива јер се интензитет протока у том периоду не мења (a) и (d) на сликама 46. и 47., респективно.



Слика 46. Одзиви сензорских система на квадратне и троугаоне импулсе протока воде: $Q_s(t)$ - ултразвучни систем и $Q_t(t)$ сензорски систем В на бази одвођења топлоте.



Слика 47. Одзиви сензорских система на квадратне импулсе протока воде различитог интензитета и размака: $Q_s(t)$ ултразвучни систем и $Q_t(t)$ сензорски систем В (на бази одвођења топлоте).

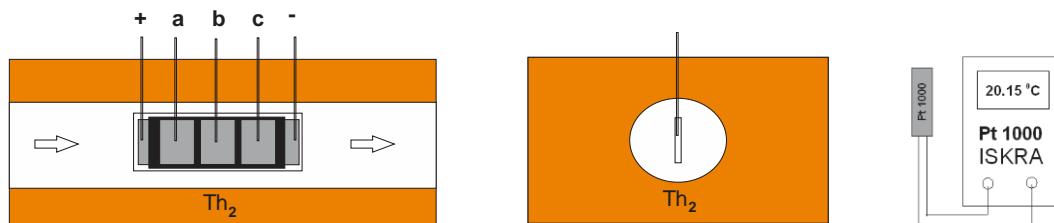
На слици 46. при успостави протока настаје прелазно стање укључења на предњој ивици одзива, док при престанку протока настаје прелазно стање искључења на задњој ивици одзива (a, b, c). Оба стања се могу објаснити променом температуре термистора што је приказано у дискусији у одељку 9.2. На слици 47. уочавају се различите деформације $Q_t(t)$ одзива које настају услед кашњења предње или задње ивице импулса и спајање одзива (e, f, g) услед непостајања временског размака између њих. Анализа мерења, моделовање и анализа несигурности мерења дати су у глави 9.

8. СЕНЗОРСКИ СИСТЕМ ЗА МЕРЕЊЕ БРЗИНЕ ВЕТРА

Сензорски систем за мерење брзине ветра на бази одвођења топлоте као сензорске елементе користи исте сегментиране термисторе са редукованим димензијама као код мерења протока воде (глава 7.). Сегментирани термистори су штампани термисторском пастом $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$: њихова конструкција, димензије и електричне карактеристике су већ приказани у глави 7 у одељцима 7.1. и 7.2. Прво ће бити приказана грађа једноосног сензорског система, а затим троосног сензорског система за мерење брзине ветра који су скраћено названи сензорски системи С и D, респективно. Најпре је развијен јеноосни сензорски систем С помоћу којег је вршена оптимизација радне тачке ситема а затим троосни сензорски систем D који мери брзину ветра у простору (по осама X, Y, Z, - интензитет брзине, правац, смер и углове према осама). Оба система раде у циклусима (уштеда напајања) и мери се само брзина стационарног струјања ветра. Сензорски системи за мерење брзине ветра С и D су реализовани као део истраживања на пројекту примене нових материјала и сензорских компонети у пољопривреди и индустрији.

8.1. Конструкција једноосног сензорског система С

Сензорски систем са дебелослојним сегментираним термисторима за мерење брзине ветра и радом у циклусима (уштеда напајања) приказан је на слици 48. Систем се састоји од два сензорска елемента типа сегментираног термистора. Први сегментирани термистор Th_1 је био намењен да ради као хладни термистор тј. да мери температуру ваздуха T поред мерног места помоћу промене сопствене отпорности $R(T)$. Термистор Th_1 је касније замењен платинским термометром Pt 1000 због боље тачности. Други термистор Th_2 налази се у цилиндричном ваздушном каналу од термоизолационог материјала (дрво) има две улоге: самозагрева се у циклусима помоћу једносмерне струје I (при константном напону U) и мери брзину ветра на бази одвођења топлоте.

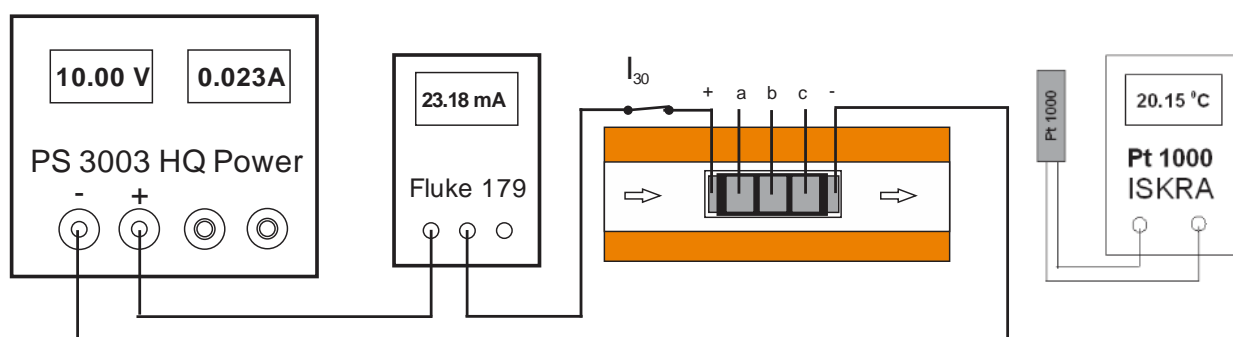


Слика 48. Конструкција једноосног сензорског система С за мерење брзине ветра: подужни пресек ваздушног канала (лево) и попречни пресек ваздушног канала (десно). Th_2 - сегментирани термистор. Електроде за напајање су $+$, $-$ а унутрашње електроде су означене са a , b , c . Pt 1000 је платински термометар за мерење температуре ваздуха T . Димензије сегментираног термистора су: $25,4\text{ mm} \times 6,35\text{ mm} \times 0,5\text{ mm}$, а димензије кућишта: $100\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 50\text{ mm}$.

Излаз овог сензора је струја самозагревања I која се мења у функцији од брзине ветра v . Платински термометар Pt 1000 који мери температуру ваздуха је независан и налази се ван ваздушног канала у коме је смештен Th_2 . Термистор Th_2 је изолован слојем VF лака ради заштите од влаге из ваздуха. За мерење температуре ваздуха T коришћен је платински термометар Pt 1000, Iskra, који има резолуцију $0,01\text{ }^\circ\text{C}$ и несигурност мерења $\pm 0,025\text{ }^\circ\text{C}$. Термометар има стабилно дигитално показивање и због термалне инерције сонде са металним оклопом треба му неколико минута да постигне температуру околине. Због тога у свим мерењима надаље примењиван је само платински термометар Pt 1000, јер има већу тачност, стабилност и нижи шум.

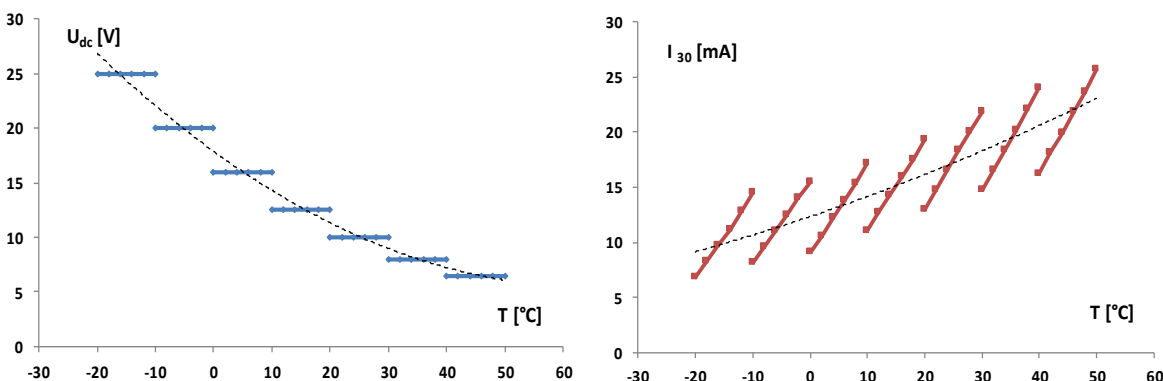
8.2. Радна тачка сензорског система С

Принцип рада једносног сензорског система С за мерење брзине ветра је сличан сензорском ситему А за мерење протока воде. Блок шема сензорског система С је приказана на слици 49. Термистор Th_2 се загрева сопственом струјом I_{30} (током 30 s) при константном напону напајања U_{dc} а истовремено се хлади струјањем ваздуха (ветар). У тридесетој секунди мери се струја термистора I_{30} , а затим се напајање прекида наредних 90 s да се термистор охлади до температуре ваздуха T тј. да се врати у почетно стање. Температура ваздуха T је у свим наредним мерењима узимана као параметар.



Слика 49. Принцип рада сензорског система С за мерење брзине ветра: PS 3003 - извор једносмерног напона, Fluke 179 мултиметар мери I_{30} , Th_2 - термистор који се самозагрева у циклусима (30 s / 90 s), стрелица показује правац струјања ваздуха у каналу. Pt 1000 - платински термометар за мерење температуре ваздуха T .

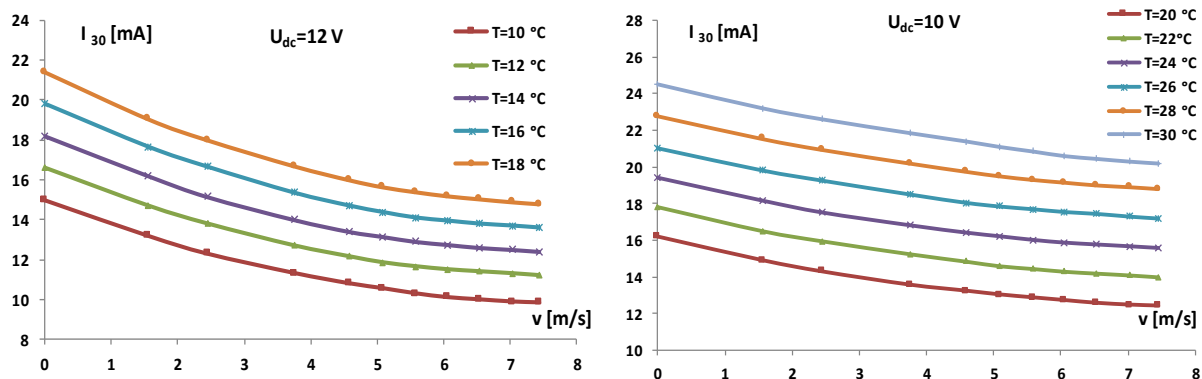
Мерни опсег једносног сензорског система С је подељен у 6 подопсега температуре ваздуха T по $10\text{ }^\circ\text{C}$. За сваки подопсег од $10\text{ }^\circ\text{C}$ одређен је константан напон напајања U_{dc} при којем се термистор Th_2 самозагрева до 30 s тако да разлика максималне и минималне струје самозагревања унутар подопсега $I_{30max} - I_{30min}$ буде око 8 mA до 10 mA. Промена напона U_{dc} по подопсезима и померање статичке радне тачке I_{30} (при $v=0$) у функцији од температуре ваздуха T приказани су на слици 50.



Слика 50. Статичка радна тачка сензорског система С: напон напајања U_{dc} термистора Th_2 и струја термистора I_{30} у функцији од температуре ваздуха T . Брзина ветра $v=0$. Испрекидана линија показује тренд промене напона U_{dc} и струје I_{30} .

8.3. Одзив једноосног сензорског система С

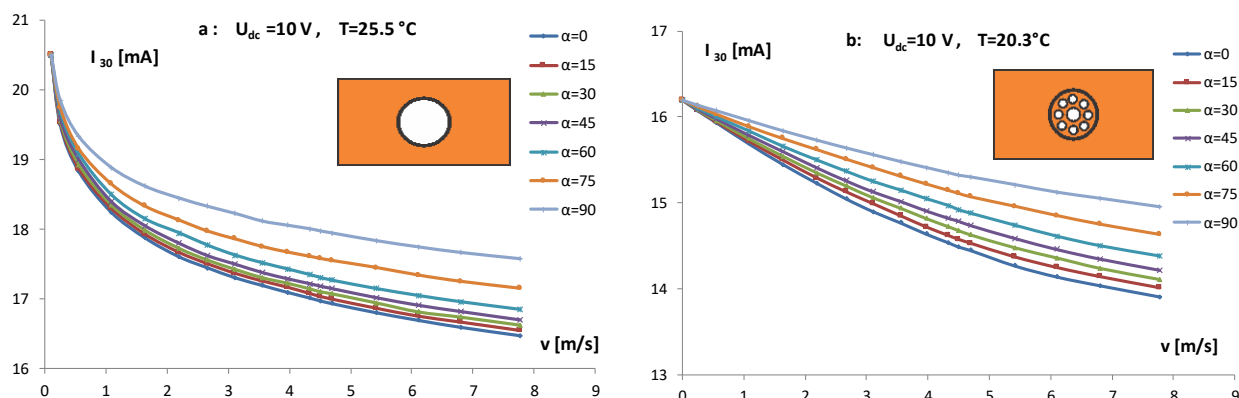
Струја самозагревања I_{30} у изабраном опсегу температуре ваздуха зависи од константног напона напајања U_{dc} и температуре ваздуха T као параметра. Температура ваздуха T мењана је у клима комори на сваких $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Струјање ваздуха тј. брзину ветра давао је мали вентилатор са колиматором (цев дужине 30 cm) који је унет у клима комору, док је брзина окретања вентилатора мењана помоћу варијака од 60 Vac до 220 Vac . Брзина ветра мерена је помоћу дигиталног анемометра са пропелером EA 3010 Techno-line који мери у опсегу $0,2\text{ m/s}$ - 30 m/s на излазу из колиматора. На тај начин мерене су криве одзива струје I_{30} у функцији од брзине ветра v и температуре ваздуха T као параметра као на слици 51.



Слика 51. Струја термистора I_{30} сензорског система С у функцији брзине ветра за подопсеге температуре ваздуха T од $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (лево) и од $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (десно). T -температура ваздуха као параметар, U_{dc} -напон напајања термистора, [100].

Резултати мерења одзива дати су на слици 51. за два узастопна мерна подопсега: од 10 °С до 20 °С и од 20 °С до 30 °С. Правац струјања ветра је колинеаран са главном осом канала у коме се налази термистор Th_2 . Криве на слици 51. су главне калибрационе криве струје самозагревања термистора у функцији од брзине ветра $I_{30}(v)$. Помоћне криве калибрације могу се интерполисати еквидистантно на сваких 0,1 °С температуре ваздуха коришћењем аналитичког облика кривих који се може одредити фитовањем.

Уколико правац струјања ветра са главном осом канала у коме се налази термистор Th_2 заклапа неки угао α одзив једноосног сензорског система S се мења у функцији од брзине ветра v и угла α као $I_{30}(v, \alpha)$. За константну температуру ваздуха T и напон напајања термистора U_{dc} угао ветра према главној оси α мењан је у корацима од 15°. На слици 52. приказан је одзив $I_{30}(v, \alpha)$ за потпуно отворен ваздушни канал и за канал са редуктором протока ваздуха (однос 4 : 1). Цилиндрични редуктор протока ваздуха дужине 18 mm покрива ваздушни канал пречника 20 mm и има централни отвор пречника 6 mm и још 8 периферијских отвора пречника 3 mm.

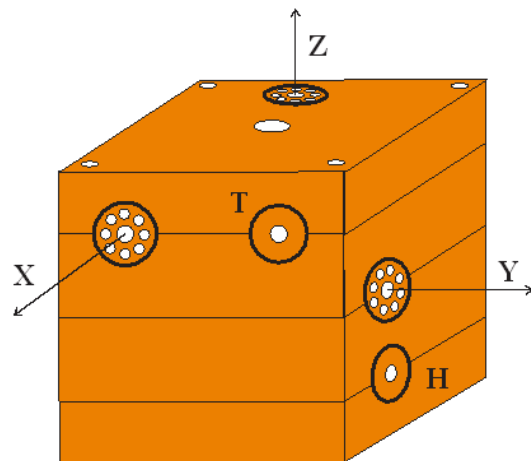


Слика 52. Промена струје термистора I_{30} у функцији од брзине ветра v и угла α : а- одзив са отвореним ваздушним каналом (лево) и б-одзив са редуктором протока ваздуха (однос 4 : 1) (десно). U_{dc} - напон напајања термистора, T - температура ваздуха као параметар, [100].

Користећи редуктор протока ваздуха (однос 4 : 1) као на слици 52. (десно) термистор се слабије хлади па се могу мерити неколико пута веће брзине ветра. Када је угао α мали термистор се услед већег струјања ваздуха боље хлади, а струја термистора $I_{30}(v, \alpha)$ је нижа. Насупрот томе кад је α прав угао струјање ваздуха кроз канал је нула, али има размене топлоте са ваздухом који струји у равни кружног отвора са обе стране канала па се термистор знатно мање хлади. Уколико се улаз и излаз ваздушног канала затворе чеповима од плуте тада је струја термистора $I_{30}(v, \alpha)$ хоризонтална права линија тј. константа. Зависност одзива од угла и брзине ветра $I_{30}(v, \alpha)$ као и несигурност мерења биће више анализирани у дискусији.

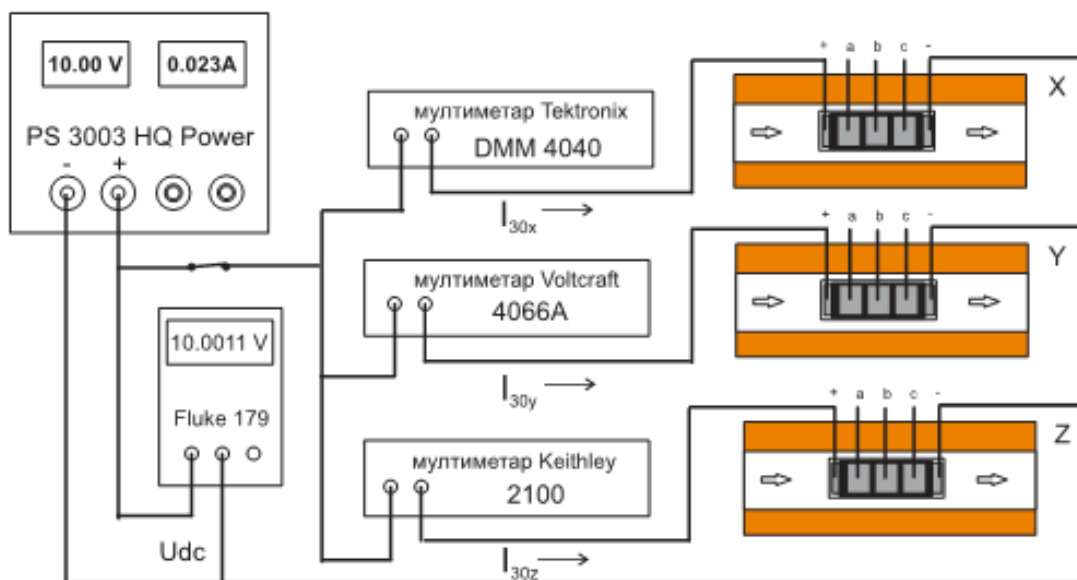
8.4. Конструкција троосног сензорског система D

Користећи искуства са једноосним сензорским системом С за мерење брзине ветра реализован је троосни сензорски систем D за мерење брзине ветра који има такође кућиште од термоизолационог материјала (дрво) и три ваздушна канала постављена дуж X, Y, Z - оса правоуглог координантног система. Осе X и Y су оријентисане у правцу север-југ односно исток-запад, респективно (помоћу компаса), док је Z-оса постављена вертикално у односу на тло (помоћу либеле). Конструкција троосног сензорског система приказана је на слици 53. Ваздушни канали пречника 20 mm су такође обележени по осам са X, Y, Z и на њих су постављени редуктори протока ваздуха (4 : 1) као код једноосног система за мерење брзине ветра. У каналу T налази се платински отпорник Pt 1000, Iskra, који мери температуру ваздуха T. Канал H је предвиђен за кондензаторни сензор влаге HDC 2080 EVM (димезије сензора су 15 mm x 6.35 mm x 37 mm, и има USB-прикључак), Texas Instruments, RH-опсег влаге од 20 до 80 [%] и несигурност мерења 2 %.



Слика 53. Троосни сензорски систем D за мерење брзине ветра: сензорски систем (лево) и усмеравање канала дуж оса X, Y, Z (десно). Ваздушни канали X, Y, Z- пречника 20 mm са редукторима протока ваздуха (4 : 1), T- канал за термометар Pt 1000, H -канал за сензор влаге. Димензије кућишта: 100 mm x 100 mm x 100 mm [101].

У ваздушним каналима X, Y, Z аксијално су постављени сегментирани термистори који се самогревају при константном напону U_{dc} а чија се номинална отпорност R_0 на собној температури разликује за мање од 0,1% (термистори селектовани из серије). Струје термистора I_{30} мерене су помоћу три мултиметра велике прецизности: DMM4040 Tektroniks, Voltcraft 4660A и Keithley 2100 који држе вредност максимума струје I_{30} после прекида напајања у тридесетој секунди (hold max, 6 + 1/2 цифара). Одговарајући напон напајања U_{dc} подешен је на извору једносмерног напона PS 3003 HQ Power™ на две децимале и мерен је помоћу мултиметра Fluke 179. Блок шема мерења троосног сензорског система D приказана је на слици 54.



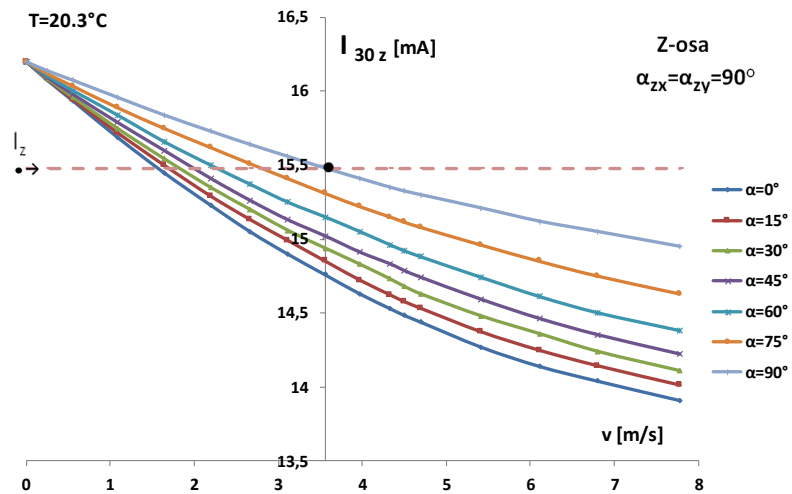
Слика 54. Блок шема мерења брзине ветра помоћу троосног сензорског система D: X, Y, Z - ваздушни канали са сегментираним термисторима, PS 3003 - једносмерно напајање, мултиметри мере струје термистора I_{30x} , I_{30y} , I_{30z} и напон напајања U_{dc} . Стрелицама је обележено струјање ваздуха у каналима са сегментираним термисторима.

8.5. Одзив троосног сензорског система D на хоризонталном терену

У лабораторијским условима хоризонтално струјање ваздуха давао је вентилатор са радним колом пречника 380 mm чија је брзина ротације мењана помоћу варијака од 80 Vac до 250 Vac. Вентилатор и кућиште сензорског система били су у истој оси на растојању од 0,8 m а на истој висини од пода (1,20 m). Брзина ветра мерена је на месту кућишта троосног сензорског система D дигиталним анемометром са пропелером EA 3010 Techno-line. У овом случају тј. за тло без нагиба ваздух струји само у хоризонталној X-Y равни ($v_z=0$), а углови између правца ветра и Z осе су $\alpha_{xz}=\alpha_{yz}=90^\circ$. Тада се за мале брзине ветра (мерење без редуктора) најпре измери струја Z термистора $I_{30z}=15,5$ mA (на пример) и повуче испрекидана хоризонтална линија на сноп кривих $I_{30z}(v,\alpha)$. Испрекидана хоризонтална права сече криву из снопа $I_{30z}(v,\alpha)$ чији је параметар $\alpha_z=90^\circ$ (правац ветра нормалан на осу канала Z) у тачки која је обележена знаком ● на дијаграму. Кад се кроз ту тачку спусти вертикална помоћна оса чита се вредност $v=3,55$ m/s као слици 55.

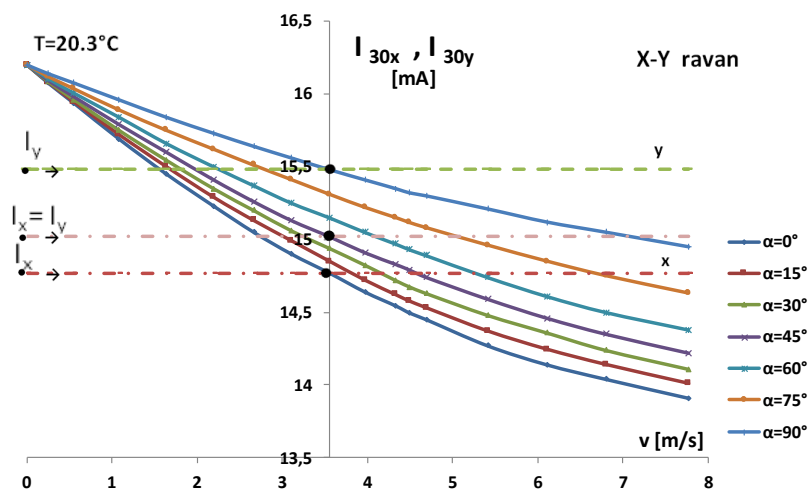
Ова вредност претставља интензитет вектора брзине ветра v , а потребно је одредити и углове између правца струјања ветра и оса X и Y да би имали све три компоненте вектора брзине ветра v (v_x, v_y, v_z).

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



Слика 55. Троосни сензорски систем D на равном терену: измерена струја $I_z = 15,5$ mA сече калибрациону криву $\alpha_z = 90^\circ$, интензитет брзине ветра очитава се на хоризонталној оси: $v = 3,55$ m/s. Температура ваздуха као параметар $T = 20,3$ °C, напон напајања $U_{dc} = 10$ V.

На слици 55. одређена је вредност интензитета брзине ветра v , а потребно је одредити још два угла тог вектора. Пошто су канали практично идентични калибрационе криве морају бити приближно идентичне, односно: $I_{30x}(v, \alpha) = I_{30y}(v, \alpha) = I_{30z}(v, \alpha)$. У равни X-Y углови између оса X и Y и правца брзине ветра могу бити α_x и α_y , стим што је $\alpha_x = 90^\circ - \alpha_y$ што олакшава одређивање углова као на слици 56.



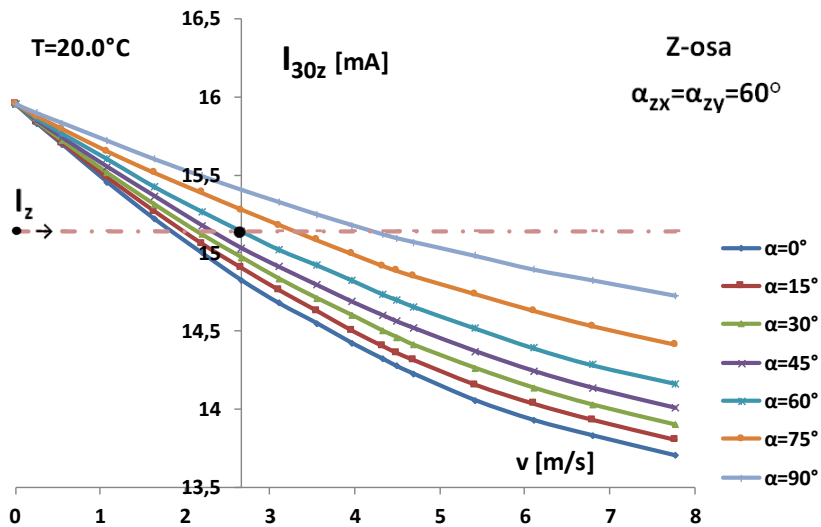
Слика 56. Троосни сензорски систем D на равном терену: измерене струје I_x и I_y секу калибрационе криву $I_{30}(v, \alpha)$ за брзину ветра на хоризонталној оси $v = 3,55$ m/s и одређују α_x и α_y . Температура ваздуха као параметар $T = 20,3$ °C, напон напајања $U_{dc} = 10$ V.

Најпре се постави вертикална оса у тачки $v=3,55 \text{ m/s}$ на калибрационе криве као на слици 56., а затим се повуку две хоризонталне испрекидане линије за измерене струје $I_x=14,78 \text{ mA}$ и $I_y=15,51 \text{ mA}$. Ове струје секу сноп мерених калибрационих кривих $I_{30x,y}(v,\alpha)$ у две тачке обележене са $\bullet I_x$ и $\bullet I_y$. Са слике 56 произилази да је $\alpha_x=0^\circ$ и $\alpha_y=90^\circ$. Уколико су струје термистора једнаке $I_x = I_y = 15 \text{ mA}$, одатле произилази $\alpha_x = \alpha_y = 45^\circ$. На исти начин се одређују и углови $\alpha_x=90^\circ - \alpha_y$ за друге струје где је $I_x \neq I_y$.

Када је познат интензитет вектора брзине ветра v и углови α_x , α_y и α_z тада компоненте вектора брзине ветра $v(v_x, v_y, v_z)$ износе $(v \cdot \cos \alpha_x, v \cdot \cos \alpha_y, v \cdot \cos \alpha_z)$, респективно.

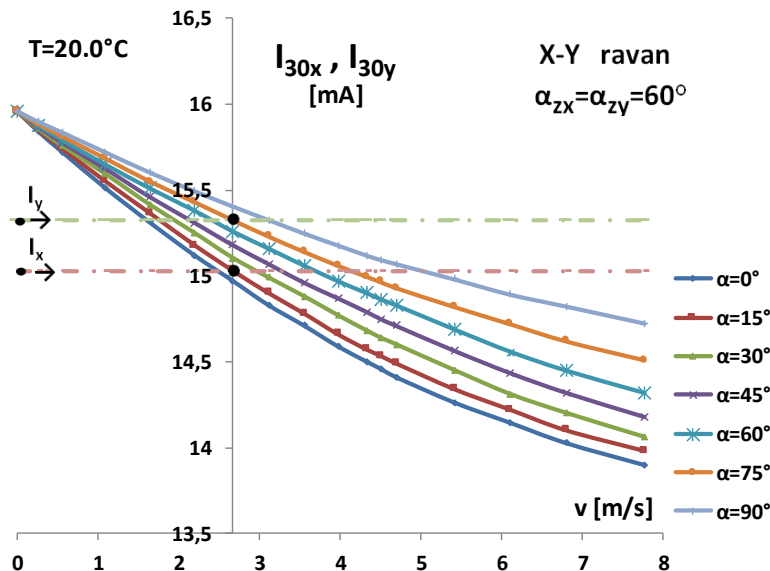
8.6. Одзив троосног сензорског система D на нагибном терену

У лабораторијским условима обично нема нагиба тла као на природним теренима па је мерење под нагибом могуће уколико се оса вентилатора који покреће струјање ваздуха подеси на тражени нагиб. Уколико троосни сензорски систем D треба да мери брзину ветра на нагибном терену тј. на косини према хоризонталној равни од 30° за исти угао треба подесити осу вентилатора (помоћу угломера) а тада су у односу на Z - осу углови $\alpha_{zx}=\alpha_{zy}=60^\circ$. За мерену струју I_z повуче се хоризонтална испрекидана линија на криве калибрације и за угао $\alpha_z=60^\circ$ степени добија се тачка пресека, а затим се слично као у претходном случају у одељку 8.5. из тачке пресека спусти нова ордината и одреди интензитет брзине ветра $v=2,66 \text{ m/s}$, као на слици 57.



Слика 57. Троосни сензорски систем D на нагибном терену од 30° према хоризонталној равни: измерена струја $I_z=15.17 \text{ mA}$ сече калибрациону криву $\alpha_z=60^\circ$, брзина ветра на хоризонталној оси је $v=2,66 \text{ m/s}$. Температура ваздуха као параметар $T=20,0 \text{ }^\circ\text{C}$, напон напајања $U_{dc}=10 \text{ V}$.

Сличним поступком као у претходном одељку 8.5. одређени су углови брзине ветра према X-Y осама у хоризонталној равни како је приказано на слици 58.



Слика 58. Троосни сензорски систем D на нагибном терену од 30° према хоризонталној равни: измерене струје I_x и I_y секу калибрационе криве I_{30x} , I_{30y} (v, α) за брзину ветра на хоризонталној оси $v=2,66$ m/s и одређују углове α_x и α_y . Температура ваздуха као параметар $T=20,3^\circ\text{C}$, напон напајања $U_{dc}=10$ V.

После одређивања интензитета брзине ветра $v=2,66$ m/s треба одредити и углове вектора у нагибној равни и у X-Y равни. Како је нагибна раван према хоризонталној X-Y равни под углом од 30° (према Z-оси $\alpha_{zx}=\alpha_{zy}=60^\circ$) онда су пројекције вектора брзине на нагибну раван и хоризонталну X-Y раван различитог интензитета, а углови за обе пројекције вектора који леже и у нагибној и у хоризонталној равни према Z-X и Z-Y равнима су исти. То омогућава да мерењем у хоризонталној равни добијемо тражене углове. За вентилатор у истом положају (са осом под углом од 30°) снимљене су поново струје термистора I_{30x} , I_{30y} у функцији од брзине ветра као нове калибрационе криве у X-Y равни као на слици 58. После тога на основу мерења струја термистора I_x и I_y и снопа кривих на слици 58. одређени су углови $\alpha_x=15^\circ$, $\alpha_y=75^\circ$, сличним поступком као у претходном одељку тј. као на слици 56.

Криве калибрације не разликују се по облику од претходних већ само по интензитету, услед утицаја нагиба на струјање ветра. Мерења брзине ветра не треба вршити на висинама мањим од 2 m од тла ако се то изричито не тражи. На већим висинама струјање ваздуха све мање зависи од конфигурације терена. Несигурност мерења и моделовање једноосног сензорског система С биће приказани у Глави 9., одељак 9.3. у дискусији. У случају нагиба терена вектор брзине ветра је одређен ако је одређен интензитет вектора брзине ветра v и углови α_x , α_y и α_z . Тада компоненте вектора брзине v (v_x, v_y, v_z) износе ($v \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos \alpha_x$, $v \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos \alpha_y$, $v \cdot \cos 60^\circ$), респективно, чиме је вектор брзине ветра потпуно одређен у X-Y-Z простору.

9. АНАЛИЗА И ДИСКУСИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Анализа и дискусија добијених резултата има три саставна дела који се односе на три различита сензорска система који су предмет дисертације: 9.1. термисторски низ за мерење температуре тла, 9.2. термисторски системи за мерење протока воде и 9.3. термисторски системи за мерење брзине ветра. У овој глави анализирају се и дискутују резултати и моделују појаве на сензорским системима. Део примарне анализе и дискусије мерених резултата већ је дат у главама 6., 7. и 8.

9.1. Анализа мерења температуре тла помоћу термисторског низа

У глави 6 приказана је конструкција термисторског низа, једнодневни температурни профили тла (обрадиве земље) и изабрани месечни профили температуре земље по дубини и промене температуре ваздуха за одређене месеце. Температурни профили земље мерени су у 2016./2017. године повремено, а у 2018. години сваког дана у 7.00 и 14.00 часова помоћу GST-1 (термисторског низа) до дубине од 550 mm у 40 мерних тачака. Дискутована је корелација (веза) између промене температуре у ваздуху и јутарњих и поподневних температурних профила земље мерених у 7.00 и 14.00 часова, респективно.

9.1.1. Анализа мерења температуре

Поступак мерења температуре је описан у одељку 6.2.1. једначином (7). Код термисторског низа мерењем отпорности термистора по сегментима R_{xi} ($i=1....40$) и коришћењем Steinhart-Hart једначине добија се температура T_{xi} у мерној тачки као:

$$T_{xi} = B \cdot T_0 / [B + T_0 \cdot \ln(\frac{R_{xi}}{R_0})] \quad (i=1.....40) \quad \dots\dots\dots (19),$$

где је T_0 апсолутна температура (273.16 K), а B је експоненцијални фактор који се добија мерењем отпорности R_1 на температури T_1 и R_2 на температури T_2 (на пример на температурама 283 K и 303 K, респективно). Користећи мерења $R(T)$ на слици 25, експоненцијални фактор је одређен као $B=3863$ K, при чему је $R_0=7215 \Omega$.

При томе несигурност одређивања температуре T_x зависи од несигурности мерења отпорности Δ_R (дигиталним мултиметром), несигурности одређивања експоненцијалног фактора Δ_B и апроксимације Steinhart-Hart једначине на први члан Δ_{SH} .

Несигурност мерења отпорности сегмената на термистору $\Delta_R=\Delta R/R$ (дигиталним мултиметром) у опсегу од 1 k Ω до 3 k Ω износи мање од 0,1 % (Fluke 179), тј. 1 Ω / 1 k Ω рачунајући ту и контакте и мерне каблове (0,3 Ω).

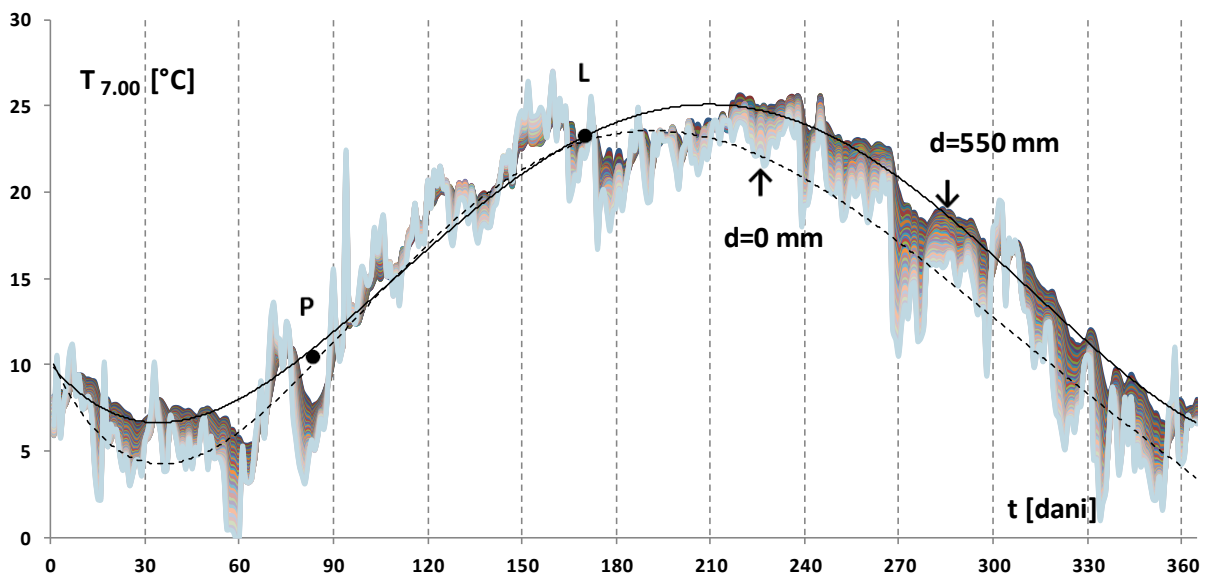
Несигурност у одређивању експоненцијалног фактора B је: $\Delta_B = \Delta B/B = 2\Delta R/R + 2\Delta T/T$. Како је несигурност мерења температуре у клима комори са платинским отпорником Pt 1000 на пример $25 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / 20 \text{ }^\circ\text{C}$ а $\Delta R/R$ реда 0,1 %, укупна несигурност у одређивању Δ_B је око 0,2 %. Несигурност рачунања Δ_{SH} при апроксимацији Steinhart-Hart једначине на први члан је мања од 0,1 %, па је укупна несигурност мерења температуре T_{xi} термисторским низом Δ_T дата сумом несигурности мерења:

$$\Delta_T = \Delta_R + \Delta_B + \Delta_{SH} \quad \dots \dots \dots (20).$$

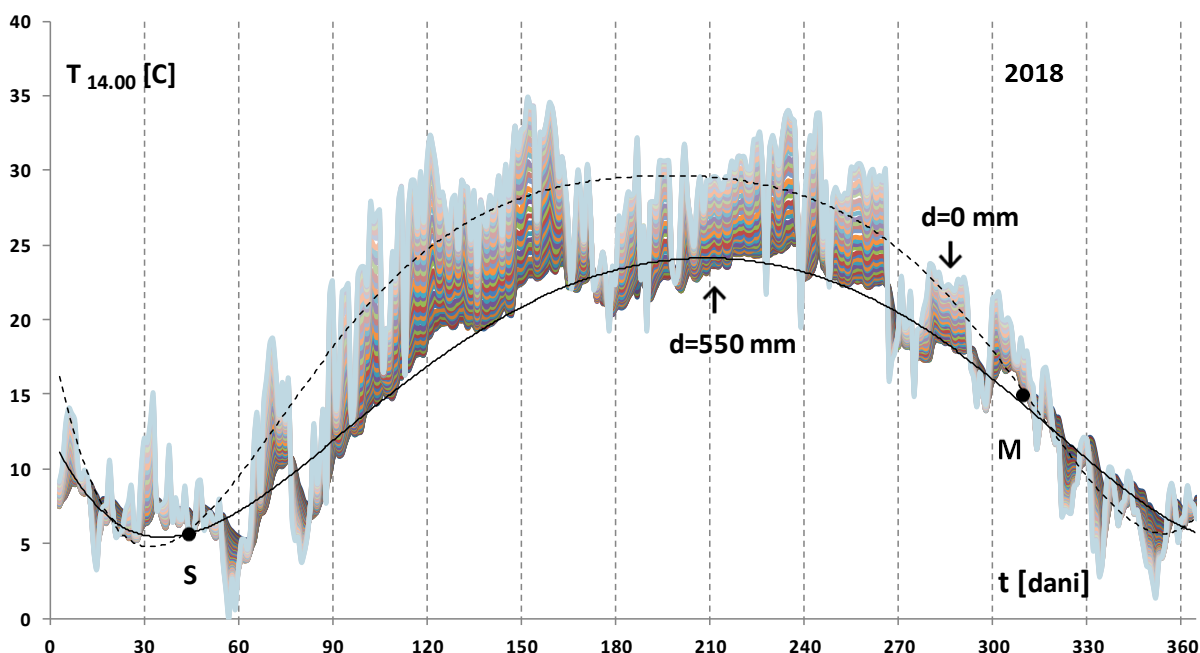
Укупна несигурност мерења температуре T је реда 0,4 % што за $20 \text{ }^\circ\text{C}$ износи $0,08 \text{ }^\circ\text{C}$. За цео опсег мерења температуре тла од $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $30 \text{ }^\circ\text{C}$ несигурност мерења је мања од $0,15 \text{ }^\circ\text{C}$, што је сасвим довољно за ову врсту мерења.

9.1.2. Годишњи температурни профили

Спајањем месечних профила за температуру тла (горњег слоја земље) добијају се годишњи профили температуре у земљи мерени у 7.00 и 14.00 часова као на сликама 59. и 60.



Слика 59. Годишњи температурни профил тла $T(t)$ мерен помоћу термисторског низа у 7.00 часова: тачка **P**-почетак пролећа (22.03.2018), тачка **L**-почетак лета (22.06.2018). Моделовање $T(t)$ за $d=0 \text{ mm}$ вршено је полиномом $T_0(t) = 10,3 - 0,215 t + 0,003 t^2 - 2 \cdot 10^{-5} t^3 + 2 \cdot 10^{-8} t^4 \text{ } [^\circ\text{C}]$ (испрекидана линија - - -) а за $d=550 \text{ mm}$ полиномом $T_{550}(t) = 0,36 - 0,390 t + 0,007 t^2 - 4 \cdot 10^{-5} t^3 + 9 \cdot 10^{-8} t^4 - 7 \cdot 10^{-11} t^5 \text{ } [^\circ\text{C}]$ (пуна линија).



Слика 60. Годишњи температурни профил тла $T(t)$ мерен помоћу термисторског низа у 14.00 часова: тачка **S** - Срећење (15.02.2018), тачка **M** - Митровдан (8.11.2018). Моделовање $T(t)$ за $d=0$ mm вршено је полиномом $T_0(t) = 19,17 - 1,069 t + 0,025 t^2 - 0,0001 t^3 + 1 \cdot 10^{-6} t^4 - 2 \cdot 10^{-9} t^5 + 2 \cdot 10^{-12} t^6$ [°C] (испрекидана линија - - - -) а за $d=550$ mm полиномом $T_{550}(t) = 12,39 - 0,453 t + 0,009 t^2 - 7 \cdot 10^{-5} t^3 + 3 \cdot 10^{-7} t^4 - 5 \cdot 10^{-10} t^5 + 4 \cdot 10^{-13} t^6$ [°C] (пуна линија).

На годишњем температурном профилу земље мереном у 7.00 часова (слика 59.) испрекидана и пуна линија (обе моделоване полиномом) се секу приближно у тачкама **P** (22.03.2018) и **L** (22.06.2018). Померање пресека испрекидане и пуне линије настало је захваљујућем крајем фебруара и средином марта. Да почетком 2018. године није каснило отопљавање, испрекидана крива би се подигла и пресекла пуну линију у тачки **P**. У снопу кривих светлија линија ($d=0$ mm) у температурном профилу налази се изнад тамне линије на дну профила ($d=550$ mm) управо у периоду **PL**, док после тачке **L** температурни профил (цео сноп) бива инвертован све до краја године. Разлог за то је промена градијента температуре по дубини $dT/dz > 0$ (ван интервала **PL**). Ван интервала **PL** рано ујутру земља је у дубини топлија него ваздух на граници земља / ваздух. Све до краја фебруара земља се у дубини на $d=550$ mm хладила до око 6 °C, а затим се градијент температуре окренуо, тј. постало је $dT/dz < 0$, и до тачке **L** температура у дубини на $d=550$ mm је нарасла на 24 °C. Јунско - јулске кише су јутарњи температурни профил учиниле конкавним, снизиле температуру неколико степени и преокренуле градијент јутарњег профила температуре у земљи на $dT/dz > 0$. До 28. августа температура на $d=550$ mm дубини се поново вратила на 25 °C, а затим је лагано опадала до краја године.

На годишњем температурном профилу земље мереном у 14.00 часова на слици 60. испрекидана и пуна линија (обе моделоване полиномом 6-тог реда) секу се приближно у тачкама **S** (15.02.2018) и **M** (8.11.2018). Минимуми температура на годишњем профилу

постигнути су крајем фебруара, зима се продужила две недеље после таче S, а исто тако се лепо време продужило једну недељу после тачке M. Градијент температуре у земљи у периоду SM је био $dT/dz < 0$, што значи да је температура у 14.00 на површини земље $d=0$ mm била знатно већа него температура на дубини $d=550$ mm. У периоду од тачке M (2018) до краја године поподневни профил температуре земље мерен у 14.00 часова већим делом је инвертован. Почетак 2018. (јануар и фебруар 2018. до тачке S) је био топлији од просека, а снег је пао после тачке S тј. крајем фебруара. Минимална температура на површини земље је тада била -3 °C, а у земљи на дубини $d=550$ mm око 6 °C. У периоду почетком јуна 2018. минимална и максимална температура тла су биле 24 °C и 34 °C, за дубине $d=550$ mm и $d=0$ mm, респективно. После тога јунско-јулске кише су снизиле максимум за поподневни температурни профил на само 22 °C (крај јуна) и формирале седло или чвор на снопу кривих. Облик снопа је постао конкаван за период од средине јуна до краја августа, када је температура на површини земље поново достигла 34 °C а на дубини $d=550$ mm око 24 °C.

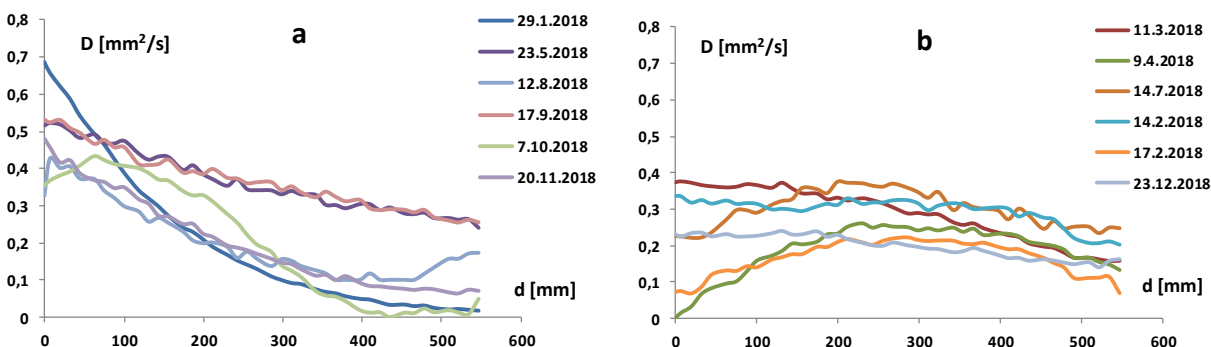
Из приказаног годишњег температурног профила (слика 59. и 60.) као и из месечних и дневних профила приказаних у глави 6 произилази јака корелација између промена температуре у атмосфери и горњем слоју земље. Постоји и јак утицај појава као што су падавине, ветар и облачно време на температурни профил у земљи. Моделовање температура земље на годишњем нивоу T_0 и T_{550} помоћу полинома дало је глатке криве, међутим вредности температуре у земљи нису савршено цикличне, а постоје и бројне релаксације и седла (чворови) што мења распоред кривих у снопу. За месечне циклусе треба користити софтвер за препознавање облика температурног профила по краћим периодима да би се предвиђао даљи ток промене температуре у земљи.

9.1.3. Температурни профили и топлотна дифузивност

Облик температурног профила са дубином и висином и његов градијент dT/dz зависе од састава, структуре и влаге земљишта. Обрадиво тло је мешавина глине, песка, хумуса, воде и ваздуха. Топлотне проводности ових материјала утичу на температурни профил $T(z)$, градијент dT/dz и топлотну дифузивност $D(z)$. Нагиб земљишта и његова структура (поре, шупљине, хомогеност) такође утичу на температурни профил по дубини. Земља која се стално обрађује је порозна, упија лако воду услед кише до дубине ораћа, док земља која се не оре има врло мало шупљина и вода услед кише се спорије упија или отиче услед нагиба. Топлотна проводност је значајна за пренос топлоте кроз материјал. Кроз слој земље се топлота преноси вертикално, а градијент температуре је dT/dz , како је напред описано на температурним профилима.

Према напред датом појму топлотне дифузивности у одељку 5.4.2. једначина (16) и табели 9. топлотна дифузивност D зависи од састава, структуре земље и садржаја воде у земљи по дубини d тј. у правцу z . Месечни температурни профили $T(t)$ где је t дато у данима (снопови кривих на сликама 31.-36.) дају први извод dT/dt , а једнодневни температурни профили земље по дубини d дају други извод d^2T/dz^2 . Топлотна дифузивност D је количник ова два извода $(dT/dt)/(d^2T/dz^2)$. Израчунавање топлотне дифузивности D подразумева да је dT/dt различито од 0 или вредности блиских нули, јер су ретка два узастопна дана када је

температурни профил у земљи исти. Осим тога d^2T/dz^2 не сме бити 0 или имати мале вредности блиске нули, а то настаје када је дневни температурни профил мерен у 14.00 часова права линија тј. када је дошло до инверзије температура, релаксације или чвора на снопу кривих. Киша или снег промени градијент профила у земљи на $dT/dz > 0$ као на слици 30.c и 30.d у глави 6., одељак 4. Осим тога јутарњи температурни профили мерени у 7.00 часова су већим делом године инвертовани као што је напред описано. На слици 61. на пример дати су дијаграми топлотне дифузивности $|D(z)|$ израчунати за неколико изабраних дана у години кад су $dT/dt \neq 0$ и $d^2T/dz^2 \neq 0$.



Слика 61. Топлотна дифузивност D у функцији од дубине d за дневне температурне профиле мерене у 14.00 часова у данима кад није било падавина (a) и када је било падавина (b).

Профили топлотне дифузивности D приказани на слици 61. коришћени су за процену садржаја воде у земљи θ методом корелације D и θ .

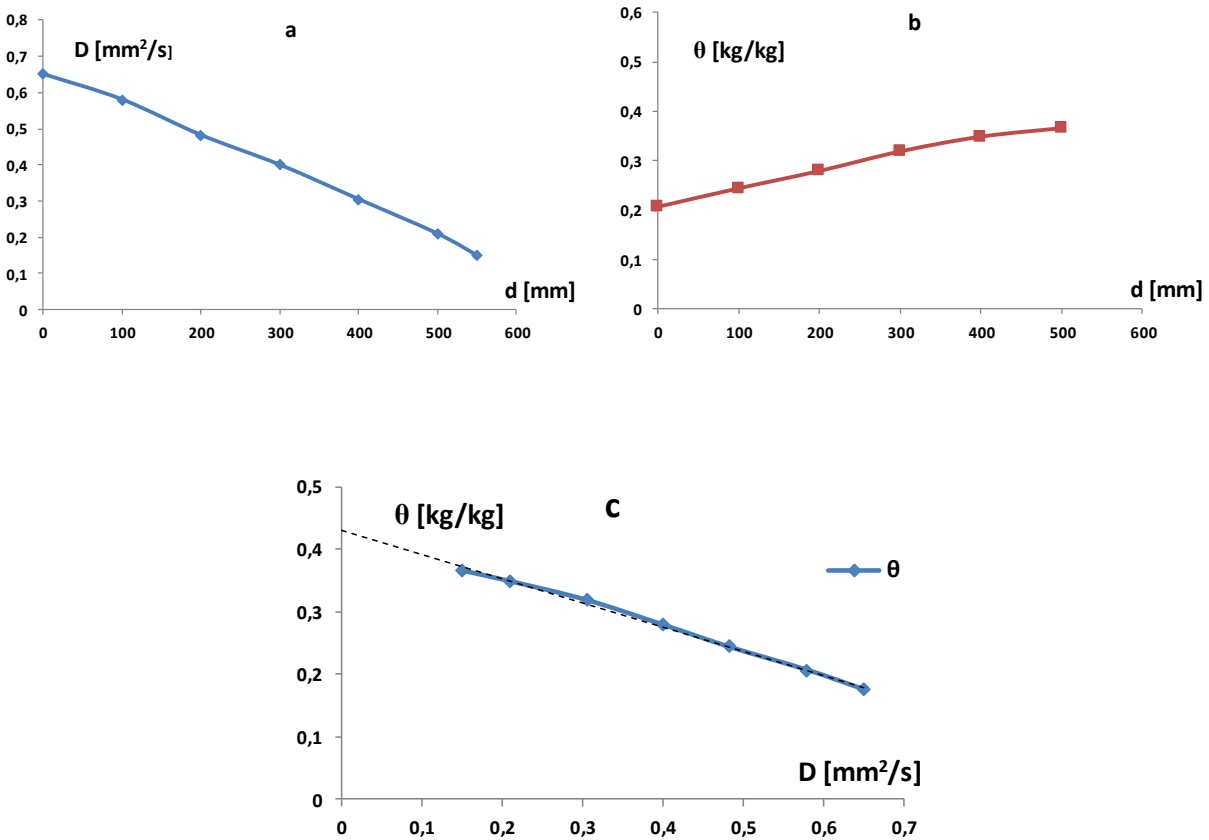
9.1.4. Процена релативног садржаја воде у земљи

Процена релативног садржаја воде у земљи приказана је на слици 62. Она се добија помоћу топлотне дифузивности $|D(z)|$ која је у корелацији са вредностима релативног садржаја воде у земљи θ мереним на сваких 10 cm, на пример.

Релативни садржај воде се одређује мерењем узорка земље са различитих дубина одмах по вађењу из земље (цевастим алатом) а затим после загревања на $200\text{ }^\circ\text{C} / 2$ часа (ради испаравања воде из узорака). Разлика маса Δm пре и после загревања је садржај воде а он се приказује најчешће релативно као $\theta = \Delta m / m$ [kg/kg] (RH-релативна влажност).

Криве топлотне дифузивности $D(d)$ и влаге $\theta(d)$ добијене су у августу 2018. када је земља на површини била доста сува а у дубини влажна (минимум и максимум влаге, респективно) па су затим те две криве стављене у корелацију чиме је добијена зависност $\theta(D)$. Мерење релативног садржаја воде у земљи вршено је на 1m удаљености од мерног места где је постављен термисторски низ GST-1 (неорана земља истог састава).

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



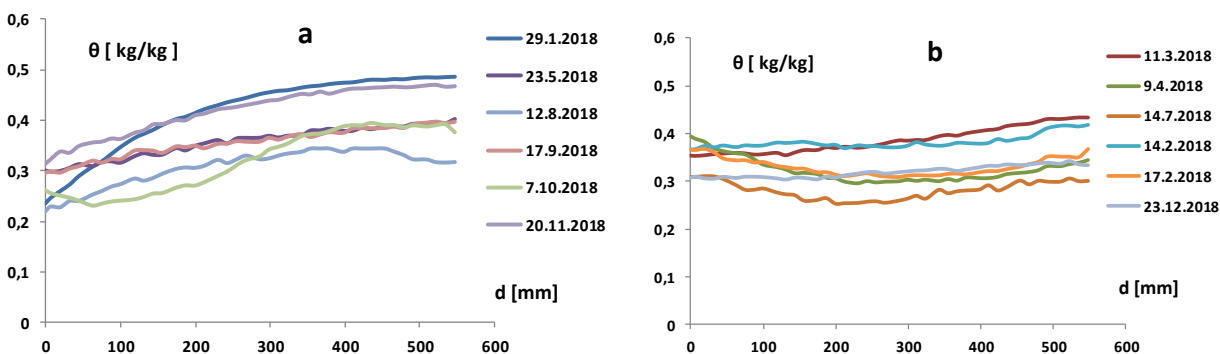
Слика 62. Зависност топлотне дифузивности $D(d)$ и релативног садржаја воде у земљи $\theta(d)$ у функцији од дубине d (слике а и б) и корелација θ и D (слика с). Неорана земља (травњак) по саставу је била претежно глина / иловача са врло мало хумуса.

Крива корелације θ [kg/kg] и D [mm²/s] тј. $\theta(D)$ (на слици 62.с) има приближно облик праве:

$$\theta = -0,386 \cdot D(d) + 0,43 \text{ [kg/kg]} \dots \dots (21).$$

Корелациона права $\theta(D)$ и једначина (21) коришћени су да се за дифузионе профиле $D(d)$ са слике 62. одреди релативни садржај воде у земљи $\theta(d)$, како је и приказано на слици 63.

Несигурност процене релативног садржаја воде у земљи $\Delta\theta$ зависи од несигурности мерења температурног профила $T(t,z)$, рачунања dT/dt и d^2T/dz^2 , као и несигурности корелације $\theta(D)$. У поступку који је напред описан и са апроксимацијама при рачунању процењена несигурност $\Delta\theta$ не прелази 5 %. При томе корелација $\theta(D)$ се мора одређивати локално за свако ново мерно место тј. нови састав и структуру земље.



Слика 63. Релативни садржај воде у земљи θ у функцији од дубине земље d за исте дане и профиле топлотне дифузивности D као на слици 61. а и б.

Температурни профили мерени помоћу термисторског низа GST-1 и релативни садржај воде по дубини су од значаја за клијање, раст и развој биљака са различитом дужином корена које се гаје на отвореном простору, за праћење промене и прогнозу подземних стања и корелацију подземних стања са атмосферском температуром и појавама у атмосфери.

9.2. Анализа мерења протока воде помоћу сензорских система А и В

Сензорски системи А и В на бази одвођења топлоте са два NTC сегментирана термистора (штампана дебелослојно) од којих се један самозагрева а други мери температуру долазне воде описани су детаљно у глави 7. Сензорски систем А ради у штедном режиму напајања у циклусима 30 s самозагревања и 90 s природног хлађења у води и намењен је за мерење само стационарних протока. Сензорски систем В има континуално напајање и користи аквизициону картицу што му омогућава да мери и стационарне и нестационарне протоке. Због тога су њихове карактеристике анализирани и дискутоване понаособ.

9.2.1. Оптимизација радне тачке сензорског система А

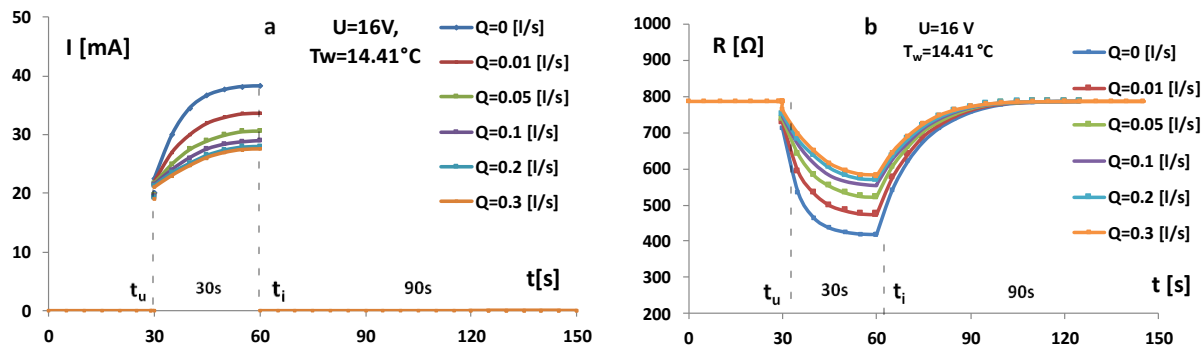
Положај радне тачке сензорског система А у цикличном раду биран је на основу статичких кривих приказаних на слици 40.: одређено је оптимално време самозагревања од $t=30$ s и минималне и максималне струје самозагревања $I_{30\min}$ и $I_{30\max}$ за различите температурне подопсеге ширине по 5 °C. При томе је одређен оптималан константни напон напајања U за сваки подопсег (помоћу UI карактеристике на слици 40.) и на крају је израчуната минимална и максимална снага P_{\min} и P_{\max} , респективно, коју троши термистор који се самозагрева (табела 10.).

Табела 10. Оптимизација радне тачке сензорског система А

подопсези	A-I	A-II	A-III	A-IV	A-V	A-VI	A-VII
T_w воде [°C]	1-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
напон U [V]	24	20	16	13	10	8	6
струја I_{30min} [mA]	25	26	27.5	29	31	33	34
струја I_{30max} [mA]	36	37	39	40	43	45	47
снага P_{min} [W]	0,6	0,52	0,44	0,38	0,31	0,26	0,20
снага P_{max} [W]	0,8	0,74	0,65	0,52	0,43	0,36	0,28

* Резултати су добијени у статичкој води ($Q=0$) [99]

Сензорски систем А за мерење протока воде помера радну тачку променом напона напајања U (у скоковима од 4V, 3 V и 2 V као у табели 10.) а промена струје самозагревања $I_{max}-I_{min}$ је ограничена на око 10 mA у сваком подопсегу температуре долазне воде T_w (A-I до A-VII). Тиме се ограничава кретање радне тачке и обезбеђује приближно иста осетљивост у свим подопсезима. Пошто је предвиђено да систем мери само стационарне протоке у рекама, језерима и на цевима малог пречника (12.7 mm) број подопсега је укупно 7 по 5 °C за сваки подопсег. Период самозагревања / хлађења термистора у току 30 s / 90 s при константном напону U и различитим протоцима воде Q карактерисан је струјом $I(t)$ и отпорношћу $R(t)$ како је приказано на слици 64. Укључење струје самозагревања $I(t)$ почиње у тренутку t_u а престаје у тренутку t_i после чега почиње хлађење термистора.



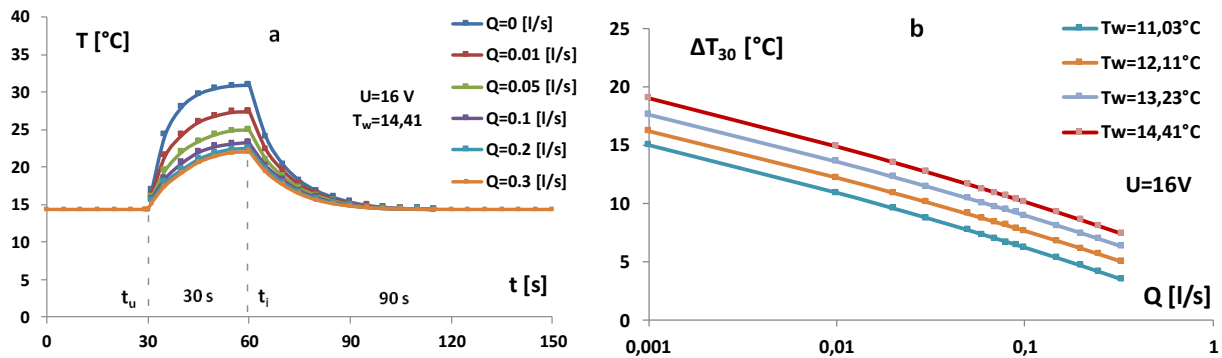
Слика 64. Промена струје самозагревања I и отпорности термистора R током циклуса 30 s / 90 s у функцији од протока Q и температуре долазне воде T_w као параметра. t_u - тренутак укључења и t_i - тренутак искључења струје самозагревања I [99].

Од тренутка укључења t_u током 30 s струја $I(t)$ порасте до I_{30} , а $R(t)$ опада са загревањем термистора сопственом струјом. После тога струја термистора I се прекида у тренутку t_i , а од тада отпорност R расте до почетне вредности услед природног хлађења током 90 s. На тај начин I_{30} постаје функција од протока воде Q где је T_w параметар. Калибрациона крива $I_{30}(Q)$ приказана у 7.5. слика 42. је права линија у $\ln Q$ размери а моделовање одзива

вршено је преко топлотног баланса између термистора који се самозагрева и воде која струји око њега и одводи топлоту.

9.2.2. Температурни одзив сензорског ситета А

Промена струје $I_{30}(Q)$ је приказана у одељку 7.5. на слици 42. док је промена температуре T током циклуса 30 s / 90 s и разлика температура термистора и долазне воде ΔT_{30} на крају самозагревања у 30-тој секунди приказана на слици 65. Са слике се може уочити да одзив $\Delta T_{30}(Q)$ има облик праве у semi-log размери у функцији од протока Q где је $\Delta T_{30}(Q) = T_{30}(Q) - T_w$. Температура термистора T добијена је помоћу Steinhart-Hart једначине (7), одељак 2.6.1, за сваку електричну отпорност R (односно $R = U/I_{30}$). Разлика температура ΔT_{30} при протоку воде Q је максимална на крају самозагревања и не прелази 20 °C (слика 65.).



Слика 65. Температура термистора T током циклуса 30 s / 90 s и разлика температуре термистора и воде ΔT_{30} у функцији од протока Q . t_u - тренутак укључења и t_i - тренутак искључења струје самозагревања [99].

Зависности $\Delta T(Q)$ ($Q > 0,003$ l/s) приказане на слици 65. имају облик праве као у изразу:

$$\Delta T_{30} = a_2 \cdot \ln Q + b_2 \dots \dots \dots (22),$$

где је a_2 нагиб према Q оси а b_2 константа. Моделовање температурних одзива сензорског ситета А и В је дато у одељку 9.2.7.

9.2.3. Анализа несигурности сензорског ситета А

Несигурност мерења температуре долазне воде T_w помоћу сегментираног термистора Th_1 (хладни термистор) зависи од несигурности мерења отпорности R и експоненцијалног фактора термистора B . На слици 37. одељак 7.2. приказана је крива $R(T)$ за NTC термистор са које су узете вредности отпорности на 10 °C и 30 °C па је експоненцијални фактор термистора B одређен на основу једначине (4) одељак 2.5.2. Добијена је вредност $B = 3356$ K при чему је на собној температури (20 °C) измерена номинална електрична отпорност $R_0 = 630,55 \Omega$. Несигурност мерења температуре воде ΔT_w је једнака збиру несигурности

мерања отпорности $\Delta_R = \Delta R/R$, несигурности одређивања $\Delta_V = \Delta V/V = 2\Delta R/R + 2\Delta T/T$ и Δ_{SH} - апроксимације Steinhart-Hartove једначине:

$$\Delta T_w = \Delta_R + \Delta_V + \Delta_{SH} \dots \dots (23).$$

Несигурност мерења отпорности Δ_R дигиталним мултиметром је мања од 0,1 %, а грешка услед апроксимације Steinhart-Hartove једначине на први члан једначине Δ_{SH} је мања од 0,2 %. Како је несигурност мерења температуре у клима комори са платинским отпорником Pt 1000 око $25 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / 20 \text{ }^\circ\text{C}$ а $\Delta R/R$ реда 0,1 %, укупна несигурност у одређивању Δ_V је око 0,25 %. Збирно укупна несигурност мерења ΔT_w је мања од 0,5 % што за $20 \text{ }^\circ\text{C}$ износи $0,08 \text{ }^\circ\text{C}$. За опсег мерења температуре воде од $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $30 \text{ }^\circ\text{C}$ несигурност мерења је мања од $0,12 \text{ }^\circ\text{C}$. Интерполиране криве између две суседне калибрационе криве на слици 41., одељак 7.5., су због тога одређене са кораком $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Несигурност мерења калибрационих кривих Δ_{CC} зависи од несигурности мерења струје I_{30} и напона U , запремине протекле воде V и протеклог времена t а њена вредност је одређена према једначини:

$$\Delta_{CC} = \Delta I_{30}/I_{30} + \Delta U/U + \Delta V/V + \Delta t/t \dots \dots (24).$$

Мерење струје I_{30} и напона U дигиталним инструментима уноси несигурност приближно 0,1 %, респективно. Мерење запремине V у cm^3 уноси несигурност мању од 0,1 %, док мерење времена t уноси несигурност у $5 \text{ ms} / 30 \text{ s}$ што је такође мање од 0,1 %. Процењена несигурност калибрационих кривих Δ_{CC} је реда 0,4 %, а за интерполисане криве Δ_{ACC} је реда 0,2 % и мања. Укупна несигурност при мерењу протока Δ_Q је онда збир напред анализираних несигурности и дата је једначином:

$$\Delta_{QA} = \Delta_{CC} + \Delta_{ACC} + \Delta T_w \dots \dots (25).$$

Укупна несигурност при мерењу протока Δ_Q према напред изложеном не прелази 1,5 % у мереном подопсегу А-III. За остале подопсеге несигурност мерења је слична.

Осетљивост сензорског система $\Delta I_{30} / \Delta \ln Q$ је константна јер је одзив права линија у $\ln Q$ размери слика 41. и у једначини (17): $I_{30} = a \cdot \ln Q + b$ ($Q > 0.03 \text{ l/s}$) где је $a = -2 \text{ mA}$ до $-2,5 \text{ mA}$, $b [\text{mA}]$ је константа за приказани опсег мерења. Међутим $\Delta I_{30} / \Delta Q$ је променљива величина јер за мале протоке промене струје су велике, а за велике промене протока промене струје су релативно мале. Овакви аналогни излази код других сензора протока се често линеаризују додатном електроником као у случајевима који су наведени у наредном одељку 9.2.4.

9.2.4. Упоредна анализа са другим сензорским системима

Прототип сензорског система А се може упоредити са комерцијалним сензорима протока по мерном опсегу протока Q , несигурности мерења, температурном опсегу T_w , потрошњи

енергије (U , I) као у табели 11. Упоредљиви су следећи комерцијални сензорски системи 1. Механички сензор HF100 New-Flow Co., 2. PROFI-MESS индуктивни сензор са пропелером SM04 (опсег 4), 3. SONIC VIEW ултразвучни сензор L030, 4. PROFI-MESS електро-магнетни сензор SI 0015, 5. Сензорски систем А са два сегментирани термистора на бази одвођења топлоте* (рад у циклусима 30 s / 90 s). Сви наведени сензорски системи мере само стационарне протоке воде: аналогни излази су линеаризовани и дају од 4 mA до 20 mA излазну струју, а дигитални излаз приказује проток конвертован у фреквенцију, односно број импулса по литру воде.

Табела 11. Поређење сензорских система за мерење стационарног протока воде

Врста сензора	Проток воде Q [l/min]	Несигурност мерења [%]	Температура воде T_w [°C]	Потрошња енергије [V] / [mA]
(1)- механички	0,1-30	2	1-60	3,8-30 / 100
(2)- пропелерски	2-30	3	1-60	10-30 / 200
(3)- ултразвучни	1,5-30	4-10	1-60	10-30 / 80
(4)- електромагнетни	0,1-25	2	1-60	18-32 / 95
(5)- одвођење топлоте*	0,06-18	1,5-3	1-40	6-24 / 20-45

* проток воде кроз цев пречника 12.7 mm [99].

9.2.5. Оптимизација радне тачке сензорског система В

Принцип рада сензорског система В је сличан као принцип рада у сензорском систему А, тј. одвођење топлоте термистора који се самозагрева а користе се и сегментирани NTC термистори из исте серије. Конструкција је другачија утолико што је кућиште метално и 50 % већих димензија али омогућава постављање сензорског система на цеви већег протока. Намењен је за мерење протока воде на кућном водоводу при стационарном и импулсном режиму протока воде. Због тога је напајање U сензорског система В континуално и константно по опсезима, а мења се по 2 V, 3 V или 4 V скоковито на сваких 5 °C температуре долазне воде T_w као у табелици 12. која следи:

Табела 12. Оптимизација радне тачке сензорског система В

подопсег	В-I	В-II	В-III	В-IV
T_w воде [°C]	5-10	10-15	15-20	20-25
напон U [V]	20	16	13	10
струја I_{\min} [mA]	38	42	44	46
струја I_{\max} [mA]	59	62	65	66
снага P_{\min} [mW]	760	672	572	460
снага P_{\max} [mW]	1118	992	845	660

*Резултати су добијени у статичкој води ($Q=0$) [99].

Број подопсега одговара примени по сезонама јер се температура воде у шахту у земљи у нашем региону мења у границама од 10 °С до 15 °С зими и 15 °С до 20 °С лети што одговара подопсезима II и III. Подопсези и напони напајања су изабрани тако да унутар сваког од њих струја самозагревања $I_{\max} - I_{\min} \approx 20$ mA. Снага дисипације P_{\max} не прелази 1,2 W.

Калибрациона крива $I(Q)$ за сензорски систем В на слици 44., одељак 7.5. је слична као калибрациона крива за сензорски систем А. За интерполацију кривих одзива на стационарни проток воде такође се могу користити праве у semi-log размери на сваких 0.1 °С температуре долазне воде T_w . При томе за интерполацију се користи аналитички облик у функцији протока $I(Q)$ ($Q > 0,003$ l/s) као у једначини:

$$I = a_1 \cdot \ln Q + b_1 \dots \dots (26),$$

Значај калибрационих кривих за ултразвучни сензор и сензорски систем В приказаних на слици 44. је у томе што се оне надаље користе и за импулсне одзиве.

Одзиви $I(Q)$ за квадратне и троугаоне импулсе протока као и за две тест секвенце протока на водоводу са густо распоређеним импулсима (слике 45.-47.) су већ детаљно дискутовани у одељку 7.8. Кашњење предње и задње ивице струјног одзива је детаљно анализирано.

Редна веза ултразвучног сензорског система и сензорског система В (слика 43.) је коришћена не само за испитивање одзива $I(Q)$ него за анализу одзива $T(Q)$, јер термистор који се самозагрева има температурни одзив и на стационарни и на импулсни проток. Температурни одзив $T(Q)$ је последица самозагревања и хлађења услед стационарног протока Q а код температурног одзива на импулсни проток $Q(t)$ могу се анализирати и прелазна термичка стања као у наредном одељку.

9.2.6. Температурни одзив у сензорском ситему В

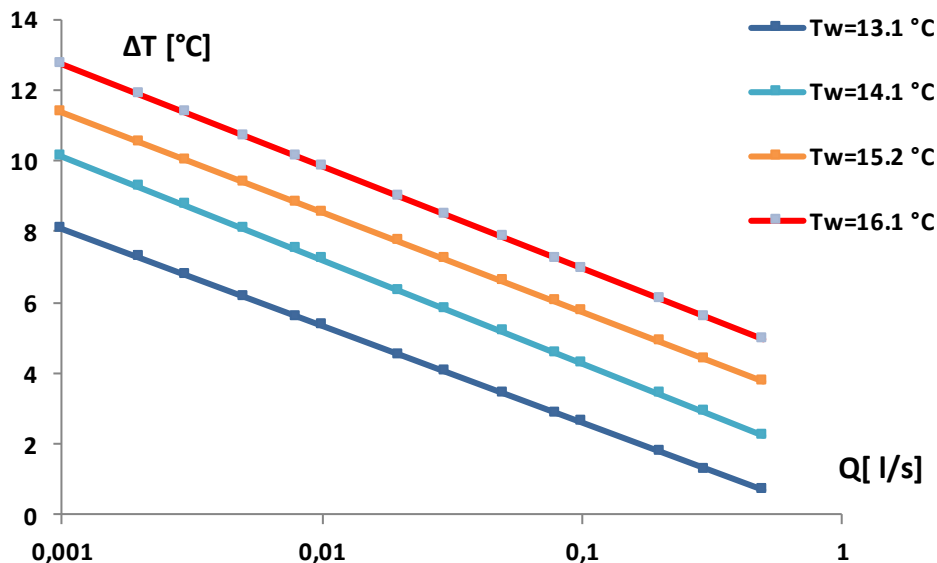
а) Температурни одзив за стационарни проток

Температурни одзив $T(Q)$ термистора који се самозагрева у сензорском ситему В при стационарном протоку воде добија се помоћу струјног одзива $I(Q)$ и Steinhart-Hart једначине (7), одељак 2.6.1. за сваку вредност електричног отпора $R = U / I(Q)$, где U је константно. На слици 66. приказан је температурни одзив термистора који се самозагрева у сензорском ситему В при стационарном протоку воде Q тј. разлика температуре термистора и температуре долазне воде $\Delta T(Q) = T(Q) - T_w$.

За одређивање температурних одзива $\Delta T(Q)$ коришћени су струјни одзиви $I(Q)$ приказани на слици 44. у одељку 7.7. Температурни одзиви ΔT за стационарни проток воде Q ($Q > 0,03$ l/s) су праве линије као у једначини:

$$\Delta T = a_3 \cdot \ln Q + b_3 \dots \dots (27),$$

где је $\Delta T(Q) = T(Q) - T_w$ разлика температура, а b_3 нагиб праве према Q оси у \ln размери а b_3 константа.



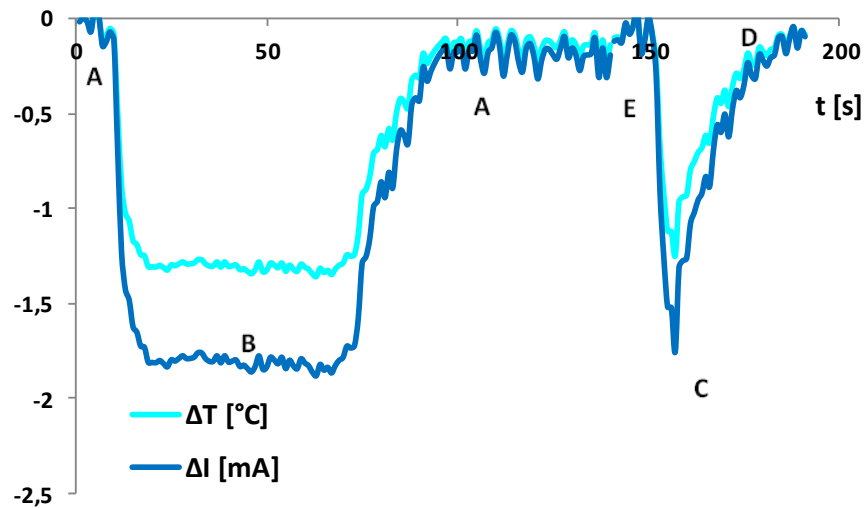
Слика 66. Температурни одзив $\Delta T(Q)$ сензорског система В као разлику температуре термистора T и температуре долазне воде T_w [99].

б) Температурни одзив за импулсни проток

Струјни одзиви $I(t)$ за квадратни и троугаони импулсни проток воде коришћени су за одређивање $Q(t)$ тренутног одзива на слици 45., одељак 7.8., а сада је одзив $I(t)$ коришћен за одређивање разлике $\Delta T(t) = T(t) - T_w$. Температурни одзив $\Delta T(t)$ је одређен помоћу струјног одзива $I(t)$ за проток воде у облику квадратног и троугаоног импулса (слика 45.) и Steinhart-Hart једначине (7), одељак 2.6.1, за свако $R = U/I(t)$, где U је константно.

На слици 67. приказани су паралелно температурни одзив $\Delta T(t)$ и струјни одзив $\Delta I(t)$ на NTC термистору који се самозагрева при константном напону U и при температури долазне воде $T_w = 14,5$ °C. Струја $\Delta I = I_0 - I(t)$, а I_0 је максимална струја термистора тј. кад нема протока ($I(t=0), Q=0$).

Код сензорског система В који ради на бази одвођења топлоте постоји кашњење одзива на предњој и задњој ивици одзива за импулсни проток у односу на побуду што је анализирано на кривама $Q(t)$ у одељку 7.8. Кашњење одзива потиче од кашњења струје термистора $\Delta I(t)$ тј. кашњења температуре $\Delta T(t)$ термистора који се самозагрева.



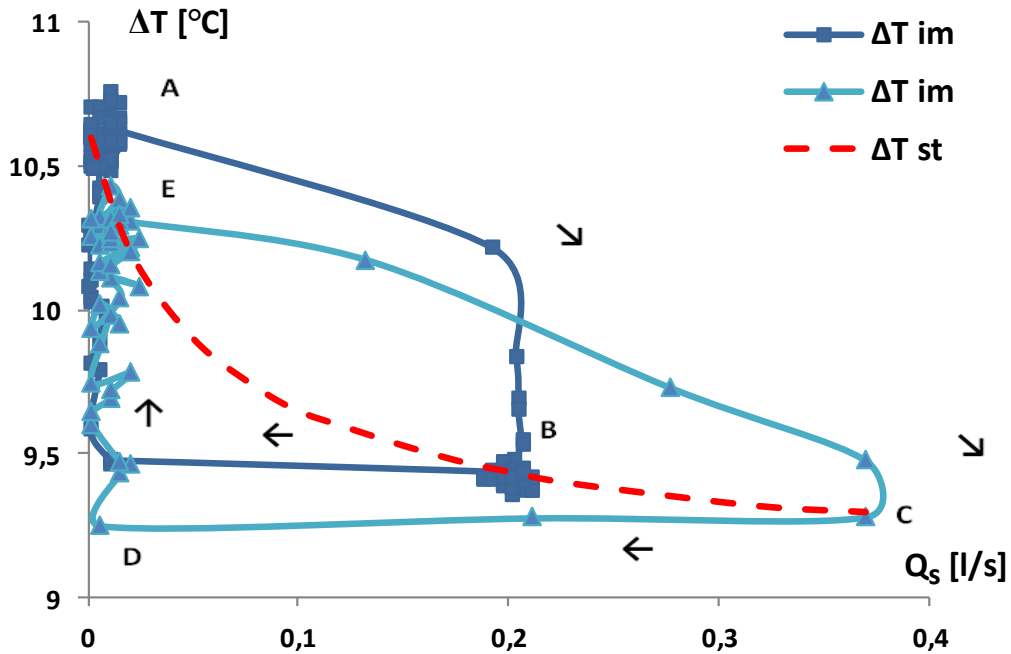
Слика 67. Температурни одзив $\Delta T(t)$ и струјни одзив $\Delta I(t)$ сензорског система В за квадратни и троугаони импулс протока воде на NTC термистору који се самозагрева при константном напону U . Импулсна побуа $Q(t)$ приказана је на слици 45., одељак 7.8.

Код сензорског система В који ради на бази одвођења топлоте постоји кашњење одзива на предњој и задњој ивици одзива за импулсни проток у односу на побуду што је анализирано на кривама $Q(t)$ у одељку 7.8. Кашњење одзива потиче од кашњења струје термистора $\Delta I(t)$ тј. кашњења температуре $\Delta T(t)$ термистора који се самозагрева.

с) Температурна петља

Температурна петља сензорског система В приказана је на слици 68. Настаје услед прелазних стања температуре термистора $\Delta T(t)$ која је приказана на слици 67. ако се она синхронизује (преко времена t) са протоком $Q_s(t)$ који мери ултазвучни сензорски систем који практично не касни са одзивом.

Две петље температуре $\Delta T(Q_s)$ за квадратни и троугаони импулсни проток воде приказане су на слици 68. Крива ΔT_{st} -стационарног протока је повучена испрекиданом линијом кроз тачке А, Е, В, С које се налазе на правој $\Delta T(Q)$ како је и приказано у претходном поглављу за температурни одзив на стационарни проток. Путања А→В на петљи одговара прелазном стању АВ на првој ивици квадратног импулса које траје 5 s, док путања В→А претставља другу прелазну појаву тј. реп после престанка квадратног импулса ($Q=0$) и траје више од 20 s. Путања Е→С на петљи је последица кашњења прве ивице троугаоног импулса, док је путања С→Д→Е последица кашњења на другој ивици импулса тј. реп после престанка троугаоног импулса ($Q=0$). На овај начин се помоћу температурних одзива објашњавају и деформисани одзиви $I(t)$ за две тест секвенце са густо распоређеним квадратним и троугаоним импулсима приказане на сликама 46. и 47.



Слика 68. Петља температуре термистора ΔT мерена сензорским системом В у функцији од протока Q_s мереног ултразвучним сензорским системом: петља А→В - В→А за квадратни и Е→С - С→Д→Е за троугаони импулс. ΔT_{im} - импулсног протока, ΔT_{st} - стационарног протока воде је испрекидана крива линија (-----) А →Е →В→ С.

9.2.7. Моделовање одзива сензорских система А и В

а) Моделовање струјног одзива

Моделовање $I(Q)$ струјног одзива сензорских система А и В је изведено помоћу баланса између топлоте коју термистор генерише и пренете топлоте на воду. У одсуству протока воде $Q=0$ [l/s] струја самозагревања $I(0)$ је највећа, а при успостављању протока воде $Q>0$ струја $I(Q)$ опадне у односу на $I(0)$ за вредност ΔI . Промена генерисане топлоте у јединици времена која се ослобађа на термистору пропорционална је промени струје ΔI (услед протока Q) при константном напону U тј. једнака је електричној снази ΔP и дата је Омовим законом као $\Delta P=U \cdot \Delta I$. Са друге стране промена топлоте пренете на воду Δq зависи од масе протекле воде m у времену Δt , топлотног капацитета воде c_v и разлике температура NTC термистора и воде ΔT па је пренета топлота у јединици времена $\Delta q/\Delta t=(m/\Delta t) \cdot c_v \cdot \Delta T$. Тада једначина топлотне равнотеже на граничној површини термистор / вода гласи:

$$U \cdot \Delta I = (m/\Delta t) \cdot c_v \cdot \Delta T \quad \dots \dots (28).$$

Како је маса протекле воде m у времену Δt једнака производу густине воде ρ и протекле запремине $V/\Delta t$ односно $m/\Delta t = \rho \cdot V/\Delta t = \rho \cdot Q$ где је $Q=V/\Delta t$ имамо:

$$U \cdot \Delta I / \Delta T = \rho \cdot c_v \cdot Q \quad \dots \dots \dots (29).$$

Струја самозагревања I је експоненцијала функција као и први извод dI/dT :

$$I = \frac{U}{R_0} \cdot \exp\left[B \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad \text{и} \quad \frac{dI}{dT} = \frac{B \cdot U}{T^2 \cdot R_0} \cdot \exp\left[B \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \dots \dots \dots (30).$$

После апроксимације $\Delta I/\Delta T \sim dI/dT$ и увођења dI/dT у претходну једначину (29) настаје једначина:

$$\frac{B}{T^2} \cdot I = \frac{c_v \cdot \rho}{U} \cdot Q \quad \dots \dots \dots (31).$$

Када се температура на граничној површини термистора и воде T изрази помоћу Steinhart-Hart једначине (7), одељак 2.6.1. и уведе у једначину (31) после сређивања са леве стране остаје израз по струји I а са десне по протоку Q , једначина:

$$\left[\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \cdot \ln\left(\frac{U}{R_0 \cdot I}\right)\right]^2 \cdot I = \frac{c_v \cdot \rho}{B \cdot U} \cdot Q \quad \dots \dots \dots (32).$$

После логаритмовања обе стране једначине (32) добија се једначина:

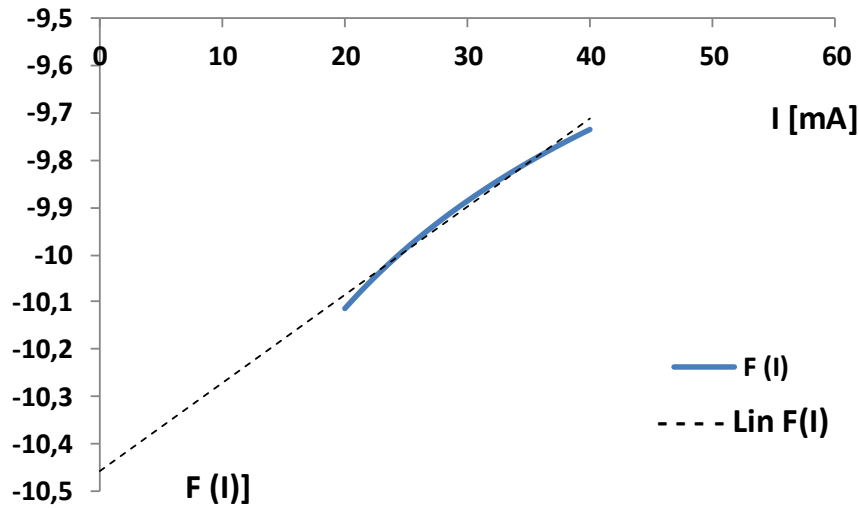
$$2 \cdot \ln\left[\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \cdot \ln\left(\frac{U}{R_0 \cdot I}\right)\right] + \ln I = k + \ln Q \quad \dots \dots \dots (33).$$

где је $k = \ln\left(\frac{c_v \cdot \rho}{B \cdot U}\right)$ константа.

Лева страна израза (33) је сложена функција $F(I)$ и кад се испитује у опсегу I од 20 mA до 40 mA ($U=16V$) добија се готово права линија (слика 69.). Аналитички облик праве $\text{Lin } F(I)$ је одређен фитовањем $F(I)$, једначина:

$$F(I) = 2 \cdot \ln\left[\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \cdot \ln\left(\frac{U}{R_0 \cdot I}\right)\right] + \ln I$$

$$\text{Lin } F(I) \approx k_1 \cdot I + k_2 = 0,018 \cdot I - 10,45 \quad \dots \dots \dots (34).$$



Слика 69. Испитивање функције F(I) и њена апроксимација правом Lin F(I).

Убацавањем F(I) у једначину (33) после сређивања добија се I(Q), једначина:

$$k_1 \cdot I + k_2 \approx \ln Q + k \quad \text{или} \quad I \approx \frac{1}{k_1} \cdot \ln Q + \frac{k - k_2}{k_1} \dots \dots \dots (35).$$

Зависност I(Q) у једначини (35) добијена моделовањем је иста по облику као емпиријски израз за калибрационе криве дате на сликама 41. и 44. (одељак 7.5. и 7.7.): $I_{30} = a \cdot \ln Q + b$ (17) и $I = a_1 \cdot \ln Q + b_1$ (18) (проток $Q > 0,003$ l/s) за сензорске системе А и В респективно.

На слици 41. приказане су калибрационе криве I(Q) за сензорски систем А, које су облика $I_{30} = a \cdot \ln Q + b$, а са њих су фитовањем одређени основни параметри кривих и приказани у табели 13. за различите температуре долазне воде T_w .

Табела 13. Мерене вредности струјног одзива сензорског система А - основни параметри калибрационих кривих $I_{30} = a \cdot \ln(Q) + b$

T_w [°C]	I(Q) фитовано [mA]	a [mA]	b [mA]	I(0,001) [mA]	I(0,33) [mA]
14,11	$I = -2,52 \cdot \ln(Q) + 24,45$	-2,52	24,45	41,8	27,2
13,23	$I = -2,30 \cdot \ln(Q) + 22,37$	-2,3	22,37	38,3	24,9
12,11	$I = -2,09 \cdot \ln(Q) + 20,36$	-2,09	20,36	34,8	22,6
11,03	$I = -1,99 \cdot \ln(Q) + 18,20$	-1,99	18,20	31,9	20,4

* проток воде Q у опсегу од 0,001 [l/s] до 0,33 [l/s].

За сваку од кривих I(Q) у табели 13. дат је опсег минималних и максималних вредности I(0,33) и I(0,001).

б) Моделовање температурног одзива

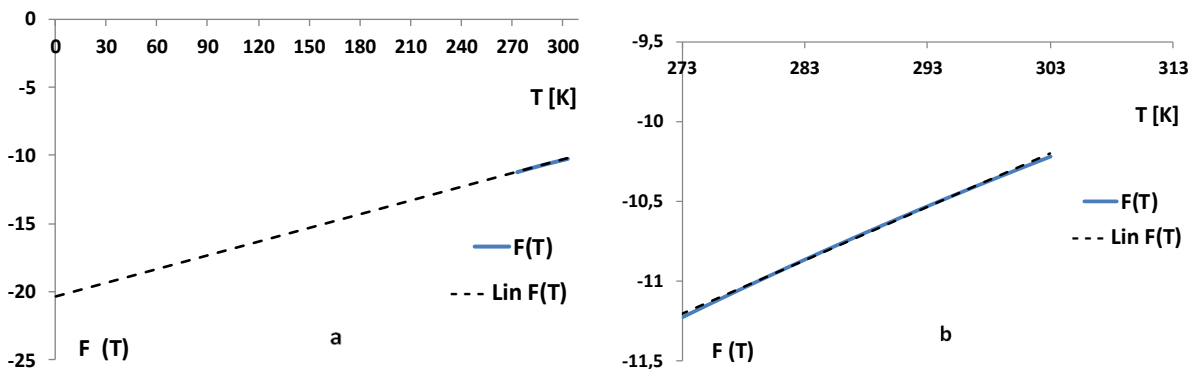
Моделовање температурног одзива $T(Q)$ такође се врши на основу једначине топлотне равнотеже (28) која је напред дата и поступак је исти до једначине (31). Тада се у једначини (31) замени струја I из једначине (30), па се добија:

$$\frac{B}{T^2} \cdot \frac{U}{R_0} \cdot \exp\left[B \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] = \frac{c_v \cdot \rho}{U} \cdot Q \quad \text{или} \quad \frac{1}{T^2} \cdot \exp\left[B \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] = \frac{c_v \cdot \rho \cdot R_0}{B \cdot U^2} \cdot Q \quad \dots\dots (36).$$

После логаритмовања обе стране једначине (36) и сређивања добија се:

$$-2 \ln T + \frac{B}{T_0} - \frac{B}{T} = k_3 + \ln Q \quad \dots\dots\dots (37),$$

где је $k_3 = \ln[(c_v \cdot \rho \cdot R_0)/(B \cdot U^2)]$ константа. Лева страна једначине (37) је функција $F(T)$ и испитује се у опсегу $T = 273,16 \text{ K}$ до $303,16 \text{ K}$. Функција $F(T)$ у радном опсегу је готово права линија (слика 70.).



Слика 70. Испитивање функције $F(T)$ и њена апроксимација правом $\text{Lin } F(T)$: а-развој $F(T)$, б-приказ развоја $F(T)$ у опсегу температуре T од $273,16 \text{ K}$ до $303,16 \text{ K}$.

Аналитички облик праве $\text{Lin } F(T)$ је одређен фитовањем једначине (37):

$$F(T) = -2 \cdot \ln T + \frac{B}{T_0} - \frac{B}{T} \quad ; \quad \text{Lin } F(T) \approx k_4 \cdot T + k_5 = 0,033 \cdot T - 20,35 \quad \dots\dots\dots (38).$$

Заменом $\text{Lin } F(T)$ из једначине (38) у једначину (37) добија се $T(Q)$ као у једначини:

$$k_4 \cdot T + k_5 \approx \ln Q + k_3 \quad \text{или} \quad T \approx \frac{1}{k_4} \cdot \ln Q + \frac{k_3 - k_5}{k_4} \quad \dots\dots\dots (39).$$

Зависност $T(Q)$ из једначине (39) добијена моделовањем је иста по облику са напред датим емпиријским једначинама за температурни одзив сензорског система А: $\Delta T_{30}(Q) = a_2 \cdot \ln Q + b_2$ (22), и за температурни одзив сензорског система В: $\Delta T(Q) = a_3 \cdot \ln Q + b_3$ (27).

На слици 65.b приказане су калибрационе криве $\Delta T_{30}(Q)$ за сензорски систем А, које су облика $\Delta T_{30} = a_2 \cdot \ln Q + b_2$, а са њих су фитовањем одређени основни параметри кривих и приказани у табели 14. за различите температуре долазне воде T_w .

Табела 14. Мерене вредности одзива сензорског система А - основни параметри калибрационих кривих $\Delta T_{30} = a_2 \cdot \ln(Q) + b_2$

T_w [°C]	$T(Q) = \Delta T(Q)$ фитовано $+T_w$	a_2 [°C]	b_2 [°C]	$T(0,001)$ [°C]	$T(0,33)$ [°C]
14,11	$T = -2,01 \cdot \ln(Q) + 19,85$	-2,01	19,85	33,4	21,28
13,23	$T = -1,97 \cdot \ln(Q) + 17,62$	-1,97	17,62	30,9	19,51
12,11	$T = -1,93 \cdot \ln(Q) + 15,25$	-1,93	15,25	28,3	17,12
11,03	$T = -1,99 \cdot \ln(Q) + 12,59$	-1,99	12,59	25,93	14,43

* проток воде Q у опсегу од 0,001 [l/s] до 0,33 [l/s].

За сваку од кривих $T(Q)$ у табели 14. дат је опсег минималних и максималних вредности $T(0,33)$ и $T(0,001)$.

9.2.8. Анализа несигурности сензорског система В

Несигурност мерења сензорског система В се може анализирати на сличан начин као за сензорски систем А. Користи се исти сегментирани термистор, па су исте $R(T)$ криве и експоненцијални фактор В. Исти је начин мерења температуре долазне воде T_w . Разлика је у томе што се уместо два мултиметара користи аквизициона картица (DAS) која мери напоне у 8 тачака тј., $8 \cdot \Delta U / U_{DAS}$ (разделници напона) и два извора једносмерне струје U_{PS} и U_{RCV} (мерна шема дата на слици 43., одељак 7.8.) што уноси у мерења несигурност мерног система Δ_{MS} :

$$\Delta_{MS} = 8 \cdot \Delta U / U_{DAS} + \Delta U / U_{PS} + \Delta U / U_{RCV} \dots \dots (40).$$

Несигурност Δ_{MS} не прелази 1 % јер меримо напоне и струје аквизиционом картицом (DAS) која има несигурност од неколико $\mu V/V$, што је нижа несигурност него код мерења мултиметарима. Додавањем $\Delta_{CC} + \Delta_{ACC} + \Delta_{Tw}$ као у 9.2.3. једначина (25) код сензорског система А налази се укупна несигурност Δ_{QB} сензорског система В за стационаран проток:

$$\Delta_{QB} = \Delta_{MS} + \Delta_{CC} + \Delta_{ACC} + \Delta_{Tw} \dots \dots (41).$$

Сабирањем вредности појединачних несигурности у једначини (41) добија се да је укупна несигурност сензорског система В при мерењу стационарног протока воде Δ_{QB} мања од 3 %. Међутим, несигурност мерења при импулсном протоку је знатно већа него при стационарном протоку или на платоу импулса који се може сматрати делом стационарног одзива. У том циљу су предложена практична решења за коришћење одзива на густо

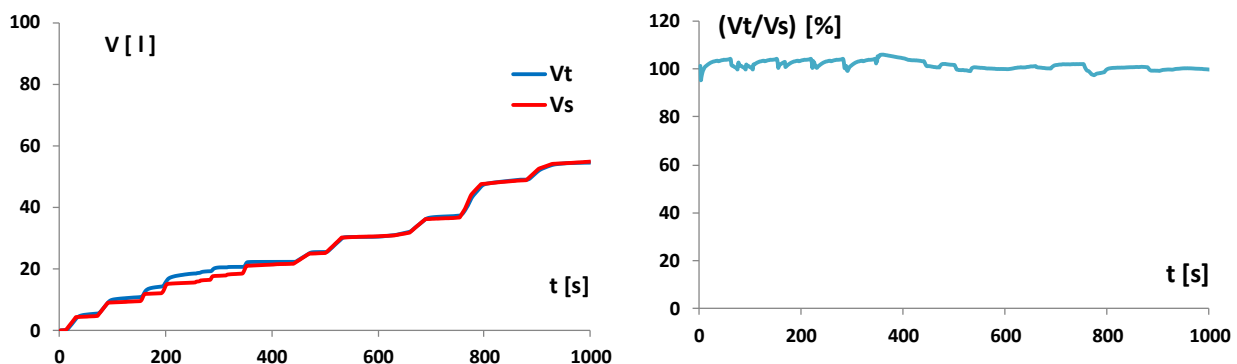
распоређене импулсне протоке. Примена одзива сензорских система А и В анализира се у наредном одељку.

9.2.9. Примена сензорских система А и В

Сензорски систем А намењен је за мерење протока воде у мирним рекама где се током мерног периода од 30 s проток практично не мења. Брзина воде у рекама v је количник брзине протока воде Q и кружног попречног пресека кућишта сензорског система S (нормално на проток) као $v=Q/S$. Могу се за брзине воде у рекама $v > 0.5$ m/s поставити редуктори протока на кружни попречни пресек (на пример редуктор са односом 5 :1) и тако смањити проток а повећати 5 пута мерни опсег по брзини v .

Сензорски систем В мери протоке воде у свакој секунди јер има континуално напајање и аквизицију 10 пута у секунди. Одзиви на честе и густе импулсне протоке (као на кућном водоводу) могу се урачунати продуженим сабирањем $Q(t)$. Метод продуженог сабирања протока воде приказан је на слици 69. Укупна запремина протекле воде V је једнака збиру тренутних протока Q_i у свакој секунди ($\Delta t=1$ s) за тражени период времена t , односно $V(t)=\sum Q_i \cdot \Delta t$ за $i=1\dots n$, n -број секунди у интервалу t .

Уколико продужимо сабирање за 20 s да обухватимо и кашњење (реп после импулса) грешка у одређивању протекле запремине воде V се смањује јер се делимично компензују кашњење на првој ивици и на другој ивици одзива на импулсни проток воде. За две тест секвенце са густо распоређеним импулсима приказане на сликама 46. и 47., одељак 7.8. сумирање протекле количине воде $V_t(t)$ зависи од облика импулса и његовог трајања. На слици 46 прва тест секвенца садржи густо постављене уске троугаоне импулсе (регион од 200 s - 400 s) па је у тој области разлика две криве $V_s(t)$ за ултразвучни сензорски систем и $V_t(t)$ за сензорски систем В износи око 3 % (слика 71.), док у другој тест секвенци на слици 47. где су само квадратни импулси разлика у мерењу протекле запремине воде је мања.



Слика 71. Укупна протекла запремина воде V за одзиве на импулсне протоке приказане на сликама 47. и 48. $V_s(t)$ - запремина воде мерена ултразвучним сензорским системом и $V_t(t)$ - запремина воде мерена сензорским системом В.

Сабирањем протока у свакој секунди током 1000 s разлика у мерењу протекле запремине воде се смањује на 0,5 %.

9.3. Анализа мерења брзине ветра помоћу сензорских система С и D

Једноосни сензорски систем С за мерење брзине ветра и троосни сензорски систем D за мерење брзине ветра на бази одвођења топлоте приказани су детаљно у глави 8. Оба система раде са NTC термисторима у штедном режиму напајања у циклусима 30 s самозагревања и 90 s природног хлађења у ваздуху и намењени су за мерење стационарних струјања ветра. Једноосни сензорски систем С мери само интензитет брзине ветра v , док сензорски систем D мери вектор брзине ветра \mathbf{v} (интензитет, правац, углови, који дају компоненте вектора v_x, v_y, v_z). Основне карактеристике оба сензорска система су анализирани и дискутовани посебно.

9.3.1. Оптимизација радне тачке сензорских система С и D

Сензорски систем С за мерење брзине ветра је тзв. једноосни анемометар. Првобитно је било планирано да термистор Th_1 мери температуру ваздуха T ван канала помоћу мерења отпорности термистора $R(T)$, а за одређивање температуре ваздуха коришћена је Steinhart-Hartova једначина (7), одељак 2.6.1. Основне електричне карактеристике сензорског елемента су експоненцијални фактор $B=3356$ K и номинална отпорност сегментираниог термистора $R_0 = 630,55$ Ω . Несигурност мерења температуре термистором је била мања од 0,1 °C. Међутим ради повећања тачности мерења температуре ваздуха као референтни термометар коришћен је платински термометар Pt 1000, Iskra, који има резолуцију 0,01 °C и несигурност мерења $\pm 0,025$ °C. Платински термометар има стабилно дигитално показивање али му због постојања временске константе сонде са металним оклопом треба више минута да постигне температуру околине. У свим мерењима надаље примењиван је само платински термометар Pt 1000, јер има већу тачност, стабилност и нижи шум.

На сваких 10 °C температуре ваздуха T у мерном опсегу од -20 °C до 40 °C одређен је константни напон dc напајања U (25 V; 20 V; 16 V; 12.5 V; 10 V ; 8 V) тако да струја самозагревања I_{30} у сваком подопсегу има вредности $I_{30max} - I_{30min} \approx 8$ mA до 10 mA.

Када се брзина ветра v мења од 0 m/s до 8 m/s радна тачка сензорског система С и D се одређује као у табели 15. На овај начин радна тачка унутар CD I-VI опсега се враћа на почетак, слично као код сензорских система за мерење протока воде само што је сада подопсег температуре ваздуха 10 °C. Ваздух знатно слабије проводи топлоту и слабије хлади термистор, чак и кад су брзине струјања ваздуха неколико пута веће него брзине воде.

Одређивање интензитета брзине ветра код свих једноосних система за мерење брзине ветра захтева да оса система и вектора брзине ветра буду колинеарни. У ту сврху се или правац ветра одмах одреди ветроказом или се мерни систем помера по углу постепено да се добије максимум одзива. У колико оса мерног система и вектор брзине ветра нису колинеарни измерена вредност зависи од међусобног угла α .

Табела 15. Оптимизација радне тачке сензорског система С и D

подопсег	CD-I	CD-II	CD-III	CD-IV	CD-V	CD-VI
Т ваздуха [°C]	-20 ; -10	-10 ; 0	0 ; 10	10 ; 20	20; 30	30 ;40
напон U [V]	25	20	16	12,5	10	8
струја I _{30min} [mA]	6,87	8,15	9,15	11	13	14,7
струја I _{30max} [mA]	14,5	15,5	17,5	19,3	21,9	24
снага P _{min} [mW]	171	163	164	137	130	117
снага P _{max} [mW]	362	310	280	241	219	192

* (отворен канал, угао ветра $\alpha=0^\circ$, брзина ветра v од 0 m/s до 8 m/s [101])

9.3.2. Зависност одзива сензорског система С од угла

У глави 8 на слици 51 дате су калибрационе криве $I_{30}(v)$ у функцији од температуре ваздуха Т за случај колинеарности осе сензорског система и правца ветра, а на слици 52. дате су калибрационе криве када између те две осе нема колинеарности тј. постоји угао струјања ветра α . Први одзив је експоненцијално опадајућег типа, а други је још сложенији јер укључује зависност одзива сензорског система од угла α . Ако се посматра ефективна површина канала за проток ваздуха онда под углом α ефективна површина постаје $S \cdot \cos\alpha$ где је S кружни попречни пресек ваздушног канала. Практично, одзив је резултат производа експоненцијално опадајуће и косинусне функције. Смањење протока ваздуха кроз ваздушни канал сензорског система С због угла струјања ваздуха α доводи до смањења хлађења термистора који се самозагрева сопственом струјом. Сличан ефекат изазива и примена редуктора протока ваздуха са односом 4 : 1 (као на слици 52.) па се због употребе редуктора могу мерити 4 пута веће брзине ветра тј. преко 30 m/s.

Са слике 52. се може уочити да се за мали угао ветра α термистор се боље хлади, а струја термистора $I_{30}(v, \alpha)$ више опада са порастом брзине ветра v . Исто тако кад је угао α велики струјање ваздуха кроз канал се смањује а одзив $I_{30}(v, \alpha)$ расте. Међутим, има размене топлоте са ваздухом који струји и под правим углом у равни кружног отвора са обе стране канала мада се термистор знатно мање хлади. Када се улаз и излаз ваздушног канала потпуно затворе онда је струја термистора $I_{30}(v, \alpha)$ хоризонтална права линија тј. брзина ветра v и угао ветра α немају утицаја на одзив.

Промена струје термистора ΔI у мерном подопсегу на слици 52. (лево) за $\alpha=0^\circ$ и отворени ваздушни канал без редуктора протока достиже од 3,5 mA до 4,5 mA док под углом ветра $\alpha=0^\circ$ у истом подопсегу са редуктором протока ваздуха на слици 52. (десно) струја опадне за 2,5 mA. Када се употреби редуктор протока ваздуха са односом 4 : 1 у истом подопсегу и при истим брзинама ветра за $\alpha=0^\circ$ и $\alpha=90^\circ$ промена струје ΔI је на пример 2,1 mA и 0,8 mA, респективно, (као на слици 52.) што значи да тек при већим брзинама струјања ваздуха $v > 8$ m/s долази до бољег хлађења термистора и повећања промена струје ΔI .

Губитак топлоте на термистору у јединици времена тј. електрична снага дисипације у тридесетој секунди P_{30} има три компоненте:

$$P_{30} = P_{30}(0) - \Delta P_{30}(v, 90^\circ) - \Delta P_{30}(v, \alpha) \dots \dots (42),$$

где је $P_{30}(0)$ снага дисипирана на термистору када нема ветра ($v=0$) (процес самозагревања термистора + природно радијално хлађење у ваздушном каналу);

$\Delta P_{30}(v, 90^\circ)$ је разлика између $P_{30}(0)$ и $P_{30}(v, \alpha=90^\circ)$ (губитак топлоте на обе стране отвореног ваздушног канала, при брзини ветра v и углу ветра $\alpha=90^\circ$ у односу на осу канала);

$\Delta P_{30}(v, \alpha)$ је разлика између $P_{30}(v, \alpha=90^\circ)$ и $P_{30}(v, \alpha)$ (ефективни губитак топлоте тј. аксијално хлађење термистора при брзини ветра v и углу α): ефективни отвор за проток ваздуха је $S_{\text{eff}}=S \cdot \cos \alpha$, где је S кружни попречни пресек ваздушног канала.

Ако једноосни ситем S има и редуктор онда је активна површина S четири пута мања. Када се једначина (42) подели са U напоном напајања који је константан добија се струја термистора I_{30} :

$$I_{30} = I_{30}(0) - \Delta I_{30}(v, 90^\circ) - \Delta I_{30}(v, \alpha) \dots \dots (43).$$

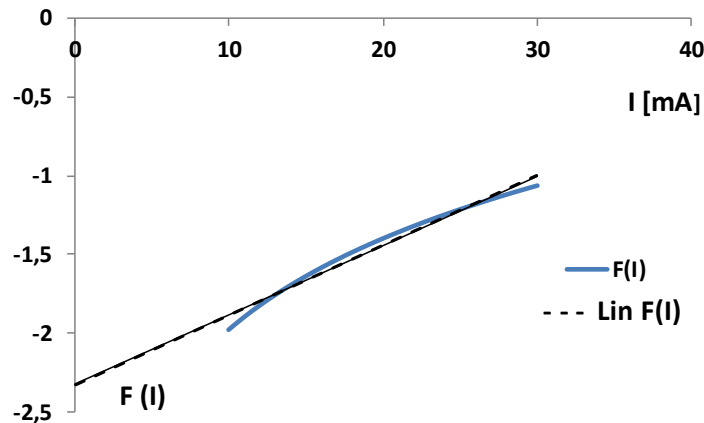
Струја термистора $I_{30}(0)$ кад нема ветра тј, када је $v=0$ m/s се мења у функцији од температуре ваздуха T од $0,8$ mA/°C до $0,9$ mA/°C унутар подопсега од 10 °C (слика 50.). Сноп кривих одзива сензорског система $I_{30}(v, \alpha)$ на брзину ветра v и угао ветра α је скуп сложених експоненцијално опадајућих / хиперболичних кривих које се секу у једној почетној тачки као на слици 52.

9.3.3. Моделовање одзива сензорских система S и D

Моделовање одзива тј. струје I_{30} термистора који се самозагрева у ваздушном каналу при протоку ваздуха Q слично је по облику моделовању протока воде које је изведено за одзив на стационарни проток за сензорске системе A и B полазећи од једначине топлотне равнотеже (28) и (29) (одељак 9.2.7.а). На крају добијена је зависност струје самозагревања $I_{30}(Q)$ истог облика као у једначини (32). Уколико се проток флуида Q у каналу (сада ваздуха) замени са $Q=S \cdot v \cdot \cos(\alpha)$ где је v брзина ветра, S попречни пресек канала а α угао брзине ветра према оси канала онда се добија зависност $I(v)$:

$$I(v) \approx \frac{1}{k_1} \cdot \ln(S \cdot v \cdot \cos(\alpha)) + \frac{k - k_2}{k_1} \dots \dots (44),$$

где је $k=\ln[c_{\text{vaz}} \cdot \rho_{\text{vaz}}/B \cdot U]$ константа, c_{vaz} топлотни капацитет ваздуха а ρ_{vaz} густина ваздуха. Константе k_1 и k_2 рачунате су на исти начин као у једначини (35) али са напоном $U=10$ V и $B=3356$ K. Функција $F(I)$ дата у једначини (34) испитује се у опсегу од 10 mA до 30 mA (слика 72.):



Слика 72. Испитивање функције $F(I)$ и њена апроксимација правом $Lin F(I)$.

Аналитички облик праве $Lin F(I)$ која апроксимира $F(I)$ има нове вредности за k_1 и k_2 :

$$Lin F(I) \approx k_1 \cdot I + k_2 = 0,044 \cdot I - 2,32 \dots \dots (45).$$

Константа k у једначини (44) се мења са напоном напајања U . Специфична топлотна константа ваздуха c_{vaz} зависи од притиска ваздуха p али се може апроксимативно узети да је за мале брзине ваздуха $c_{vaz}=c_p$, тј. да је притисак константан. Густина ваздуха ρ_{vaz} се мења са температуром ваздуха T , али за константну температуру ваздуха T може се узети приближно да је и ρ_{vaz} константно. Уколико је угао ветра $\alpha = 0^\circ$ струја термистора $I(v)$ има експоненцијално опадајући облик као на слици 51., одељак 8.3. У логаритамској размери $\ln(v)$ за $v > 0,1$ m/s струја термистора $I(v)$ има облик праве $I(v)=a_4 \cdot \ln(v) + b_4$ као и једначина (44) добијена моделовањем. Овај резултат је последица карактеристике термистора $R(T) = U/I(T)$ која је експоненцијалног / логаритамског типа (слика 37., одељак 7.2.).

За угао ветра $\alpha \neq 0^\circ$ струја термистора $I_{30}(v \cdot \cos \alpha)$ расте у односу на $I_{30}(v)$ за $\alpha=0^\circ$ јер се термистор слабије хлади струјањем ваздуха у каналу што је утврђено мерењем и приказано на слици 52. За експерименталне криве на слици 52. (скуп опадајућих кривих) може се приближно одредити аналитичка форма $I_{30}(v \cdot \cos \alpha)$ без уласка у природу појаве и једначину топлотне равнотеже применом поступка фитовања полиномом другог реда:

$$I_{30}(v, \alpha) = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 \dots \dots (46),$$

где a_0, a_1, a_2 представљају сетове константи за сваку криву из снопа калибрационих кривих на слици 52., где се угао α мења скоковито по 15° као параметар. Између две мерене калибрационе криве могу се по потреби интерполирати рачунаром помоћне калибрационе криве (на пример на сваких 5° или мање што даје већу прецизност у одређивању угла струјања ветра α). Израз (46) за $I_{30}(v, \alpha)$ је једноставнији и погоднији за рачунање помоћу рачунара него $\ln(v \cdot \cos \alpha)$ у једначини (48). Код троосног сензорског система D са три ваздушна канала X, Y, Z и три одзива $I_{30x}, I_{30y}, I_{30z}$ има много више снопова калибрационих

кривих и интерполираних калибрационих кривих тако да је апроксимација одзива полиномом као у једначини (46) следећи корак ка аутоматизацији мерења и примарној обради података. Сличан се поступак примењује код свих модерних тј. паметних сензорских система. Поред тога аналогни одзиви се често линеаризују или се дигитализују и обрађују софтвером.

9.3.4. Анализа несигурности сензорских система С и D

Сензорски систем С има једноставну мерну шему која је приказана на слици 49., одељак 8.2. Основне карактеристике сегментираног термистора већ су одређене у одељку 7.2. Потребно је мерити напон напајања U , струју I_{30} , време t , температуру ваздуха T , брзину ветра v и угао ветра α за снимање калибрационих кривих. Несигурност мерења калибрационих кривих Δ_{CC} је одређена сумом несигурности мерења напред поменутих величина: мерења струје $\Delta_I = \Delta I_{30}/I_{30}$, напона напајања $\Delta_U = \Delta U/U$, температуре ваздуха $\Delta_T = \Delta T/T$, времена $\Delta_t = \Delta t/t$, брзине ветра $\Delta_v = \Delta v/v$ и угла ветра $\Delta_\alpha = \Delta \alpha/\alpha$:

$$\Delta_{CC} = \Delta_I + \Delta_U + \Delta_T + \Delta_t + \Delta_v + \Delta_\alpha \dots\dots\dots (47).$$

Несигурност мерења струје и напона за дигиталне инструменте је мања од 0,1 % а мерења температуре помоћу Pt 1000 је мања од 25 mK (мање од 0.05 %), мерење времена од 30 s са одступањем 5 ms (мање од 0,1 %), несигурност мерења брзине ветра дигиталног анемометра EA 3010 Techno-line је била 1 % (после рекалибрације) а мерење угла угломером има несигурност реда 0,5 %. Сабирањем свих поменутих несигурности укупна несигурност мерења калибрационих кривих Δ_{CC} не прелази 1,8 %.

У другом кораку, у радној тачки, за конкретну измерену вредност струје термистора I_{30m} (струја термистора у тридесетој секунди тј. непосредно пред искључење) која је потребна за одређивање брзине ветра v_m помоћу калибрационих кривих, несигурност мерења износи $\Delta_{Im} = \Delta I_{30m}/I_{30m}$. Несигурност мерења струје Δ_{Im} у радној тачки укључује несигурност мерења струје Δ_I , напона Δ_U , времена Δ_t , температуре ваздуха Δ_T и несигурност мерења угла Δ_α :

$$\Delta_{Im} = \Delta_I + \Delta_U + \Delta_T + \Delta_t + \Delta_\alpha \dots\dots\dots (48).$$

Сабирањем поменутих несигурности приказаних у претходном пасусу мерења Δ_{Im} не прелази 0,8 %. Укупна несигурност мерења Δ_C сензорског система С и D је једнака збиру несигурности $\Delta_C = \Delta_{CC} + \Delta_{Im}$ што не прелази 3 %.

9.3.5. Анализа карактеристика сензорског система D

Сензорски систем D (слика 53. и 54., одељак 8.4.) се састоји од три ваздушна канала истих димензија као за сензорски систем С. Канали су постављени под правим углом према координатном систему X, Y, Z а у сензорски систем D су додата још и два ваздушна канала истих димензија у којима су смештени сензор температуре ваздуха Pt 1000 и капацитивни сензор влаге.

Радне тачке сва три NTC термистора за мерење брзине ветра у каналима X, Y, Z су исте као код једноосног сензорског система С што је описано у одељку 9.3.1. Табела 13 где је приказана оптимизација радне тачке сензорског система С користи се и за сензорски систем D. Сегментирани термистори X, Y, Z који су постављени аксијално у каналима су бирани из исте серије тако да им се номинална отпорност R_0 разликује за мање од 1Ω тј. електричне карактеристике сва три ваздушна канала су практично идентичне као оне приказане у одељку 8.3. за сензорски систем С.

Добијене вредности вектора брзине ветра \mathbf{v} (v_x, v_y, v_z) за сензорски систем D тј. вредности компоненти вектора брзине ветра v_x, v_y, v_z на X, Y, Z осама зависе од струјних одзива $I_{30x}, I_{30y}, I_{30z}$ по каналима и одређују се преко калибрационих кривих графичким методама које су приказане на сликама 55. и 56. за равно тло и 57. и 58. за тло под нагибом. Сензорски систем D мери брзине ветра у опсегу од 0 до 8 m/s, а са редуктором протока ваздуха (однос 4 :1) и преко 30 m/s. Већи део анализе рада сензорског система D и дискусија добијених резултата су приказани у одељцима 8.5 и 8.6. тако да овде неће бити понављани.

Несигурност мерења се мења утолико што се код троосног сензорског система D мере три струје термистора I_x, I_y, I_z али знатно прецизнијим инструментима. Несигурност мерења калибрационих кривих је иста за сва три канала X, Y, Z јер су канали истих димензија а термистори имају исте вредности номиналне отпорности R_0 и експоненцијалног фактора $B=3356$ K. Према томе, несигурност мерења брзине ветра код сензорског система D је у основи иста као у 9.3.3. и износи око 3 %. Међутим, одређивање вектора брзине ветра преко калибрационих кривих графичким методама може унети нове несигурности: интерполисане криве за различите температуре ваздуха T са кораком по $0,1$ °C и интерполисане криве за угао струјања ветра α са кораком од 1° између мерених кривих. То може повећати несигурност одређивања брзине ветра као вектора за још 1 %. На крају код нагибне равни од 30° према хоризонту мери се и нагибни угао са несигурношћу од 0,5 % тако да брзина ветра у векторском облику \mathbf{v} (v_x, v_y, v_z) има компоненте вектора по X, Y, Z осама v_x, v_y, v_z као $(v \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos \alpha_x, v \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos \alpha_y, v \cdot \cos 60^\circ)$, респективно и несигурност мерења мању од 4,5 %. Добијена несигурност мерења за веће брзине ветра могла би да достигне 5 % као код већине комерцијалних анемометара са пропелерима или ултразвучних, микрофонских и других модерних анемометара.

Мерење струјних одзива $I_{30x}, I_{30y}, I_{30z}$ на брзину ветра \mathbf{v} (v_x, v_y, v_z) за прототип D се врши помоћу три прецизна мултиметра као и сетова калибрационих кривих за мерење подопсеге температуре ваздуха. Прототип сензорског система D нема појачавачку електронику, нити електронику за линеаризацију одзива, ради у штедном режиму и троши мање од $0,5$ W / 30 s по каналу кад ради у циклусима или на упит. Технолошким развојем тј. аутоматизацијом мерења помоћу аквизиционе картице, калибрацијом у реалним условима у неколико тачака у односу на референти анемометар, моделовањем кривих и преносом и обрадом података помоћу рачунара могуће је сензорски систем D претворити у паметан сензорски систем и смањити несигурност мерења.

9.3.6. Упоредивање сензорских система за мерење брзине ветра

Сензорски системи за мерење брзине ветра (анемометри) раде на различитим принципима како је приказано у одељку 5.6. Упоредивање њихових основних карактеристика као што су: опсег промене брзине ветра, температуре ваздуха, несигурност мерења и потрошња енергије приказани су у табели 16. За упоређивање су изабрани следећи комерцијални сензорски системи који раде на бази угрејане жице, куп-механичког кола, пропелера, ултразвучног таласа и на бази одвођења топлоте (1.-5. респективно):

1. Hot -wire anemometer 6531 Kanomax, JJS Tech. 2. Propeller anemometer 27106T Ammonit GmbH 3. Cup-type class A Adolf Theis GmbH, са грејачем 24 V / 25 W. 4. 3D-Sonic Anemometer, Davis Instruments (Cn), 5. Троосни сензорски систем D - прототип са сегментираним термисторима.

Табела 16 . Поређење сензорских система за мерење брзине ветра

Принцип рада	Брзина ветра [m/s]	Температурни опсег [°C]	Несигурност мерења [%]	Потрошња енергије [V/mA]
(1)- угрејана жица	0,1-30	0-60	± 2	9 /100
(2)- пропелер	0,4-35	-50, +50	± 1	9 /10
(3)- механички (куп)	0,3-75	-50, +80	1	3,3-42 /100
(4)- ултразвучни	0-50	-40, +70	± 2	9-30 /55
(5)- одвођење топлоте *	0-30	-20, +40	<4,5	8-24 / 60

* Троосни сензорски систем D-прототип [101].

Сензорски системи од 1. до 4. у табели 16. имају аналогне и дигиталне излазе. Њихови аналогни излази су линеаризовани; сви мере температуру ваздуха а системи 2., 3. и 4. мере и влагу. Троосни сензорски систем D као прототип даје само аналогне излазе који нису линеаризовани, његова несигурност мерења произилази из сабирања несигурности као у претходном одељку. Сви сензорски системи од 1. до 4. у табели 16. су дигитализовани и калибришу се помоћу куп-оптомеханичког анемометра у више тачака, у сваком мерном подопсегу у фабричким лабораторијама и проверавају у реалним условима (ван лабораторија). Ако би се иста техника калибрације (упоређивања са куп - механичким референтним анемометром) применила и на троосни сензорски систем D уз дигиталну аквизицију података и обраду одзива наменским софтвером несигурност мерења би могла да се сведе на 2 % до 3 %.

10. ЗАКЉУЧАК

Предвиђени план истраживања докторске дисертације који је обухватао израду и карактеризацију сензорских елемената (сегментираних NTC термистора) и електричну анализу рада три различите врсте сензорских система је реализован у целини. Спроведена је оптимизација и моделовање овако формираних сензорских система којом је заокружена прва фаза истраживања на прототиповима и створене основе за развој и израду индустријских прототипова.

1) Дебелослојном (хибридном) технологијом реализоване су две врсте NTC термистора (сензорских елемената сегментиране конструкције) штампањем термисторских пасти (NiMn_2O_4 и $\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$). Синтеровање дебелих слојева на $850\text{ }^\circ\text{C} / 10\text{ min}$ вршено је у тунелској пећи на хибридној линији. Структурна карактеризација материјала спроведена је методом рендгенске дифракције X - зрака и скенирајућим електронским микроскопом.

2) Мерење електричних карактеристика две врсте сегментираних NTC дебелослојних термистора вршено је на собној температури ($20\text{ }^\circ\text{C}$): номинална електрична отпорност и капацитивност на сегментима. На собној температури вредност номиналне отпорности сегментираног термистора димензија $50,8\text{ mm} \times 6,35\text{ mm} \times 0,5\text{ mm}$ је око $7215\ \Omega$, капацитивност око 280 pF , док је за мањи сегментирани термистор димензија $25,4\text{ mm} \times 6,35\text{ mm} \times 0,5\text{ mm}$ отпорност око $631\ \Omega$, а вредност капацитивности око 105 pF (капацитивности на 1 kHz).

3) Приказана су мерења зависности електричне отпорности R од температуре T у клима комори у опсегу од $0\text{ }^\circ\text{C}$ до $+50\text{ }^\circ\text{C}$. Применом Steinhart-Hart-ове једначине за термисторе одређене су вредности експоненцијалног фактора B за оба термисторска материјала: $B_{10/30}=3863\text{ K}$ (NiMn_2O_4) и $B_{10/30}=3356\text{ K}$ ($\text{Cu}_{0,2}\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{1,0}\text{Mn}_{1,3}\text{O}_4$).

4) Мерење струјне карактеристике $I(t)$ у функцији времена t при константном напону U и струјно напонске карактеристике $I(U)$ у функцији од температуре T вршено је у клима комори за сегментирани термистор димензија $25,4\text{ mm} \times 6,35\text{ mm} \times 0,5\text{ mm}$. Одређивање максималне и минималне струје термистора при самогревању ($I_{30\text{max}}$, $I_{30\text{min}}$) тј. радне тачке при константном напону U вршено је за различите температурне подопсеге: од $1\text{ }^\circ\text{C}$ до $35\text{ }^\circ\text{C}$ за систем А, и од $5\text{ }^\circ\text{C}$ до $25\text{ }^\circ\text{C}$ за систем В (за воду) и од $-20\text{ }^\circ\text{C}$ до $40\text{ }^\circ\text{C}$ за системе С и D (за ваздух).

5) Мерење статичких карактеристика сензора на бази одвођења топлоте у одсуству кретања флуида при различитим периодима самогревања / хлађења вршено је при различитим температурама воде и ваздуха. На основу тих мерења одређени су константни радни напони U у подопсезима (у функцији од температуре флуида са кораком од $5\text{ }^\circ\text{C}$ за воду и $10\text{ }^\circ\text{C}$ за ваздух), опсег промене струје самогревања термистора I и снага P која се дисипира на сегментираним термисторима и преноси се кондукцијом на околину (вода, ваздух).

При повећању температуре воде за сензорски систем А 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 В напони опадају од 20 V до 10 V, максималне струје расту од 59 mA до 66 mA а снага опада од 1,18 W до 0,66 W.

6) Реализован је градијентни сензор температуре - сензорски систем од 10 сегментираних термистора, тј. низ од 40 сегмената на 550 mm дужине (прототип GST-1). Обављено је снимање калибрационе криве прототипа GST-1 у клима комори и мерење температурног профила тла а затим спроведена процена влаге. Електрична отпорност сегмената је конвертована у температуру помоћу Steinhart-Hartove једначине. На основу дневних профила температуре тла $T(d)$ мерених у 7.00 h и 14.00 h свакодневно у 40 тачака до дубине $d=550$ mm формиран су недељни, месечни и годишњи температурни профили тла (снопови кривих). Паралелно са мерењем дневних профила мерена је температура ваздуха T_a и посматрана је корелација између надземних метео услова и подземних профила температуре. Вршена је корелација између топлотне дифузивности $D(d)$ добијене на основу температурних профила тла и садржаја воде у тлу $\theta(d)$ по дубини тла d , на основу које је одређена зависност између садржаја воде и топлотне дифузивности $\theta(D)$.

Вршена је корелација температурних профила у земљи са метеоролошким променама у ваздуху изнад тла на 2 m висине у току целе 2018. године. На основу знака градијента температуре тла dT/dz 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 $dT/dz = 0$. Несигурност мерења температуре T термисторским низом је процењена на мање од 0,1 °C. Моделовање годишњих температурних профила тла за криве на површини $d = 0$ mm и на дубини $d = 550$ mm вршено је полиномима вишег реда.

На дневним, недељним, месечним и годишњим дијаграмима температурног профила тла сниманим у 7.00 h /14.00 h током 2018. године уочене су и описане карактеристичне релаксационе и цикличне промене температурних профила земље. Прогноза промене температурних профила је могућа на основу препознавања облика недељних и месечних профила и њихове цикличности током године. Детаљно мерење температурних профила тла по дубини $T(d)$ и истовремена процена садржаја воде по дубини $\theta(d)$ потребни су ради праћења климатских промена у подземној метеорологији, клијања семена, развоја и раста биљака у пољопривреди. Током зиме минимална регистрована температура на 550 mm дубине достиже око 5 °C / 6 °C, док током лета максимална регистрована температура на овој дубини је око 22 °C / 25 °C за јутарње / поподневне температурне профиле респективно.

7) Вршено је истраживање, развој, оптимизација, карактеризација и анализа рада сензорског система за мерење различитих (стационарних и нестационарних) протока воде у цевима применом сегментираних термистора са редукованим димензијама који се самозагревају (NTC паста $Cu_{0,2}Ni_{0,5}Zn_{1,0}Mn_{1,3}O_4$, димензије термистора 25,4 mm x 6,35 mm x 0.5 mm). Реализована су два прототипа сензорског система протока воде: сензорски систем А који ради у штедном режиму напајања (30 s самозагревања / 90 s природног хлађења) који је

намењен за мерење стационарних протока воде и сензорски систем В са континуалним напајањем који мери и стационарне и импулсне протоке.

Мерени су и анализирани електрични одзиви за сензорске системе А и В у функцији од протока воде $I(Q)$. Вршена је оптимизација радних тачака по мерним подопсезима док је температура долазне воде T_w мерена као параметар. Температурни одзиви $T(Q)$ за сензорски систем А и В су одређени применом Steinhart-Hart једначине на струјни одзив $I(Q)$ за стационарне протоке. За импулсне протоке облика квадратне или троугаоне побуде мерени су струјни одзиви $I(Q,t)$ помоћу сензорског система В у реалном времену t и претворени у температурни одзив $T(Q,t)$ тј. температурну петљу термистора који се самозагрева. Ова посредна мерења прелазних стања допринела су разјашњењу прелазних појава при прекидачком протоку воде.

Прво је развијен и окарактерисан сензорски систем А који ради у штедном режиму (самозагревање термистора сопственом струјом током 30 s, а затим искључење напајања и природно хлађење током 90 s) који троши од 20 mA до 40 mA а напаја се константним напоном од 6 V до 24 V зависно од подопсега температуре долазне воде. Систем се може користити за мерење протока односно брзине воде у рекама по дубини, лако се преноси и поставља, а мери и температуру воде по дубини. Мерене су калибрационе криве тј. струјни одзив у функцији од протока воде $I_{30}(Q)$ непосредно пред искључење напајања ($t=30$ s). Мерни опсег сензорског система А је подељен на подопсеге на сваких 5 °C температуре долазне воде и одређени су оптимални константни напони напајања термистора за сваки подопсег. Сензорски систем А мери протоке воде од 0,003 l/s до 0,3 l/s, утврђена је несигурност мерења од 1,5 % до 3 %, и потребна снага од 0,5 W до 1W у радном режиму током 30 s а затим се хлади 90 s до почетног стања које одређује температура долазне воде.

После сензорског система А развијен је и карактерисан прототип сензорског система В са континуалним напајањем сегментираниог термистора који се самозагрева сопственом струјом. Мерени су струјни одзиви $I(Q,t)$ за стационарне протоке и променљиве протоке воде $Q(t)$ у цевима у свакој секунди. Мерни опсег сензорског система В је био такође од 0,003 l/s до 0,3 l/s, утврђена је несигурност мерења од 1,5 % до 3 %, и потребна снага од 0,5 W до 1 W. Помоћу овог система мерени су струјни одзиви $I(Q,t)$ на тест секвенце са густо распоређеним импулсима протока воде као на кућном водоводу. Вршено је упоредно мерење улазног протока воде комерцијалним ултразвучним сензором и сензорским системом В. Упоредна мерења два сензорска система дала су могућност да се анализирају струјни одзиви $I(Q,t)$, конвертују у проток $Q(t)$ помоћу калибрационих кривих снимљених за стационарне услове протока воде.

Мерење температурног одзива система А и В и температурне петље сензорским системом В вршено је тако што су тренутни струјни одзиви у функцији од протока $I(Q,t)$ помоћу Steinhart-Hartове једначине конвертовани у тренутну температуру $T(t)$ на термистору који се самозагрева и преноси топлоту на воду. Термички одзив $T(Q)$ мерен је за стационарне и нестационарне (импулсне) протоке воде у цевима. Код импулсних протока тренутна температура термистора $T(t)$ касни у односу на тренутни проток воде $Q(t)$ мерен

ултразвучним сензором па се образује температурна петља на сегментираним термистору. При томе одзив на термистору касни 4-5 s на предњој ивици импулса при укључењу протока, док на задњој ивици касни око 20 s после искључења протока због споријег повратка у почетно стање.

За сензорске системе А и В вршено је моделовање струјних $I(Q)$ и температурних $T(Q)$ одзива коришћењем једначина топлотне равнотеже на граници термистор / вода при чему је показано добро слагање са експерименталним кривама.

Сprovedено је поређење прототипова сензорских система А и В у односу на комерцијалне системе који мере протоке реда 0,01 - 0,5 l/s и раде на другим принципима. Предности оба сензорска система А и В су једноставност израде: без покретних делова, не захтевају појачавачку електронику, струјни одзиви на проток воде се мере у mA а снага дисипације на термистору је мања од 1 W. Несигурност мерења је мања од 3 %, мерења могу да се аутоматизују аквизиционом картицом. Системима је могуће пратити прелазна стања настала при учестаном прекидању протока воде, а доградњом одговарајућег софтвера могу се трансформисати у паметне сензоре протока и на тај начин бити конкурентни са комерцијалним сензорским системима.

8) Користећи сегментирани термисторе штампане помоћу нискоомске термисторске пасте на бази $Cu_{0,2}Ni_{0,5}Zn_{1,0}Mn_{1,3}O_4$ димензија 25,4 mm x 6,35 mm x 0,5 mm реализовани су једноосни сензорски систем С и троосни сензорски систем D за мерење брзине ветра. Оба сензорска система раде на бази одвођења топлоте сегментираних термистора у штедном режиму напајања у циклусима 30 s самозагревања / 90 s природног хлађења. Мерни опсег је подељен на неколико подопсега на сваких 10 °C температуре ваздуха.

Струја термистора се мења од 14,5 mA до 24 mA, док је напон константан и зависно од подопсега износи од 8 V до 25 V. Сензорски систем С је једноосни (један ваздушни канал) и намењен је за мерење стационарних струјања ветра. Једноосни сензорски систем С мери само интензитет брзине ветра и потребно је да се окреће у правцу ветра да би се постигао максимум струјног одзива, док сензорски систем D мери вектор брзине ветра \mathbf{v} (v_x, v_y, v_z) у X,Y,Z простору (интензитет, правац, углове према осама).

Прво је реализован прототип сензорског система С и извршена оптимизација радне тачке у функцији од брзине ветра $\ln(v)$ за температурне подопсеге при струјању ваздуха (ветра). Потребна снага зависи од температурног подопсега и износи 0,2 W до 0,5 W / 30 s. Мерни опсег је био од 0 m/s до 8 m/s, а са редукторима протока ваздуха кроз канал (са односом 4:1) преко 30 m/s. Праћена је зависност струјног одзива $I(v, \alpha)$ једноосног сензорског система С у функцији од угла α при коме струји ваздух (ветар) у односу на главну осу ваздушног канала. Анализирана је снага дисипације термистора P_{30} и струја термистора I_{30} у последњој секунди загревања пред искључење напајања као и механизми преноса топлоте на ваздух. При промени температуре ваздуха од -20 °C до 40 °C максимална струја термистора расте од 14,5 mA до 24 mA а максимална снага опада од 0,36 W до 0,19 W.

Вршена је карактеризација једносног анемометра са сегментираним термистором у улози сензорског елемента као први корак у реализацији троосног анемометарског система. Мерене су и анализирани калибрационе криве $I(v, T)$ струје термистора у функцији брзине ветра v и температуре ваздуха T као параметара. Осим тога мерен је и анализиран утицај угла α под којим струји ваздух (ветар) у односу на канал са термистором који се самозагрева сопственом струјом (при константном напону напајања) на калибрационе криве $I(v, T, \alpha)$. Затим је мерен утицај редуктора протока ваздуха (однос 4:1) на калибрационе криве и повећање мерног опсега једносног анемометра.

На крају је реализован прототип троосног анемометра са уграђеним X, Y, Z сегментираним термисторима са редукованим димензијама за мерење вектора брзине ветра (интезитет, правац и углови у односу на координатне осе). Снимане су калибрационе криве $I(v, T, \alpha)$ прво у x-y равни за Z-канал у вертикалном положају (раван терен) и за нагибни терен где је Z-канал под углом у односу на вертикалну осу. На основу мерења струје термистора у X, Y, Z каналима и калибрационих кривих одређиван је интезитет, правац и углови вектора брзине ветра у односу на x, y, z осе.

Троосни сензорски систем D такође ради у циклусима 30 s / 90 s има конструкцију која се састоји од три ваздушна канала у једном кућишту који су постављени у X, Y, Z простору. Пошто се користе исти принципи као за сензорски систем C и сегментирани NTC термистори из исте серије као за сензорске системе A, B и C, термисторске карактеристике сензорских елемента су практично исте. Мерни опсег је подељен на неколико подопсега на сваких 10 °C температуре ваздуха, а потребна снага зависи од температурног подопсега и износи од 0,2 W до 0.5 W за 30 s. Мерни опсег од 0 m/s до 8 m/s се може редукторима протока ваздуха кроз канал (са односом 4:1) повећати на преко 30 m/s. Струјни одзиви по ваздушним каналима са сегментираним термисторима који се самозагревају $I(v, T, \alpha)$ су различити у функцији угла вектора брзине ветра $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ у односу на X, Y, Z осе. На основу мерења струја самозагревања три термистора I_x, I_y, I_z рачуна се интезитет брзине ветра v , углови према осама $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ и компоненте вектора брзине ветра $\mathbf{v} (v_x, v_y, v_z)$ по осама. Несигурности прототипова сензорског система C и D износе 3 % и 4,5 %, респективно, а упоређиване су са несигурностима мерења код комерцијалних сензорских системима.

Сprovedено је моделовање одзива једносоног сензорског система C тј. моделовање калибрационих кривих за отворен канал и угао ветра $\alpha=0$ у односу на осу ваздушног канала. Физички модел сензорског система добијен је на основу једначине топлотне равнотеже за термистор који се самозагрева у струји ваздуха, по аналогији са сензорским системима за мерење протока воде. Постигнуто је поклапање по облику моделованог одзива и мереног одзива за сензорске системе C и D; оба одзива су линеарне функције од $\ln(v)$ брзине ветра. У модел су унете и модификације за струјање ваздуха под углом α . За случај употребе редуктора и промене угла струјања ваздуха (ветра) функција одзива сензорског система C постаје сложенија јер зависи и од угла и од брзине ветра као $\ln(v \cdot \cos \alpha)$, а за практичну примену предложено је фитовање мерених кривих полиномом другог реда.

Правци даљег истраживања на сензорским системима

У овој докторској дисертацији приказано је истраживање три врсте сензорских система са NTC сегментираним термисторима. Надоградња ових система у комерцијалне, паметне и конкурентне сензорске системе подразумева анализу тржишта, инвестиције, дефинисане пројекте за сваки тип, увођење нових истраживања у области дигиталне електронике и телекомуникација. У наставку истраживања предлажу се следеће теме истраживања, развоја и надограде досадашњих прототипова:

Аутоматизација мерења аквизиционим картицама, обрада и приказивање резултата подразумева израду прилагодних степена према аквизиционој картици за сензорске системе В и D (делитељи напона, фиксни отпорници за мерење струје) док код сензорског низа за мерење температурног профила тла GST-1 подразумева адресирање парица (40 мерних извода) према аквизиционој картици. Други приступ је развој наменског микросистема са аквизицијом, софтвером за процесирање података, и дисплејем какав се примењује код сензорских преносних система. Овај приступ би био погодан за сензорске системе А и С који раде у штедном режиму напајања.

Мерења на удаљеним местима подразумева за сензорске системе типа В, D и GST-1, напајање помоћу акумулатора и соларног панела, затим пренос дигиталних података бежичним путем до центра где се резултати електричних мерења обрађују и претварају у неелектричне величине, приказују и анализирају. Мерење на удаљеним местима сензорским низом за мерење температурног профила тла подразумева и врсту, састав и структуру горњег слоја земље и обавезно мерење атмосферских стања да би тумачење резултата било целовито.

Брза калибрација сензорских система је нов захтев везан за тестирање и рекалибрацију после неког периода експлоатације сензорских система као уређаја. У овој дисертацији приказана је калибрација, моделовање и анализа несигурности за сензорске системе GST-1, А, В, С и D. На основу досадашњих истраживања стечена су сазнања која се могу искористити да се убрза калибрација сензорских система. Уместо великог броја тачака на калибрационим кривама и дуготрајних мерења у току више година која су до сада спроведена током истраживања и карактеризације прототипова, могуће је као и код комерцијалних произвођача користити референтне сензоре и баждарити криве у само неколико тачака, а помоћне криве моделовати и интерполирати. Слично се поступа и код рекалибрације оваквих система.

Паметни сензорски системи настају применом сензорских елемента, електронике и обраде података микропроцесором (мање сложени системи) или рачунаром (сложени системи) са мерним софтвером и интелигентним софтвером. За сензорске системе GST-1, А, В, С и D потребна је база података где се поред мерених података уносе претходно измерене калибрационе криве, модели за прерачунавање мерених електричних величина у неелектричне, једначине за фитовање и интерполацију помоћних кривих калибрације и слично. Анализа стања, препознавање облика одзива и друге методе у вештачкој интелигенцији користе се код сложенијих сензорских система. Овакви сензорски системи који аутоматски мере, обрађују, приказују и анализирају стања и шаљу поруке кориснику су вишегодишњи тимски посао који превазилази истраживачки рад на прототиповима приказаним у овој докторској дисертацији.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Feteira, Negative Temperature Coefficient Resistance (NTCR) Ceramic Thermistors: An Industrial Perspective, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 92 (5), 2009, pp. 967-983.
- [2] W. Shockley, The Theory of p - n Junctions in Semiconductors and p - n Junction Transistors, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 28 (3), 1949, pp. 435-489.
- [3] R. C. Buchanan, Ceramic Materials for Electronics, Ch.6: Ceramic Sensors, Marcel Dekker, New York and Basel, 1986, pp. 193-225.
- [4] S. Sahoo, S. K. S. Parashar and S. M. Ali, CaTiO₃ Nano - Ceramic for NTCR Thermistor Based Sensor Application, *Journal of Advanced Ceramics*, Vol. 3(2), 2014, pp.117-124.
- [5] F. Guan, H. Zhang, A. Chang, P. Zhao and B. Zhang, Effect of CaO - Doped in NiMn₂O₄ – LaMnO₃ Composite Ceramics on Microstructure and Electrical Properties, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 23(9), 2012, pp.1728-1733.
- [6] H. M. Zhang, F. Guan, A. M. Chang and L.J. Zhao, Preparation and Characterization of NTC NiMn₂O₄-La_{1-x}Ca_xMnO₃(0≤x≤0.3) Composite Ceramics, *Advanced Materials Research*, Vol. 716 (78), 2013, pp.78-83.
- [7] T. K. Fujiwara, T. Yamaguchi "Electrical Properties of La(Cr,Mn)O₃ NTC Materials", *Key Engineering Materials*, Vol. 485, 2011, pp. 237-240.
- [8] X. Wang, Z. Li, W. Yan, P. Wang, H. Zhang, Electrical Properties of Nb / Al-Doped CuO-Based Ceramics for NTC Thermistors, *Processing and Application of Ceramics*, Vol. 14 (1), 2020, pp. 47-55.
- [9] W. S. Lee, C. Y. Su, Y. C. Lee, S. P. Lin and T. Yang, Effects of Dopant on the Dielectric Properties of CaZrO₃ Ceramic Sintered in a Reducing Atmosphere, *Japan. Journal of Applied Physics*, Part 1, Vol. 45 (7), 2006, pp. 5853-5958.
- [10] M. Z. Hu, Y. D. Hao, Y. Y. Denget, et al., Investigation on the Effects of SiO₂ Content on the NTC Thermistor Properties of Ce_{1.2(1-x)}Mn_{1-x}Si_x System, *Key Engineering Materials*, Vol. 768, 2018, pp. 92-96.
- [11] Y. Luo, X. Liu, High Temperature NTC BaTiO₃ - Based Ceramic Resistors, *Materials Letters*, Vol. 59 (29-30), 2005, pp. 3881-3884.
- [12] D. L Johnson, Fundamentals of the Sintering of Ceramics, *Processing of Crystalline Ceramics: Materials Science Research - book series (MSR)*, Vol. 11, 1978, pp.137-149.
- [13] S. Freiman, Global Roadmap for Ceramic and Glass Technology, Wiley & Sons, 2007, pp. 583-584.
- [14] C.C. Wang, S. A. Akbar, U. W. Chen, J. R. Schorr, High-Temperature Thermistors Based on Yttria and Calcium Zirconate, *Sensors and Actuators A*, Vol. 58, 1997, pp. 237– 243.
- [15] T.A. Ring, Fundamentals of Ceramic Powder Processing and Synthesis, Part II: Ceramic Powder Synthesis, Elsevier Inc., 1996, pp. 81-138,
- [16] M .M. Ristić, S. Dj. Milosević, Frenkel's Theory of Sintering, *Science of Sintering*, Vol.38, 2006, pp. 7-11.
- [17] G.S.Upadhyaya, Sintering Fundamentals, Materials Science Forum, *Trans Tech Publications*, Vol. 624, 2009, pp. 13-27.

- [18] R. M. German, Sintering Theory and Practice, Ch.3. Solid State Sintering Fundamentals, Wiley, 1996, pp. 67-115.
- [19] Y. Y. Fang, Sintering of Advanced Materials, Ch.5. S. J. L. Kang, Liquid Phase Sintering, Elsevier, 2018, pp. 110-129.
- [20] G. Bosson, F. Gutmann, L.M. Simmons, A Relationship Between Resistance and Temperature of Thermistors, *Journal of Applied Physics*, Vol. 21, 1950, pp. 1267-1268.
- [21] J. S. Steinhart, S. R. Hart, Calibration Curves for Thermistors, *Deep - Sea Research and Oceanographic Abstracts*, Vol. 15 (4), 1968, pp. 497-503.
- [22] T. McGee, Principles and Methods of Temperature Measurement, Ch. 9, John Wiley & Sons, 1988, pp. 203-212.
- [23] O. S. Kasap, Principles of Electronic Materials and Devices (3rd Ed.), Mc-Graw Hill, 2006, pp. 126-129.
- [24] A. C. Fowler, I. Frigaard, S. D. Howison, Temperature Surges in Current - Limiting Circuit Devices, *Journal of Applied Mathematics (C)*, Vol. 52 (4), 1992, pp. 998-1011.
- [25] B. G. Liptak, Instrument Engineers Handbook, Vol. 1 (4th Ed.), Thermistors 4.12, RC Press, 2003, pp. 665-671.
- [26] E. D. Macklen, Thermistors; Miscellenous Applications of NTC Thermistors, Electrochem., Publications, Glasgow, 1979, pp.103-125.
- [27] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors (2nd Ed.), Ch.16. Thermistor Sensors, Springer, 2010, pp. 532-549.
- [28] V. A. M. Brabers, J. C. J. M. Terhell, Electrical Conductivity and Cation Valencies in Nickel Manganite, *Phys. Status Solidi A*, Application and Mater.Science, Vol.69 (1), 1982, pp. 325-332.
- [29] E. D. Macklen, Electrical Conductivity and Cation Distribution in Nickel Manganite, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol.47 (11), 1986, pp. 1073-1079.
- [30] B. Gillot, R. Legros, R. Metz, A. Rousset, Electrical Conductivity of Copper and Nickel Manganites in Relation with the Simultaneous Presence of Mn³⁺ and Mn⁴⁺ Ions on Octahedral Sites of the Spinel Structure, *Solid State Ionics*, Vol. 51(1-2), 1992, pp. 7-9.
- [31] M.N.Muralidharan, P. Rohini, E. Sunny, K. Dayas, A. Seema, Effect of Cu and Fe Addition Addition on Electrical Properties of Ni – Mn Co - O NTC Thermistor Compositions, *Ceramics International*, Vol. 38, 2012, pp. 6481-6486.
- [32] J. M. A. Almeida, C. T. Meneses, A. S. de Menezes, R. F. Jardim, J. M. Sasaki, Synthesis and Characterization of NiMn₂O₄ Nanoparticles Using Gelatin as Organic Precursor, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320 (14), 2008, pp. 304-307.
- [33] H. W. Jinxing, W. L. Yu, Y. Z. Dewen, H. T. Li, Facile Synthesis of NiMn₂O₄ Nanosheet Arrays Grown on Nickel Foam as Novel Electrode Materials for High-Performance Supercapacitors, *Ceramics International*, Vol. 42 (13), 2016, pp. 14963-14969.
- [34] D. Sarma, P. Mahata, N. Srinatarajan, Synthesis of a Mixed-Metal Spinel, NiMn₂O₄, through Site-Selective Substitution in MOF, [(NiMn₂){C₆H₃(COO)₃]₂]: Synthesis, Structure and Magnetic Studies, *Current Science*, Vol.103(10), 2012, pp. 1185-1192.
- [35] T. O. L. Sunde, T. Grande, M. A. Einarsrud, Modified Pechini Synthesis of Oxide Powders and Thin Films, Handbook of Sol - Gel Science and Technology, Springer, 2016, pp. 1-30.
- [36] D. Alburquenque, L. Troncoso, J. C. Denardin, A. Butera, K. D. Padmasree, J. Ortiz, F. Herrera, J. F. Marco, J.L. Gautier, Structural and Physicochemical Properties of Nickel Manganite NiMn₂O₄ - Synthesized by Sol - Gel and Ultra Sound Assisted Methods, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 672, 2016, pp. 307-316.

- [37] D. G. Wickham, Solid-Phase Equilibria in the System NiO-Mn₂O₃-O₂, *Journal of Inorganic Nuclear Chemistry*, Vol.26 (1964), pp. 1369-1377.
- [38] J. Jung, J. Topfer, J. Mürbe, A. Feltz, Microstructure and Phase Development in NiMn₂O₄ Spinel Ceramics During Isothermal Sintering, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 6 (6), 1990, pp. 351-359.
- [39] M. M. Vakiv, O. Shpotyuk, V. O. Balitska, Ageing Behavior of Electrical Resistance in Manganite NTC Ceramics, *Journal of The European Cer. Society*, Vol. 24, 2004, pp.1243-1246.
- [40] J. P. Holmes, G. R. Loasby, Handbook of Thick Film Technology, Electrochem. Publications Ltd., 1976, pp. 5-35.
- [41] M. Prudenziati, Handbook of Sensors and Actuators (1st Ed.), Thick Film Sensors, Section III - Thermal Sensors, Elsevier, 1994, pp. 127-167.
- [42] H. Schulze, J. Li, E. C. Dickey, S. T. Mc Kinstry, Synthesis, Phase Characterization, and Properties of Chemical Solution-Deposited Nickel Manganite Thermistor Thin Films, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 92 (3), 2009, pp. 738-744.
- [43] M.Lee, M.Yoo, Detectivity of Thin-Film NTC Thermal Sensors, *Sensors and Actuators-A Physical*, Vol. 96 (2), 2002, pp. 97-104.
- [44] T. Larbi, A. Amara, B. Ouni, A. Inoubli, M. Karyaoui, A. Yumak, F.Saadallah, K.Boubaker, M.Amlouk, Physical Investigations on NiMn₂O₄ Sprayed Magnetic Spinel for Sensitivity Applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 387, 2015, pp. 139-146.
- [45] J. Bhagwan, S.Rani, V.Sivasankaran, K. L. Yadav, Y.Sharma, Improved Energy Storage, Magnetic and Electrical Properties of Aligned, Mesoporous and High Aspect Ratio Nanofibers of Spinel - NiMn₂O₄, *Applied Surface Science*, Vol. 426, 2017, pp. 913-923.
- [46] J. E. Sergent, C. A. Harper, Hybrid Microelectronics Handbook, Ch. 3. Thick Film Materials and Processes, McGraw-Hill, 1995, pp. 11-29.
- [47] M. Prudenziati, J. Hormadaly, Printed Films : Materials Science and Applications in Sensors, Electronics and Photonics, Ch.1. Technologies for Printed Films, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2012, pp. 3-29.
- [48] A. Hobby, Printing Thick Film Hybrids, DEK Printing Machines Ltd.. Sun Chemical, 1997, pp. 1-15.
- [49] Z. Liu, D. Chung, Burnout of the Organic Vehicle in an Electrically Conductive Thick-Film Paste, *Journal of Electronic Materials*, Vol. 33, 2004, pp. 1316-1325.
- [50] S. Jagtap, S. Rane, S. Gosavi, Synthesis, Characterization and Fabrication of NTC Thick Film Thermistor Using Lead Free Glass Frit, *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. A6 (11-12) , 2016, pp. 301-309.
- [51] D. J. Nabatian, A Study of Factors Affecting Characteristics of NTC Thermistors, Proceed. of 35th Intern. Symposium on Microelectronics, IMAPS, Denver, Colorado, 2002, pp. 433-436.
- [52] J. Zhong, M. Yi, H. H. Bau, Thick Film Thermistors Printed on Low Temperature Co-fired Ceramic Tapes, *Bulletin American Ceramic Society*, Vol.80 (10), 2001, pp. 39-42.
- [53] H. B. Sachse, Semiconducting Temperature Sensors and Their Applications, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975, pp. 6-22.
- [54] C. Yuan, Y. Yang, Y. Luo, L. Yang, G. Chen and X. Liu, Electrical Properties of Ba_{0.7}Bi_{0.3}Fe_{0.9}Sn_{0.1}O₃-BaCo^{II}_{0.02}Co^{III}_{0.04}Bi_{0.94}O₃ Thick Film Thermistors with Wide - Range Adjustable Parameters, *Bulletin Material Science*, Vol. 37 (2), 2014, pp. 263-271.

- [55] S. Jagtap, S. Rane, S. Gosavi, D. Amalnerkar, Study on I–V Characteristics of Lead Free NTC Thick Film Thermistor for Self Heating Application, *Microelectronic Engineering*, Vol. 88 (1), 2011, pp. 82-86.
- [56] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications (3rd Ed.), Springer 2004, pp. 3-11.
- [57] J. Vetelino, A. Reghu, Introduction to Sensors (1st Ed.), CRC Press, 2011, pp 1-25.
- [58] D. A. Keating, M.J. Usher, Sensors and Transducers: Characteristics, Applications, Instrumentation, Interfacing (2nd Ed.), Palgrave MacMillan, 1996, pp 5-19.
- [59] P. Ripka, A. Tipek, Modern Sensors Handbook, Ch.8. Temperature Sensors, Wiley - ISTE, 2007, pp. 347-393.
- [60] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, J. McGhee, Temperature Measurement (2nd Ed.), Ch.4. Resistive Thermometers, Wiley, 2001, pp. 85-102.
- [61] R. J. Berry, Platinum Resistance Thermometry in the Range 630-900° C, *Metrologia*, Vol.2, 1966, pp. 80-90.
- [62] J. Scholz, T. Ricolfi, Sensors, A Comprehensive Survey, Vol.4. Thermal Sensors, Ch 3. Resistance Thermometers (L. Crovini), Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 69-119.
- [63] R. E. Bentley, The Use of Elemental Thermocouples in High-Temperature Precision Thermometry, *Measurement*, Vol.23, 1998, pp. 35-46.
- [64] R. J. Rosenberg, Temperature Measurement on the Job Site Using RTDs and Thermocouples, *ISA Transactions*, Vol 33, 1994, pp. 287-292.
- [65] A. Mangano, G. Goggia, Stability of K-, N- and S- Type Thermocouples in the Temperature Range from 0°C to 600°C, *Measurement*, Vol. 12, 1993, pp. 171-182.
- [66] S. K. Manjihi, R. Kumar, Performance Assessment of K - Type, E - Type and J - Type Coaxial Thermocouples on the Solar Light Beam for Short Duration Transient Measurements, *Measurement*, Vol.146, 2019, pp. 343-355.
- [67] K. G. Kreider, F. D. Meo, Platinum / Palladium Thin-Film Thermocouples for Temperature Measurements on Silicon Wafers, *Sensors and Actuators A*, Vol.69, pp. 46-52.
- [68] G. M. Meijer, Thermal Sensor Based on Transistors, *Sensors and Actuators*, Vol. 10, 1986, pp. 103-125.
- [69] D. P. De Witt, G. D. Nutter, Theory and Practice of Radiation Thermometry (1st Ed.), Ch.4. Radiation Thermometers: Design Principles and Operating Characteristics, Wiley, 1988. pp. 231-337.
- [70] L. Ma, J. Yang, J. Nie, Two Forms of Wien's Displacement Law, *Latin - American Journal of Physics Education*, Vol. 3 (3), 2009, pp. 566-568.
- [71] F. Kreith, R. M. Manglik, M. S. Boh, Principles of Heat Transfer (7th Ed.), Ch.1. Basic Models of Heat Transfer, CENGAGE Learning, 2011, pp. 9-17.
- [72] J. H. Lienhard V, J. H. Lienhard IV, A Heat Transfer Textbook (3rd Ed.), Part I - General Problem of Heat Exchange, Ch.1. Introduction: Models of Heat Transfer, Published by J.H Lienhard, Cambridge MA, 2000, pp. 12-20.
- [73] D. R. Poirer, G. H. Geiger, Transport Phenomena in Materials Processing, Ch-9. Conduction of Heat in Solids, Springer 2016, pp. 281-327.
- [74] P. Bockh, T. Wetzel, Heat Transfer: Basics and Practice, Ch.2. Thermal Conduction in Static Materials, Springer, 2012, pp.17-32.
- [75] O. M. E. S. Khayal, Review of Fundamentals: Heat and Mass Transfer, Version 1ME, IIT Kharagpur, 2017, pp. 2-16.

- [76] R. Sanders, Radioactive Potassium May Be Major Heat Source in Earth's Core. *UC Berkeley News*. (2003-12-10), Retrieved 2007-02-28, pp. 1-3.
- [77] A. Gando, Partial Radiogenic Heat Model for Earth Revealed by Geoneutrino Measurements, *Nature Geoscience*, Vol.4, 2011, pp. 647-651.
- [78] J. T. Kiehl and K. E. Trenberth, Earth's Annual Global Mean Energy Budget, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.78, 1997, pp. 197-208.
- [79] D. L. Hartman, Global Physical Climatology, Ch.2. The Global Energy Balance, *International Geophysics*, Vol.56, 1994, pp.18-39.
- [80] J. M. A. Marquez, M. A. M. Bohorquez, S. G. Melgar, Ground Thermal Diffusivity Calculation by Direct Soil Temperature Measurement. Application to Very Low Enthalpy Geothermal Energy Systems, *Sensors*, Vol.16 (3), 2016, pp. 306-319.
- [81] S. Shoizawa, G. S. Campbell, Soil Thermal Conductivity, *Remote Sensing Reviews*, Vol. 5(1), 1990, pp. 301-310.
- [82] Hekseflux, Thermal Sensor STP01 (Soil Temperature Profile Sensor), Documentation: stp01-spec-sheet.pdf, www.hekseflux.com.
- [83] Z. Zhongchao, S. R. Shen, F. W. Feng, Z. Y. ong, Z. Yanrui, Soil Thermal Balance Analysis for a Ground Source Heat Pump System in a Hot-Summer and Cold-Winter Region, *Energies*, Vol. 11, 2018, pp.1206-1219.
- [84] R. Thorn, Flow, Ch.28.9. Thermal Mass Flowmeters Copyright 2000, CRC Press LLC, pp. 1-18. (<http://www.enngnetbase.com>)
- [85] R. C. Baker, Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance and Applications, Ch. 2. Fluid Mechanics Essentials, Cambridge University Press, Cambridge, 2000, pp.132-180.
- [86] P. J. LaNasa, E. L. Upp, Fluid Flow Measurement, Ch. 3. Types of Fluid Flow Measurement, Butterworth-Heinemann, 2014, pp. 31-144.
- [87] J. E Hardy, J. O Hylton, T. E McKnight, C. J Remenyik, Flow Measurement Methods and Applications, John Wiley & Sons, New York. 1999, pp.137-203.
- [88] D. W. Spitzer, Flow Measurement: Practical Guides for Measurement and Control, Research Triangle Park, NC: ISA, 1991, pp. 250-312.
- [89] R. W. Miller, Flow Measurement Engineering Handbook (3rd Ed.), Chapter 6. Flowmeter Selection, McGraw-Hill, New York, 1996, pp.1-51.
- [90] S. Pindado, J. Cubas, F. Sorribes - Palmer, The Cup Anemometer, a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry, *Sensors*, Vol.14, 2014, pp. 21418 - 21452.
- [91] C. G. Lomas, Fundamentals of Hot-wire Anemometry, Cambridge University Press, Ch.3. Heat Transfer from Sensors, 1986, pp. 55-83.
- [92] S. P. Venkateshan, Mechanical Measurements, Ch. 8. Measurement of Fluid Velocity, John Wiley & Sons, 2015, pp. 281-314.
- [93] E. Ower, R. C. Pankhurst, The Measurement of Air Flow, Ch.8. The Vane Anemometer, Pergamon Press, 1977, pp.197-228.
- [94] D. Han, S. Kim, S. Park D, Two-Dimensional Ultrasonic Anemometer Using Directivity Angle of an Ultrasonic Sensor, *Microelectronics Journal*, Vol.39 (10), 2008, pp.1195-1199.
- [95] C. Tropea, Laser Doppler Anemometry: Recent Developments and Future Challenges, *Measurement Science and Technology*, Vol.6 (6), 1995, pp. 605 -619.

- [96] J. D. Bergen, An Inexpensive Heated Thermistor Anemometer, *Agricultural Meteorology*, Vol. 8, 1971, pp. 395-405.
- [97] S. O. Aleksic, N. S. Mitrovic, M. D. Lukovic, S. D. Veljovic-Jovanovic, S. G. Lukovic, M. V. Nikolic, and O. S. Aleksic, 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.
- [98] . **S. O. Aleksić**, N. S. Mitrović, M. D. Luković, S. Djukić, Thick Film Thermistor Sensor for Measuring Temperature Profile of Ground Top Layer, Published in: *41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Date of Conference: 16.-20. May 2018, Zlatibor, Serbia, IEEE Xplore (full paper .pdf.) (DOI: 10.1109/ISSE.2018.8443651).
- [99] S. O. Aleksic, N. S. Mitrovic, M. D. Lukovic, S. G. Lukovic, N. T. Nikolic, Heat Loss Flowmeter for Water Based on Thick Film Thermistors in Power Save Regime, *IEEE Sensors Journal*, Vol 21(1), 2021, pp.199-206.
- [100] **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, Published in: *42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Date of Conference: 15.-19. May 2019, Wroclaw, Poland, IEEE Xplore (full paper .pdf.) (DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810179).
- [101] S. O. Aleksic, N.S. Mitrovic, Z. Nikolic, M. D.Lukovic, N. N. Obradovic, S. G. Lukovic, Three-axis' Heat Loss Anemometer Comprising Thick-Film Segmented Thermistors, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 19 (20), 2019, pp. 10228-10235.

БИОГРАФИЈА

Станко Алексић је рођен 16. маја 1983. у Београду. Завршио је основну школу Змај Јован Јовановић и XII Београдску гимназију. Дипломирао је на Физичком факултету, Универзитета у Београду на смеру Примењена физика и информатика 2016. Исте године уписао се на докторске студије на Факултету техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевци на студијском програму „Електротехничко и рачунарско инжењерство“, модул „Савремени материјали и технологије у електротехници“. Током докторских студија објавио је 4 рада у међународним часописима, 3 на међународним конференцијама, 1 рад у националном часопису и 1 рад на националној конференцији. Од 2019. ради као истраживач сарадник у Институту ИРИТЕЛ у Београду у области енергетске микроелектронике, сензора и претварача. Са истраживањима у области дебелих слојева и дебелослојним термисторима упознао се у Институту на хибридној линији током 2012. године као апсолвент на студентској пракси. Од тада се интензивно бави материјалима и технологијом у електроници и микроелектроници а посебно термисторима.

Објављени радови:

Радови у 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, 4414-4421. ISSN : 1558-1748, **M21**
(Impact factor 2018 : 3.115)
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, 6666-6672. ISSN: 0272-8842, **M21-a**
(Impact factor 2018 : 3.688)
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, 10228-10235. ISSN: 1558-1748, **M21**
(Impact factor 2019 : 3.193)
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, 199-206. ISSN: 1558-1748, **M21**
(Impact factor 2020 : 3.441)

Радови на међународним конференцијама:

5. **S. O. Aleksić**, N. S. Mitrović, M. D. Luković, S. Djukić, Thick Film Thermistor Sensor for Measuring Temperature Profile of Ground Top Layer, Published in: 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Date of Conference: 16.-20. May 2018, Zlatibor, Serbia, ISBN: 978-1-5386-5732-7, (DOI: 10.1109/ISSE.2018.8443651). **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, Published in: 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Date of Conference: 15.-19. May 2019, Wroclaw, Poland, ISBN: 978-1-7281-1874-1, (DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810179). **M33**
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, 9th Session – Materials for High-Technology Application II, The 16th 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 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, 533-538. ISSN 0040-2176, **M52**

Рад на националној конференцији:

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, микроситеми и оптоелектроника, IcETRAN & ETRAN 2018, Палић 11-14. 06. 2018, Зборник радова, 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 - индустријски прототип - М82, 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 - индустријски прототип - М82, ФТН Нови Сад, признато 10.01.2019. **M82**

A Ground Temperature Profile Sensor Based on NTC Thick Film Segmented Thermistors: Main Properties and Applications

Stanko O. Aleksic, Nebojsa S. Mitrovic, *Member, IEEE*, Miloljub D. Lukovic, Sonja D. Veljovic-Jovanovic, Snezana G. Lukovic, Maria V. Nikolic, and Obrad S. Aleksic

Abstract—A new ground temperature profile sensor comprising of a row of thermistors enables a large number of equidistantly arranged measuring points. The row of thermistors was formed using a group of negative temperature coefficient thick film segmented thermistors connected in series. After that calibration of the DC thermistor resistance R was performed at room temperature and the sensor was placed in a hole drilled on the lawn. DC resistances R of the row of thermistors were measured versus depth z as a parameter and converted to actual temperature $T(z)$ in the ground using the Steinhart-Hart equation. The temperature profile of the ground depending on deepness z and time t as a function $T(t, z)$ was measured on different days during one year in the early morning and in the afternoon. The temperature at the ground surface was compared with the temperature of the deepest sensor point in the ground. Thermal diffusivity D of the ground was determined using measured data $T(t, z)$ in the periods of steady ground temperatures. The new ground temperature profile sensor was realized to investigate the correlation between air and ground temperature, observation of ground temperature profile changes and heat exchange (heat transfer, diffusion, gradient, and heat flow direction) through the ground top layer and finally humidity estimation versus deepness.

Index Terms—Temperature sensors, thick film negative temperature coefficient (NTC) thermistors, thermal diffusivity.

I. INTRODUCTION

GENERALLY, temperature sensors and temperature measurements are most widely applied of all sensors and measurements in the world. Nowadays plenty of sensors are widely applied in modern techniques in houses, offices, production plants, traffic vehicles, electronic equipment, agriculture, meteorology, research, medicine and many other places. Their operation is based on different effects but the most common are electrical [1], [2], magnetic [3], [4] or mechanical phenomena [5], [6]. Temperature sensors differ in shape,

Manuscript received January 29, 2018; revised March 19, 2018; accepted March 23, 2018. Date of publication March 28, 2018; date of current version May 9, 2018. The associate editor coordinating the review of this paper and approving it for publication was Prof. Octavian Postolache. (*Corresponding author: Stanko Aleksic.*)

S. O. Aleksic and N. S. Mitrovic are with the Faculty of Technical Sciences, University of Kragujevac, 32000 Cacak, Serbia (e-mail: frakulah@gmail.com; nebojsa.mitrovic@ftn.kg.ac.rs).

M. D. Lukovic, S. D. Veljovic-Jovanovic, S. G. Lukovic, M. V. Nikolic, and O. S. Aleksic are with the Institute for Multidisciplinary Research-IMSI, University of Belgrade, 11030 Belgrade, Serbia (e-mail: lukovic@imsi.rs; sonjavel@imsi.rs; snezana.lukovic@imsi.rs; mariavesna@imsi.rs; obradal@yahoo.com).

Digital Object Identifier 10.1109/JSEN.2018.2820123

1558-1748 © 2018 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.

See http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html for more information.

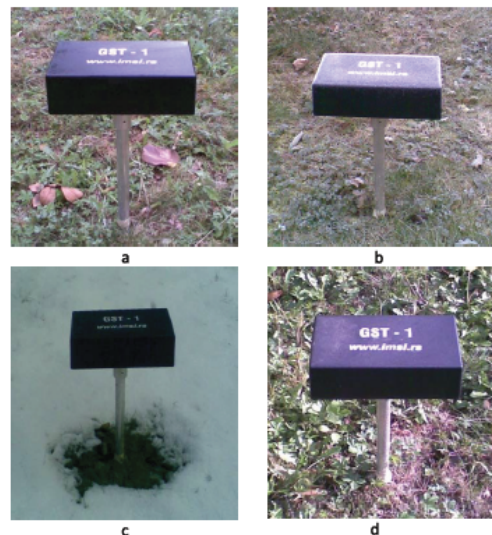


Fig. 1. Ground temperature profile sensor GST-1 setup: a-summer, b-autumn, c- winter and d-spring.

size, measuring principle, materials, sensitivity, temperature measuring range and other performances [7], [8]. Capillary mercury thermometers and thermistor thermometers are mass produced, while thermo-pairs are intended for measuring temperature in process industrial equipment [9], [10]. Finally, the temperature sensor has to be adaptive to measuring conditions: measurement in a point or surface temperature measurement [11]. Temperature profile measurements of the ground require several temperature sensors arranged at different points along a defined distance [12], [13]. Some thermal sensors are manufactured as custom designed to specific requirements [14], [15]. Temperature sensors can be integrated to electronics or multi-sensor chips [16]. Our new ground temperature sensor based on thick films thermistors is custom designed: its outlook and setup on the lawn is given in figure 1.

Measuring of the ground temperature profile today is significant for processes in agriculture, heat harvesting from the ground, measuring the current heat absorption from the air to the ground, control of global temperature rise, research in physics and biology etc. [17]–[19]. The local ground profile temperature depends on current weather, the ground

Three-Axis' Heat Loss Anemometer Comprising Thick-Film Segmented Thermistors

Stanko O. Aleksic, Nebojsa S. Mitrovic[✉], Member, IEEE, Zoran Nikolic, Miloljub D. Lukovic[✉], Nina N. Obradovic, and Snezana G. Lukovic

Abstract— NTC thick-film segmented thermistors were used as anemometer sensing devices. They were screen printed of thick-film thermistor paste based on modified NiMn_2O_4 fine powder, organic vehicle, and glass frit. Their electrical properties, such as resistance vs. temperature $R(T)$ and thermistor exponential factor B were obtained using measurements in the climatic test chamber. A uniaxial anemometer was formed using a thick-film segmented thermistor, which was placed in the hole drilled in rectangular piece of thermally insulating material. The uniaxial anemometer was used for the optimization of operating point of segmented thermistors as self-heating/wind sensing devices. The dc supply voltage was correlated with the air temperature sub-ranges (RCV). The power save mode such as 30s self-heating/5 min pause was used to measure the thermistor response on stable wind blow. The three-axis' anemometer was formed using five sensor devices placed in five holes drilled in the cubical piece of thermally insulating material: three thermistor sensors measure wind speed on the x, y, z - axes, the fourth sensor Pt 1000 measures the air temperature T , while the fifth sensor (capacitive type) measures humidity H . The obtained sensitivity and inaccuracy were compared with respective ones of other anemometers.

Index Terms—Thick-film thermistors, heat loss anemometer.

I. INTRODUCTION

ANEMOMETERS are devices for measuring the speed or pressure of the wind in meteorological stations, at the airports, windmill parks, agriculture, navy, sports, etc. Generally, they belong to one of three types related to the measuring directions: uniaxial, two-axis' (X-Y-type) and three-axis' (X,Y,Z-type). Many different types of anemometers were developed to operate on different principles such as cup, hot wire, windmill, pressure tube, ultrasonic, laser Doppler, elastic membranes, microphones, heat loss thermistor and many

Manuscript received June 17, 2019; accepted July 14, 2019. Date of publication July 16, 2019; date of current version October 17, 2019. This work was supported in part by the Ministry for Science, Education and Technological Development of the Republic of Serbia, under Project TR 32016 and in part by the Institute IRITEL, Belgrade, Serbia. The associate editor coordinating the review of this paper and approving it for publication was Dr. Rosario Morello. (Corresponding author: Stanko O. Aleksic.)

S. O. Aleksic and N. S. Mitrovic are with the Faculty of Technical Sciences, University of Kragujevac, 32000 Čačak, Serbia (e-mail: frakulah@gmail.com; nebojsa.mitrovic@ftn.kg.ac.rs).

Z. Nikolic is with the Faculty of Physics, University of Belgrade, 11000 Belgrade, Serbia (e-mail: nizoran@ff.bg.ac.rs).

M. D. Lukovic and S. G. Lukovic are with the Institute for Multidisciplinary Research - IMSI, University of Belgrade, 11030 Belgrade, Serbia (e-mail: lukovic@imsi.rs; snezana.lukovic@imsi.rs).

N. N. Obradovic is with the Institute of Technical Sciences-SASA, University of Belgrade, 11000 Belgrade, Serbia (e-mail: nina.obradovic@itn.sanu.ac.rs).

Digital Object Identifier 10.1109/JSEN.2019.2929356

1558-1748 © 2019 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission. See http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html for more information.

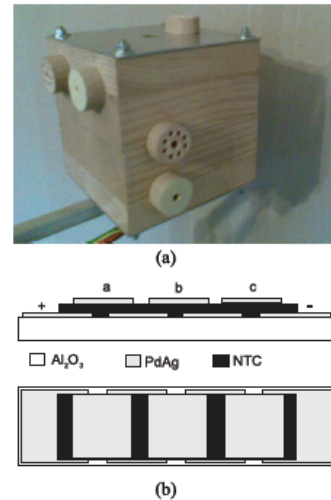


Fig. 1. (a) Three-axis' heat loss anemometer (prototype) in thermally insulating (wooden) housing comprises NTC thick-film segmented thermistors: actual size $100 \cdot 100 \cdot 100$ mm. (b) NTC thick-film segmented thermistor printed on alumina: cross section (up) and top view (down). PdAg-electrodes in a zig-zag order, NTC- thick- film thermistor layer, Al_2O_3 -alumina substrate. "+, -" power supply electrodes, a,b,c- inner electrodes.

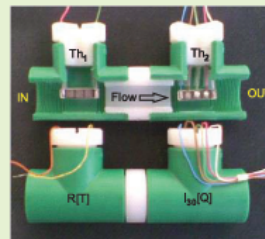
other anemometers. Our three-axis' anemometer belongs to X, Y, Z - type and operates on the heat loss of thick film thermistors. The anemometer construction is given in Figure 1a.

The constructions and main characteristics of commonly used types of anemometers are described in brief as follows: The cup-type anemometer consists of cups which rotate round the vertical axis when the wind presses against them. The number of revolutions per second is directly proportional to wind speed. The cup anemometers are used worldwide in meteorology [1], [2]. The hot wire is a heat loss anemometer and it measures wind speed and pressure: hot wire cools when the wind blows over it. A relationship can be obtained between the resistance of the wire and the air flow speed. It also measures the air volume flow in the ducts of air conditioning equipment [3]–[5]. The windmill anemometers measure wind speed and wind flow direction. When the wind blows it presses a small propeller: the number of revolutions per second is directly proportional to wind speed [6], [7]. The pressure tube is windsock and it only provides indication of the wind direction at airports. The faster the wind blows the higher sock raises off the ground [8]. The ultrasonic anemometers send

Heat Loss Flowmeter for Water Based on Thick Film Thermistors in Power Save Regime

Stanko O. Aleksic¹, Nebojsa S. Mitrovic¹, Member, IEEE, Miloljub D. Lukovic¹,
Snezana G. Lukovic¹, and Nenad T. Nikolić

Abstract—Novel heat loss flowmeter for water consists of the small plastic housing and two NTC thick film segmented thermistors with reduced dimensions placed along the main axis. The segmented thermistors were printed using the modified nickel-manganese paste and sintered in air at 850 °C / 10 min in the conveyor furnace. The first thermistor Th_1 is cold and measures input water temperature and the second thermistor Th_2 is self-heated at constant voltage and measures water flow rate. A short switch mode operating cycle for the self-heating thermistor was introduced: 30s of self-heating from the initial state and after that 90s of natural cooling to the initial state. The self heating DC current in 30th second I_{30} is recognized as the flowmeter response on stable water flow Q , while input water temperature T_w was used as a parameter. The flowmeter temperature range was divided in a few sub-ranges and adaptive DC voltage power supply (RCV) was introduced for each sub-range. The flowmeter measuring range and inaccuracy were compared with respective ones of other flowmeters.



Index Terms—Thick film thermistors, heat loss flowmeter.

I. INTRODUCTION

FLOWMETERS for water are devices for measuring the water volume and flow rate in waterworks pipes and rivers. They operate using different principles such as mechanical, pressure, electromechanical, electromagnetic, ultrasonic, thermal, optical, time of flight and other. The mechanical types (displacement) include: oscillating pistons, nutating discs, propellers, impeller and turbine meters [1]–[3]. A pressure difference caused by water flow in the Pitot and Venturi tube is proportional to the water flow rate [4], [5]. The electro-mechanical principle enables the electrical output using propeller and electromagnetic induction [6]. The water flow measurements can also be performed by use of electromagnetic flowmeters based on electromagnetic properties and

Faraday's law. They have no moving parts and require the AC or DC power supply [7], [8]. The ultrasonic flow-meters use Doppler effect and correlate the wave displacement and the water flow rate [9], [10]. The thermal flowmeters are based on heat loss sensors and correlate voltage, current, temperature or sensor power dissipation with water flow rate [11]–[13]. The novel heat loss flowmeter based on NTC thick film segmented thermistors and switching power supply also belongs to this group. The time of flight flowmeters are based on measuring elapsed time on the certain distance - from the pulse heater to the heat detector [14], [15]. The optical flowmeter often uses light reflection, e.g. time of flight of the light to measure the water flow in the pipeline [16], [17]. The Coriolis flowmeters are based on the tube with fixed vibrations. The water flow will cause the wave phase shift in piezo-vibrations [18], [19]. The other flowmeters such as flow regulators, cross-correlation flow meter, vortex flow meters, flow switches, etc. include modern electronics, and electrical measurements [20], [21]. All the types of water flowmeters can be compared by operating principle, flow measuring range, inaccuracy construction, calibration, and other specific requirements which determine their application.

The thermal mass flowmeters usually measure gas flow rate using the heat loss principle: the gas flows over the heater surface and over the in-coming and out-going thermal sensors placed axially in the pipe. The temperature difference is related to gas flow rate. [22], [24]. In the capillary type flowmeter the heater and thermal detectors are placed laterally on the

Manuscript received July 21, 2020; revised August 5, 2020; accepted August 5, 2020. Date of publication August 7, 2020; date of current version December 4, 2020. This work was supported in part by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, and in part by University of Kragujevac - Faculty of Technical Sciences, Cacak, under Grant 451-03-68/2020-14/200132. The associate editor coordinating the review of this article and approving it for publication was Dr. Sanket Goel. (Corresponding author: Stanko O. Aleksic.)

Stanko O. Aleksic and Nebojsa S. Mitrovic are with the Faculty of Technical Sciences, University of Kragujevac, Cacak 32000, Serbia (e-mail: frakulah@gmail.com; nebojsa.mitrovic@ftn.kg.ac.rs).

Miloljub D. Lukovic, Snezana G. Lukovic, and Nenad T. Nikolić are with the Institute for Multidisciplinary Research - IMSI, University of Belgrade, Belgrade 11030, Serbia (e-mail: lukovic@imsi.rs; snezana.lukovic@imsi.rs; nenadtzn@gmail.com).

Digital Object Identifier 10.1109/JSEN.2020.3015023

ДОДАЦИ

Образац 1

A) ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Станко О. Алексић,

изјављујем да докторска дисертација под насловом:

„ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА“

која је одбрањена на Факултету техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевцу представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат

сопственог истраживачког рада.


Овом Изјавом такође потврђујем:

■ да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,

■ да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

■ да умножени примерак докторске дисертације у штампаној и електронској форми у чијем се прилогу налази ова Изјава садржи докторску дисертацију истоветну одбрањеној докторској дисертацији.

У Чачку, 21. децембра 2021.



потпис аутора

Б) ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Станко О Алексић ,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

„ ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛОВАЊЕ СЕНЗОРСКИХ СИСТЕМА НА БАЗИ ДЕБЕЛОСЛОЈНИХ СЕГМЕНТИРАНИХ НИКЛ МАНГАНИТНИХ NTC ТЕРМИСТОРА “

која је одбрањена на Факултету техничких наука у Чачку, . Универзитета у Крагујевцу, и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам²

² Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада³

У Чачку, 21. децембра 2021.



ПОТПИС АУТОРА

³ Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>