



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
U NOVOM SADU

---



**PROJEKTOVANJE, OPTIMIZACIJA I  
KARAKTERIZACIJA LC SENZORA ZA BEŽIČNO  
MERENJE KONCENTRACIJE VLAGE U  
GRAĐEVINSKIM MATERIJALIMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:  
Prof. dr Goran Stojanović

Kandidat:  
M.Sc. Milan Radovanović

Novi Sad, 2016. godine



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР</b> :			
Идентификациони број, <b>ИБР</b> :			
Тип документације, <b>ТД</b> :	Монографска документација		
Тип записа, <b>ТЗ</b> :	Текстуални штампани материјал		
Врста рада, <b>ВР</b> :	Докторска дисертација		
Аутор, <b>АУ</b> :	Милан Радовановић		
Ментор, <b>МН</b> :	Проф. др Горан Стојановић		
Наслов рада, <b>НР</b> :	Пројектовање, оптимизација и карактеризација ЛЦ сензора за бежично мерење концентрације влаге у грађевинским материјалима		
Језик публикације, <b>ЈП</b> :	Српски		
Језик извода, <b>ЈИ</b> :	Српски/Енглески		
Земља публикавања, <b>ЗП</b> :	Србија		
Уже географско подручје, <b>УГП</b> :	Аутономна покрајина Војводина		
Година, <b>ГО</b> :	2016		
Издавач, <b>ИЗ</b> :	Ауторски репринт		
Место и адреса, <b>МА</b> :	Нови Сад, Србија		
Физички опис рада, <b>ФО</b> : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	9 поглавља/102 стране/78 референци/10 табела/77 слика/0 прилога		
Научна област, <b>НО</b> :	Електротехничко и рачунарско инжењерство		
Научна дисциплина, <b>НД</b> :	Сензори		
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО</b> :	ЛЦ сензори, резонантна фреквенција, концентрација влаге, грађевински материјали		
<b>УДК</b>	Монографска документација		
Чува се, <b>ЧУ</b> :	Библиотека Факултета техничких наука, Универзитет у Новом Саду		
Важна напомена, <b>ВН</b> :			
Извод, <b>ИЗ</b> :	Пасивни бежични ЛЦ сензори пројектовани су у технологији штампаних кола (ПЦБ) и у технологији ниско-температурно печене керамике (ЛТЦЦ). Представљена су три типа ЛЦ сензора израђених на ПЦБ-у у једнослојној и двослојној штампи. Такође су приказана и два типа ЛЦ сензора израђених у ЛТЦЦ технологији. Карактеризација сензора је извршена у лабораторијским условима а за тестирање коришћени су грађевинска опека и сипорекс блок као једни од најчешће коришћених материјала у грађевинској индустрији за зидане објекте.		
Датум прихватања теме, <b>ДП</b> :	13.05.2013.		
Датум одбране, <b>ДО</b> :			
Чланови комисије, <b>КО</b> :	Председник:	Др Љиљана Живанов, ред. проф.	Потпис ментора
	Члан:	Др Властимир Радоњанин, ред. проф.	
	Члан:	Др Мирјана Дамњановић, ванредни проф.	
	Члан:	Др Весна Мандић, ред. проф.	
	Члан, ментор:	Др Горан Стојановић, ред. проф.	



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES  
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

## KEY WORDS DOCUMENTATION

Образац Q2.HA.06-05- Издање 1

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monograph documentation
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	PhD thesis
Author, <b>AU</b> :	Milan Radovanović
Mentor, <b>MN</b> :	Prof. Dr Goran Stojanović
Title, <b>TI</b> :	Design, optimization and characterization of LC sensors for wireless measurement of moisture concentration in building materials
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian/English
Country of publication, <b>CP</b> :	Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Province of Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2016.
Publisher, <b>PB</b> :	Author reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9 chapters/102 pages/78 references/10 tables/77 figures/0 appendixes
Scientific field, <b>SF</b> :	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Sensors
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	LC sensors, resonant frequency, the concentration of moisture, construction materials
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	Library of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	Passive LC wireless sensors are designed in technology printed circuit boards (PCB) and the technology of Low Temperature Co-Fired Ceramics (LTCC). Presented are three types of LC sensors made on the PCB in the monolayer and bilayer press. It also presents two types of LC sensors manufactured in LTCC technology. Characterization of the sensor is carried out in the laboratory for testing were used building bricks and aerated concrete block as one of the most commonly used materials in the construction industry.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	13.05.2013.
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	
President:	Dr Ljiljana Živanov, full professor
Member:	Dr Vlastimir Radonjanin, full professor
Member:	Dr Mirjana Damjanović, associate professor
Member:	Dr Vesna Mandić, full professor
Member, Mentor:	Dr Goran Stojanović, full professor
	Mentor's sign

Образац Q2.HA.06-05- Izdanje 1

*Istraživanja koja su predstavljena u ovoj disertaciji urađena su na Katedri za elektroniku, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu u okviru projekata TR32016 i III45021.*

*Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru profesoru Goranu Stojanoviću na pomoći, podršci i odličnoj saradnji svih ovih godina, od dana kada sam bio student.*

*Od sveg srca se zahvaljujem svojoj porodici, mojoj Maji i našem Đorđu na svakodnevnoj podršci, ljubavi i strpljenju!!*

*Autor*

## **Izvod**

U ovoj disertaciji predstavljeno je više tipova LC senzora inovativnog dizajna koji su korišćeni za merenje vlage u građevinskim materijalima.

Pasivni bežični LC senzori projektovani su u tehnologiji štampanih kola (PCB) i u tehnologiji nisko temperaturno pečene keramike (LTCC). Predstavljena su tri tipa LC senzora izrađenih na PCB-u u jednoslojnoj i dvoslojnoj štampi. Takođe su prikazana i dva tipa LC senzora izrađenih u LTCC tehnologiji. Karakterizacija senzora je izvršena u laboratorijskim uslovima, a za testiranje korišćeni su građevinska opeka i YTONG blok kao jedni od najčešće korišćenih materijala u građevinskoj industriji.

Za karakterizaciju senzora, odnosno merenje električnih karakteristika korišćeni su Impedance Analyzer HP4191A i Impedance Analyzer HP4194A. Za određivanje količine vode u opeci i YTONG bloku korišćena je precizna elektronska vaga LIBELA ELSI BV-P3853. Za proveru rezultata merenja korišćen je komercijalni merač vlažnosti za građevinske materijale TESTO 606-2.

Takođe za strukturnu karakterizaciju kako samih senzora tako i građevinskih materijala korišćeni su: skenirajući elektronski mikroskop (SEM), nanoindenter Agilent G200 i 3D optički profilometar Huvitz HRM 300.

## **Abstract**

This dissertation describe a number of types of LC sensors innovative designs that are used to measure moisture in building materials.

Passive LC wireless sensors are designed in printed circuit boards technology (PCBs) and technology of low temperature co-fired ceramics (LTCC). Presented are three types of LC sensors made on the PCB in the monolayer and bilayer press. It also presents two types of LC sensors manufactured in LTCC technology. Characterization of the sensor is carried out in the laboratory for testing were used building bricks and aerated concrete block as one of the most commonly used materials in the construction industry.

For the characterization of sensors and measuring electrical characteristics were used Impedance Analyzer HP4191A and HP4194A Impedance Analyzer. To determine the amount of water in the bricks and aerated concrete block was used precise electronic scale LIBELA ELSI BV-P3853. To check the results of measurements using commercial humidity meter for building materials TESTO 606-2.

Also for structural characterization of how sensors themselves and building materials were used: scanning electron microscope (SEM), nanoindenter Agilent G200, and 3D optical profilometer Huvitz HRM 300.

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Tema doktorske disertacije .....	3
1.2. Predmet, problem i ciljevi istraživanja .....	3
1.2.1. Hipoteza i metodologija istraživanja .....	5
1.3. Organizacija disertacije.....	6
2. Bežični pasivni LC senzori i njihova primena.....	8
3. Metode za merenje vlage u građevinskim materijalima i objektima .....	14
3.1. Najčešće korišćene tehnike u građevinskoj industriji.....	15
3.1.1. Kalcijum karbidna metoda.....	16
3.1.2. Tehnike zasnovane na električnim osobinama materijala .....	17
3.1.3. Umetanje materijala .....	21
3.1.4. Praćenje parametara životne sredine.....	22
3.1.5. Termovizijska snimanja .....	22
3.1.6. Ostale tehnike.....	23
3.2. Tehnike razvijene za istraživanja.....	24
3.2.1. Spektroskopija nuklearne magnetne rezonance .....	24
3.2.2. Tehnike slabljenja zračenjem.....	25
3.2.3. Tehnika rasipanja neutrona .....	25
3.3. Dodatne tehnike u razvoju .....	26
3.3.1. Metoda toplotnog impulsa sa dve elektrode .....	26
3.3.2. Reflektometrija u vremenskom domenu.....	28
3.3.3. Električne metode .....	30
4. Princip rada i metoda merenja .....	33
4.1. Princip rada senzora.....	33
4.1.1. Induktor.....	35
4.1.2. Interdigitalni (češljasti) kondenzator .....	35
4.3. Metoda merenja .....	36
5. Merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima korišćenjem bežičnih LC senzora izrađenih na PCB-u.....	38

5.1. Merenja vlage u građevinskim materijalima korišćenjem LC senzora tipa #1.....	39
5.2. Merenja vlage u građevinskim materijalima korišćenjem LC senzora tipa #2.....	49
5.3. Merenja vlage u građevinskim materijalima korišćenjem LC senzora tipa #3.....	56
6. Merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima korišćenjem LC senzora izrađenih u LTCC tehnologiji .....	61
6.1. Bežični LC senzor tipa #4 fabrikovan u LTCC tehnologiji.....	61
6.2. Bežični LC senzor tipa #5 fabrikovan u LTCC tehnologiji.....	72
7. Prenosivi elektronski uređaj za merenje koncentracije vlage .....	76
7.1. Merenje impedanse pasivnih RLC elemenata.....	80
7.2. Karakterizacija LC senzora vlažnosti .....	84
8. Diskusija rezultata.....	87
9. Zaključak.....	93
10. Literatura.....	96



# Spisak slika

Slika 2.1. Dizajn LC senzora .....	10
Slika 2.2. LC senzor koji se sastoji od kružnog spiralnog induktora i interdigitalnog kondenzatora za detekciju teških metala.....	10
Slika 2.3. Dizajn LC senzora (a) kvadratni spiralni induktor, (b) kondenzator sa paralelnim pločama.....	11
Slika 2.4. Dizajn LC senzora sa dva senzitivna elementa.....	11
Slika 2.5. Inovativni dizajn LC senzora tipa #1 .....	12
Slika 2.6. Izgled LC senzora tipa #4 izrađenog u LTCC tehnologiji.....	13
Slika 3.1. Set za merenje vlage pomoću karbidnog merača .....	16
Slika 3.2. Izgled uređaja za merenje vlage PCE-PMI 1 na osnovu električne otpornosti	18
Slika 3.3. Merač vlage PCE-WP21 .....	19
Slika 3.4. Uređaj za merenje vlage na induktivnom principu.....	21
Slika 3.5. Snimanje objekta pomoću termovizijske kamere daje nam mesta mogućih problema, ali ne daje informaciju o količini vlage što se može videti na slici .....	23
Slika 3.6. Šematski prikaz metode sa dve sonde .....	26
Slika 3.7. Osnovni blok dijagrami metode sa dve elektrode i metode sa četiri tačke.....	30
Slika 3.8. Raspored elektroda za merenje metodom četiri tačke .....	32
Slika 4.1. Rezonantno LC kolo .....	33
Slika 4.2. Ekvivalentna šema rezonantnog LC kola .....	34
Slika 4.3. Ekvivalentno kolo induktora.....	35
Slika 4.4. Ekvivalentno kolo interdigitalnog kondenzatora.....	36
Slika 4.5. Blok šema eksperimentalne postavke korišćene u eksperimentima .....	37
Slika 5.1. a) Dizajn bežičnog LC senzora koji se najčešće može naći u literaturi ; b) Novi dizajn bežičnog LC senzora .....	38
Slika 5.2. Dimenzije fabrikovanog LC senzora tipa #1 sa novim dizajnom induktora ....	39
Slika 5.3. SEM slika LC senzora, izgled poprečnog preseka i provodnih segmenata.....	41
Slika 5.4. SEM slika LC senzora sa označenom debljinom provodnih segmenata .....	41
Slika 5.5. 3D profil senzora izrađenog na PCB-u.....	42
Slika 5.6. Izgled softvera za merenje 3D profila materijala .....	42

Slika 5.7. Eksperimentalna postavka za merenje koncentracije vlage u opeci od pečene gline korišćenjem LC senzora, antenskog namotaja i instrumenta HP-4194A .....	44
Slika 5.8. Merenje mase opeke od pečene gline preciznom elektronskom vagom.....	44
Slika 5.9. SEM slika unutrašnje strukture opeke od pečene gline .....	45
Slika 5.10. SEM slika unutrašnje strukture YTONG bloka.....	45
Slika 5.11. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #1 u funkciji koncentracije vlage u opeci od pečene gline .....	46
Slika 5.12. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #1 u funkciji koncentracije vode u YTONG bloku.....	47
Slika 5.13. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #1 u funkciji temperature. ....	48
Slika 5.14. Izgled spaljenog senzora nakon izlaganja temperaturi iznad 240 °C .....	49
Slika 5.15. Inovativni dizajn LC senzora tipa #2 i njegove dimenzije .....	50
Slika 5.16. Fabrikovani LC senzor tipa #2, sa slojem parafina preko induktivnog dela ..	51
Slika 5.17. Realni i imaginarni deo impedanse za LC senzor tipa #2 .....	51
Slika 5.18. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #2 u funkciji apsorbovane vode u opeci od pečene gline .....	53
Slika 5.19. Rezonantna frekvencija LC senzora tipa #2 kao funkcija vremena tokom sušenja opeke na sobnoj temperaturi .....	53
Slika 5.20. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #2 u funkciji apsorbovane vode u YTONG bloku.....	54
Slika 5.21. Rezonantna frekvencija LC senzora tipa #2 kao funkcija vremena tokom sušenja YTONG bloka na sobnoj temperaturi .....	55
Slika 5.22. Izgled LC senzora tipa #3 izrađen na dvostranoj PCB ploči; (a) induktivni deo senzora sastavljen od 13 namotaja; (b) izgled druge strane senzora koja predstavlja interdigitalni kondenzator .....	56
Slika 5.23. Prednji panel softverskog alata LabVIEW za kontrolu merenja pomoću Impedance Analyzer HP-4194A sa Z sondama .....	58
Slika 5.24. Merenje vlage u građevinskoj opeci i YTONG bloku korišćenjem bežičnog LC senzora tipa #3 .....	58
Slika 5.25. Rezonantna frekvencija LC senzora tipa #3 u funkciji količine vode u opeci od pečene gline .....	60

Slika 5.26. Rezonantna frekvencija LC senzora tipa #3 u funkciji količine vode u YTONG bloku .....	60
Slika 6.1. 3D model LC senzora tipa #4 fabrikovanog u LTCC tehnologiji .....	62
Slika 6.2. Dimenzije LC senzora tipa #4 .....	63
Slika 6.3. Vrednost električnog potencijala duž induktora .....	64
Slika 6.4. Električni potencijal na površini interdigitetnog kondenzatora .....	65
Slika 6.5. Šematski izgled procesa izrade komponenti/kola u LTCC tehnologiji .....	66
Slika 6.6. Izgled senzora proizvedenog LTCC tehnologijom .....	67
Slika 6.7. a) SEM slika poprečnog preseka senzora; b) debljina provodnog sloja srebra .....	68
Slika 6.8. 3D profil senzora izrađenog LTCC tehnologiji .....	69
Slika 6.9. Izgled softvera za merenje 3D profila materijala pomoću uređaja Huvitz HRM 300 .....	69
Slika 6.10. Zavisnost rezonantne frekvencije senzora od koncentracije vode u opeci .....	70
Slika 6.11. Zavisnost rezonantne frekvencije senzora od koncentracije vode u YTONG bloku .....	71
Slika 6.12. Zavisnost rezonantne frekvencije senzora od temperature .....	72
Slika 6.13. Dizajn LC senzora tipa #5 fabrikovanog u LTCC tehnologiji .....	73
Slika 6.14. Dimenzije LC senzora tipa #5 u mm .....	73
Slika 6.15. Električni potencijal induktivnog dela LC senzora tipa #5 .....	74
Slika 6.16. Električni potencijal kapacitivnog dela LC senzora tipa #5 .....	74
Slika 7.1. (a) Unutrašnja struktura integrisanog kola AD5933 (b) Čip AD5933 .....	77
Slika 7.2. Sistem za merenje impedanse .....	78
Slika 7.3. Windows aplikacija za upravljanje uređajem preko računara .....	79
Slika 7.4. Blok šema kola za kondicioniranje signala i njegovo povezivanje sa čipom .....	80
Slika 7.5. Poređenje izmerenih vrednosti za (a) moduo impedanse i (b) fazni ugao otpornika .....	81
Slika 7.6. Poređenje izmerenih vrednosti za (a) moduo impedanse i (b) fazni ugao kondenzatora .....	82
Slika 7.7. Poređenje izmerenih vrednosti za (a) moduo impedanse i (b) fazni ugao induktora .....	83
Slika 7.8. Karakterizacija LC senzora vlažnosti pomoću prenosivog ( <i>handheld</i> ) uređaja .....	84

Slika 7.9. Merenje (a) modula impedanse i (b) fazni ugao LC senzora.....	85
Slika 7.10. Merenje vlage pomoću prenosivog ( <i>handheld</i> ) uređaja i LC senzora.....	86
Slika 8.1. Testiranje LTCC podloge na nanoindenteru Agilent G200.....	87
Slika 8.2. Testiranje PCB podloge na nanoindenteru Agilent G200 .....	88
Slika 8.3. Srednje vrednosti merenja podloga LTCC i PCB na nanoindenteru Agilent G200.....	88
Slika 8.4. Testiranje provodnih segmenata od srebra (LTCC) na nanoindenteru.....	89
Slika 8.5. Testiranje provodnih segmenata od bakra (PCB) na nanoindenteru .....	90
Slika 8.6. Srednje vrednosti merenja provodnih segmenata od srebra (LTCC) i bakra (PCB) na nanoindenteru Agilent G200.....	90

## Spisak tabela

Tabela 3.1. Tehničke karakteristike uređaja PCE-PMI 1 .....	19
Tabela 3.2. Tehničke karakteristike uređaja PCE-WP21 .....	20
Tabela 3.3. Tehničke karakteristike uređaja SR-7825PS .....	21
Tabela 5.1. Uporedne vrednosti merenja koncentracije vlage na dva različita tipa građevinskog materijala .....	48
Tabela 5.2. Parametri induktivnog dela senzora tipa #3 .....	57
Tabela 5.3. Parametri kapacitivnog dela senzora tipa #3.....	57
Tabela 6.1. Vrednosti induktivnosti i kapacitivnosti za LC senzor tipa #4 dobijene procesom simulacije.....	65
Tabela 6.2. Vrednosti induktivnosti i kapacitivnosti za LC senzor tipa #5 dobijene procesom simulacije.....	75
Tabela 8.1. Vrednosti Jungovog modula i čvrstoće za podloge LTCC, PCB i provodne segmente Ag i Cu.....	91
Tabela 8.2. Aktivna površina senzora i osetljivost za dva tipa građevinskih materijala .	91

## **Spisak skraćenica**

**PCB** – Printed Circuit Board

**LTCC** – Low Temperature Co-Fired Ceramics

**RFID** – Radio Frequency Identification

**NMR** – Nuclear Magnetic Resonance

**PVC** – Polyvinyl Chloride

**TDR** – Time Domain Reflectometry

**DC** – Jednosmerna struja

**AC** – Naizmjenična struja

**IDC** – Interdigital Capacitor

**SEM** – Scanning Electron Microscope

**EM** – Elektromagnetni simulator

**MEMS** – Microelectromechanical Systems

**AD** – Analogno Digitalni

**1****Uvod**

Vlaga je svuda – počevši od vazduha pa sve do građevinskih elemenata kao što su drvene grede, parket, zidovi ili toplotna izolacija. Kod nekih građevinskih elemenata vlaga je čak i poželjna, nikako štetna. Tako se npr. drvo ne sme osušiti preko tačno određenog procenta, u protivnom postaje previše suvo i nastaju pukotine. Osim toga drvo se ugrađuje s određenim stepenom vlage koji zavisi od vlažnosti prostorija. U protivnom može doći do pojave pukotina, fuga i deformacija usled procesa bubrenja odnosno skupljanja drveta. Ukoliko je toplotna izolacija vlažna raste toplotna provodnost. U tom slučaju se više ne govori o toplotnoj izolaciji jer ništa ne izoluje. U takvom slučaju nije važno pitanje koliko vlage se nalazi u izolaciji, već gde se ta vlaga nalazi. Kod sveže postavljenog estriha (cementne košuljice) zahteva se oko 3 sedmice pre nego se na njega sme staviti podna obloga, u protivnom moguća su oštećenja od vlage. Iz ovih razloga ponekad je neophodno da je vlažnost građevinskih elemenata poznata. U tu svrhu koriste se različiti merni uređaji i metode koji daju manje ili više tačne rezultate [1].

Merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima je od posebnog interesa za profesionalce angažovane na izgradnji i održavanju građevinskih objekata, zbog lakšeg uvida u stanje objekata i otklanjanja mogućih problema. Problem velike koncentracije vlage u građevinskim objektima može loše uticati na strukturu samog objekta, a takođe može imati negativne posledice i na zdravlje ljudi odnosno korisnike datog objekta. Dobar kvalitet merenja koncentracije vlage može da pomogne profesionalcima da preduzmu odgovarajuće korake radi otklanjanja problema. Razvoj novih metoda za praćenje i merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima je veoma bitan i sa komercijalne i sa naučne strane. U građevinskoj industriji postoji potreba da se prati veliki broj parametara kao što su uticaj vibracija, vlaga, zamor materijala, i drugih, da bi se imao uvid u stanje građevinskih objekata. Na taj način se obezbeđuje pravovremena rekonstrukcija, posebno za objekte koji su osetljivi na uticaje životne sredine [2].

Vlagometrija je oblast merenja sadržaja vlage (vode) u čvrstim telima, a instrumenti kojima se sadržaj meri nazivaju se vlagomeri. Postoji više načina opisivanja vlage ili vlažnosti što uglavnom zavisi od industrije i konkretne primene (vlaga može biti izražena u kilogramima vodene pare po kubiku gasa, u procentu vode u odnosu na ukupnu masu ili u ppm). Hemijski senzor za detekciju vlage skraćeno se naziva samo senzor vlage ili vlažnosti. S obzirom na raznovrsnu primenu senzora vlažnosti, postoji dosta široka lista tehničkih zahteva za njihovu gradnju: dobra osetljivost u što većem opsegu vlažnosti, brz odziv, dobra ponovljivost sa malim histerezisom, otpornost na kontaminante, izdržljivost i dugovečnost, jednostavna konstrukcija i pristupačna cena. Odgovoriti na sve zahteve nije jednostavno. U tehnološkom pogledu senzori vlažnosti se mogu svrstati u dve velike grupe: standardni industrijski senzori vlažnosti napravljeni na bazi klasičnih tehnologija i savremeni poluprovodnički mikrosenzori [3-4].

Višak vlage u građevinskim objektima ima uticaj kako na trajnost samih objekata tako i na kvalitet vazduha unutar objekata. Prevelika koncentracija vlage u građevinskim objektima jedan je od najznačajnijih faktora koji utiče na trajnost objekata. Efekti koje velika količina vlage ima na različite građevinske materijali su različiti i mogu se podeliti na više različitih načina. Oštećenja koje vlaga izaziva na građevinskim objektima možemo podeliti na fizička, hemijska i biološka.

Materijali koji su osetljivi na vlagu mogu pretrpeti promene u svojim fizičkim dimenzijama i u svojim mehaničkim svojstvima kada je prisutna prevelika količina vlage. Takve promene uključuju smrzavanje vlažnih poroznih materijala, bubrenje zbog prisustva vlage i smanjenje mehaničkih karakteristika. Kao posledica toga, materijali mogu biti oštećeni.

Stanje vlažnih poroznih materijala može se pogoršati kada se zamrznu. Mehanizam mraza je hidraulički pritisak koji potiče od širenja smrznute vode u porama materijala kada se zamrzne [5]. Da bi se ovo dogodilo, sadržaj nivoa vlage u materijalu mora da bude blizu zasićenja istovremeno kad i temperatura padne ispod 0 °C [6].

Većina poroznih materijala ima tendenciju da nabubri ili se smanji u slučajevima kada sadržaj vlage i relativna vlažnost variraju. Ovo može da izazove problem posebno zbog toga što različiti materijali imaju različite centre toplote i pokreta [7]. Bubrenje zbog vlage može dovesti do pucanja, i asimetrije celokupne strukture. Ekstremne posledice



mogu biti, podizanje parketa, pomeranje brodskih podova i pregradnih zidova, plafonski paneli se mogu slomiti. Kod mnogih materijala, većina indukovanog bubrenja od vlage se javlja na gornjem higroskopskom opsegu, recimo iznad 75 %RH.

Drvo je izrazito osetljivo na promenu vlažnosti, budući da se mehaničke karakteristike značajno smanjuju sa povećanjem vlažnosti, uz povećanje dimenzija usled bubrenja, što u slučaju sprečenih zapreminskih promena drugim materijalima ili elementima konstrukcija, dovodi do pojave trajnih deformacija.

### ***1.1. Tema doktorske disertacije***

Tema disertacije je projektovanje i karakterizacija LC senzora za bežično merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima. U radu je predstavljeno 5 različitih LC senzora inovativnog dizajna za bežično merenje koncentracije vlage.

Pasivni bežični LC senzori projektovani su u tehnologiji štampanih kola (PCB) i u tehnologiji nisko temperaturno pečene keramire (LTCC). Predstavljena su tri tipa LC senzora izrađenih na PCB-u u jednoslojnoj i dvoslojnoj štampi. Takođe su prikazana i dva tipa LC senzora izrađenih u LTCC tehnologiji. Karakterizacija senzora je izvršena u laboratorijskim uslovima, a za testiranje korišćeni su građevinska opeka i YTONG blok kao jedni od najčešće korišćenih materijala u građevinskoj industriji.

Za karakterizaciju senzora odnosno merenje električnih karakteristika korišćeni su analizator impedanse HP4191A i HP4194A. Za određivanje količine vode u cigli i YTONG bloku korišćena je precizna elektronska vaga *LIBELA ELSI BV-P3853*. Za poređenje rezultata za vlažnost materijala korišćen je komercijalni uređaj *TESTO 606-2*. Pored snimanja električnih karakteristika senzora koje su bile najbitnije za testiranje električnih karakteristika senzora, vršena je strukturna analiza kako senzora tako i materijala koji su korišćeni za merenja pomoću SEM-a (*Scanning Electronic Microscope*) i 3D profilometra Huvitz HMR30, dok je mehanička karakterizacija senzora vršena pomoću Agilent Nanoindenter G200.

### ***1.2. Predmet, problem i ciljevi istraživanja***

Merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima je od posebnog interesa za profesionalce angažovane na izgradnji i održavanju građevinskih objekata, zbog

lakšeg uvida u stanje objekata i otklanjanja mogućih problema. Problem velike koncentracije vlage u građevinskim objektima može loše uticati na strukturu samog objekta, a takođe može imati negativne posledice i na zdravlje ljudi odnosno korisnike datog objekta. Dobar kvalitet merenja koncentracije vlage može da pomogne profesionalcima da preduzmu odgovarajuće i blagovremene korake radi otklanjanja problema. Razvoj novih metoda za praćenje i merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima je veoma bitan i sa komercijalne i sa naučne strane. U građevinskoj industriji postoji potreba da se prati veliki broj parametara kao što su uticaj vibracija, vlaga, zamor materijala, i drugih, da bi se imao uvid u stanje građevinskih objekata. Na taj način se obezbeđuje pravovremena sanacija, posebno za objekte koji su osetljivi na uticaje životne sredine.

Glavne odlike senzora su jednostavan dizajn, niski troškovi proizvodnje i to što ne zahteva nikakvo napajanje. Senzor je napravljen u jednom metalnom sloju (bakar), što mu obezbeđuje odličnu adheziju (prijanjanje) na građevinski materijal na kojem je potrebno izvršiti merenje koncentracije vlage. Takođe, moguće je u toku izgradnje građevinskog objekta ubaciti senzor u građevinski materijal (beton, malter i sl.), a nakon toga se ručnim instrumentom za merenje rezonantne frekvencije može izvršiti merenje, i na osnovu izmerenih podataka moguće je odrediti koncentraciju vlage i odlučiti da li postoji potreba za odgovarajućim postupcima za zaštitu. Takođe, moguće primene mogu biti merenje vlage u različitim građevinskim materijalima (drvo, toplotna izolacija, beton, malter) i određenim strukturnim elementima zgrada, zatvorenih bazena, kao i na mnogim drugim mestima i okolnostima u kojima postoji potreba da se ima uvid u promene koncentracije vlage. Podaci o količini apsorbovane vode su veoma važni u građevinskoj praksi, jer vlaga narušava izolaciona svojstva, izaziva koroziju armature, smanjuje otpornost na mraz, ubrzava proces propadanja građevinskog materijala i smanjuje životni vek građevinskih objekata.

Na teritoriji Vojvodine postoji veliki broj građevinskih objekata koji se zbog specifične konfiguracije terena nalaze pod velikim uticajem vlage. Velika količina vlage u građevinskim objektima može da izazove velika i skupa oštećenja ako se blagovremeno ne sanira.

Cilj istraživanja je da se razvije jednostavan senzor, optimalnih geometrijskih parametara pogodan za primenu u građevinskim materijalima. Merne performanse senzora treba da omoguće precizno određivanje koncentracije vlage u različitim vrstama građevinskog materijala. Rezultati koji se očekuju od senzora koji su opisani jesu primena senzora u građevinskoj industriji kako prilikom same izgradnje građevinskih objekata tako i na već postojećim objektima ubacivanjem u podove, zidove, fasadu, kao i u noseće elemente konstrukcija.

Inovativni dizajn senzora omogućava jeftinu proizvodnju, a pošto se provodni sloj nalazi u samo jednom sloju bakra, takođe imamo i odlično prijanjanje na materijal kome merimo vlažnost.

### ***1.2.1. Hipoteza i metodologija istraživanja***

Pasivan, bežični senzor koji se sastoji od induktora i češljastog (interdigitalnog) kondenzatora koristi se kao senzor za veliki broj merenja, gde se iz promena kapacitivnosti kondenzatora jednostavno mogu izračunati određeni parametri životne sredine, kao što su: vlažnost, koncentracija nekih gasova i sl.

Prednosti LC senzora koji su opisani je ta što su u potpunosti izrađeni u jednom metalnom sloju i nemaju dodatnih kontakata, za razliku od LC senzora koji se mogu pronaći u literaturi. To takođe utiče i na krajnju cenu što je veoma bitno.

Prvi deo istraživanja obuhvatio je analizu stručne literature i naučnih časopisa koji se bave tom tematikom.

Drugi deo istraživanja je podrazumevao je modelovanje novog senzora za bežično merenje vlage u građevinskim materijalima.

Sledeći korak je bio fabrikacija prototipova LC senzora za merenje vlage.

Nakon toga je sledila eksperimentalna metoda što je podrazumevalo merenje vlage u različitim građevinskim materijalima. U eksperimentima su korišćeni građevinska opeka i YTONG blok.

Na kraju je sledila statistička obrada dobijenih rezultata, a nakon toga objavljivanje istih.

### ***1.3. Organizacija disertacije***

Disertacija je organizovana u devet poglavlja.

U prvom poglavlju data su uvodna razmatranja, opisana je tema disertacije i predstavljena je struktura disertacije.

Drugo poglavlje opisuje bežične pasivne LC senzore i njihovu primenu. Dat je pregled LC senzora različitog dizajna kao i primene senzora za praćenje različitih parametara životne sredine, uključujući vlažnost, temperaturu, koncentraciju gasova, vrednost pH, detekcije bakterija, teških metala itd.

U trećem poglavlju su predstavljene sve metode merenja vlage u građevinskoj industriji, gde su opisane sve prednosti i mane svake od metoda. Takođe, su prikazani i komercijalni uređaji za merenje vlage koji rade na različitim principima.

Četvrto poglavlje opisuje bežičnu metodu merenja koncentracije vlage u građevinskim materijalima koja je je korišćena u ovoj disertaciji. U ovom delu opisan je princip rada bežičnog pasivnog LC senzora i antenskog namotaja, zatim su prikazana ekvivalentna kola posebno senzora, antene i na kraju ekvivalentno kolo eksperimentalne postavke koja je korišćena prilikom svih merenja u ovom radu.

U petom poglavlju predstavljene su rezultati merenja koncentracije vlage u građevinskoj opeci i YTONG bloku pomoću tri različita LC senzora koji su izrađeni na štampanoj ploči. Pored rezultata električne karakterizacije senzora prikazani su i rezultati strukturne analize kako senzora tako i građevinskih materijala koji su korišćeni u eksperimentima.

U šestom poglavlju su opisana dva LC senzora različitih dimenzija koji su izrađeni u LTCC tehnologiji. Takođe su dati i rezultati električne i strukturne karakterizacije senzora.

U sedmom poglavlju predstavljen je prenosivi (*handheld*) uređaj za merenje koncentracije vlage koji je razvijen. Date su karakteristike i šeme uređaja koji je korišćen za merenje vlage.

U osmom poglavlju data je mehanička analiza materijala na kojima su izrađeni senzori, a takođe je analizirana osetljivost svakog senzora pojedinačno u različitim materijalima koji su korišćeni u eksperimentima.

Deveto poglavlje iznosi zaključke vezane za rad opisan u disertaciji, sagledava prednosti i mane novog dizajna bežičnih LC senzora. Predložene su moguće primene novih materijala za izradu senzora, kao i upotreba predloženog dizajna u drugim oblastima.

**2****Bežični pasivni LC senzori i njihova primena**

U svetu u kome su svuda elektronski uređaji i naši zahtevi za kvalitetom i efikasnošću su uvek sve veći, postoji potreba za razvojem jeftinih, dostupnih i pouzdanih senzora u cilju praćenja različitih parametara životne sredine, uključujući vlažnost [8,9], temperaturu [10], koncentraciju gasa [11-13], vrednost pH [14] itd. Jedan od izazova je da se koriste senzorski sistemi za praćenje parametara u zatvorenim sredinama, uključujući hranu i lekove, u životinjama, u građevinskim elementima i konstrukcijama, itd, zato što je fizička veza između senzora i uređaja za obradu podataka teško izvodljiva, ili u nekim slučajevima čak i nemoguća. U takvim aplikacijama, bežični i daljinski sistemi dolaze u prvi plan. Nekoliko daljinskih senzorskih sistema su istraživani i danas su u upotrebi, među kojima kombinovanje konvencionalnih elektronskih komponenti senzora sa RFID tehnologijom je jedna od najčešće korišćenih opcija [15,16]. Iako se ova tehnologija razvija veoma brzo, bežični RFID senzori koji su integrisani u različite aplikacije nisu tako česti, a posebno se retko mogu sresti u građevinskoj industriji. Glavna prepreka za široku upotrebu RFID senzora je visoka cena proizvodnje komponenti i kompletnog RFID taga. Zanimljiva alternativa ovom skupom senzorskom sistemu su jeftina rezonantna LC kola koja se mogu proizvoditi u različitim tehnologijama po veoma pristupačnim cenama za masovnu upotrebu. [17]. Aktivni bežični senzori mogu pratiti širok spektar parametara, ali imaju značajne troškove instalacije i održavanja i limitirani su vekom trajanja baterija [18]. Pasivni bežični senzori, s druge strane, imaju ograničenu funkcionalnost u odnosu na aktivne senzore, ali su generalno jeftiniji, jednostavniji za izradu i imaju značajno duži životni vek [19-23].

Bežični pasivni senzor, poznat kao induktivno-kapacitivni (LK) senzor, razvijen je da prati promene uslova životne sredine kao što su temperatura, vlažnost i pritisak [24]. Ovaj tip senzora menja svoju kapacitivnost u zavisnosti od parametara okoline, što rezultira promenom njegove rezonantne frekvencije. Promena rezonantne frekvencije senzora se daljinski meri pomoću antenskog namotaja. Postoji više različitih tipova LC

senzora koji se razlikuju po dizajnu induktora ili kondenzatora. Najčešći oblici induktora koji se sreću kod LC senzora su:

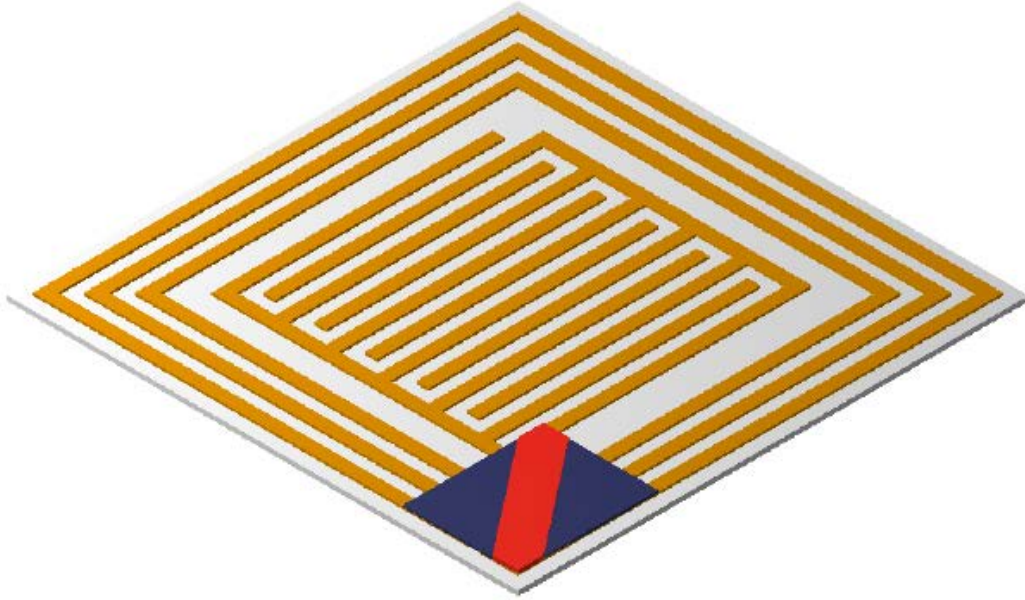
- a) kvadratni spiralni induktor
- b) kružni spiralni induktor.

Dizajn kondenzatora takođe može biti različit pa se u literaturi mogu pronaći LC senzori sa:

- a) interdigitalnim kondenzatorom;
- b) kondenzatorom sa paralelnim pločama.

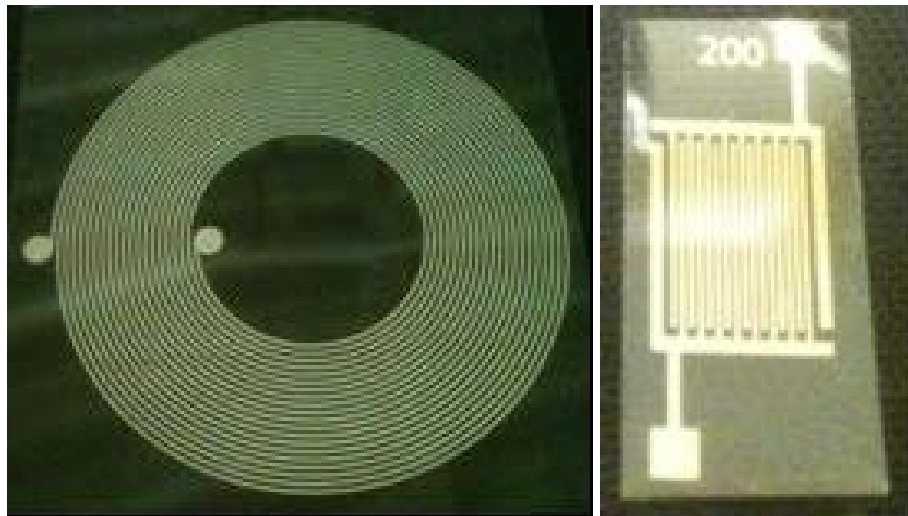
Na slici 2.1 prikazan je dizajn LC senzora koji se najčešće sreće u literaturi, a sastoji se od kvadratnog spiralnog induktora i interdigitalnog kondenzatora [25]. Takođe, ovaj dizajn senzora se može izrađivati u različitim tehnologijama počev od PCB, LTCC, ink-jet, sito štampom, itd. Najčešće aplikacije u kojima se ovaj dizajn senzora primenjuje su:

- a) kontrola kvaliteta hrane [25,26],
- b) detekcija polutanata u vodi [27],
- c) detekcija bakterija [28],
- d) merenje vlažnosti, pritiska i temperature [29],
- e) biološke primene [30].



**Slika 2.1. Dizajn LC senzora [25]**

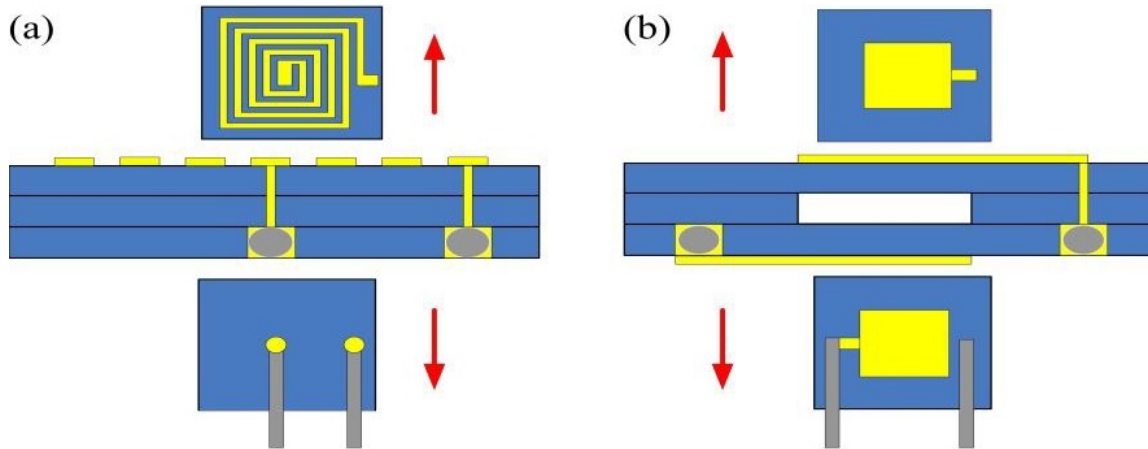
Na slici 2.2 prikazan je LC senzor koji se sastoji od kružnog spiralnog induktora i interdigitalnog kondenzatora, a služi za detekciju teških metala [31].



**Slika 2.2. LC senzor koji se sastoji od kružnog spiralnog induktora i interdigitalnog kondenzatora za detekciju teških metala [31]**

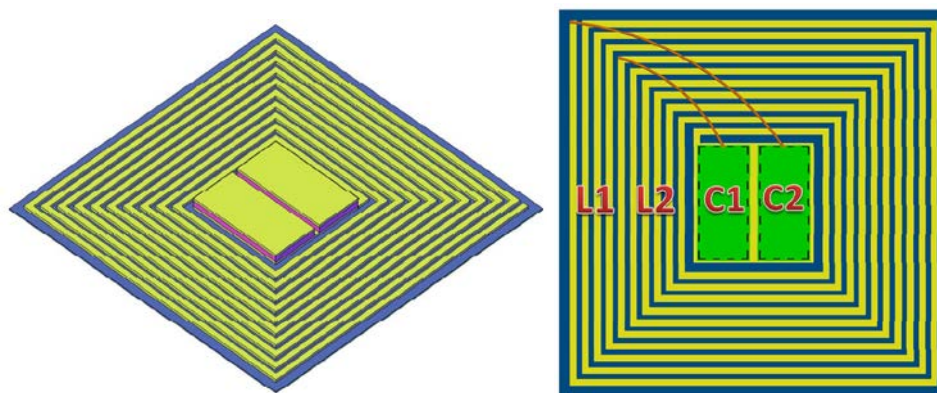


Pored dva najčešća dizajna LC senzora koja su prikazana na prethodne dve slike, sledeći dizajn koji se često sreće je prikazan na slici 2.3 [32]. Ovaj dizajn LC senzora kod koga dve paralelne ploče predstavljaju kondenzator najčešće se primenjuje za merenje pritiska, tako što promena pritiska direktno utiče na razmak između ploča, a to direktno utiče na kapacitivnost kondenzatora.



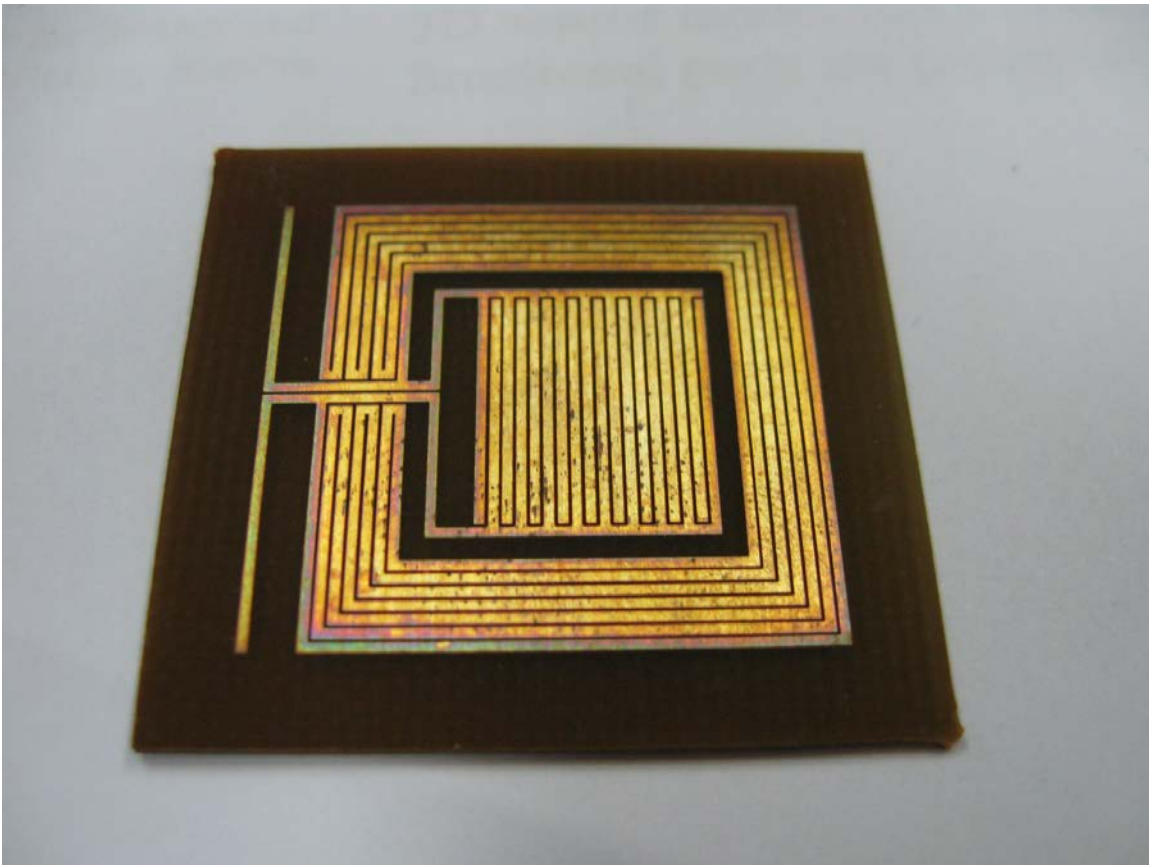
**Slika 2.3. Dizajn LC senzora (a) kvadratni spiralni induktor, (b) kondenzator sa paralelnim pločama [32]**

Nažalost, ograničenje postojećih LC senzora je njihova nemogućnost praćenja više parametara. Za aplikacije koje zahtevaju istovremenu detekciju više parametara, potrebno je više od jednog LC senzora, pa umesto jednog kondenzatora postoje dva koja su spojena sa jednim induktorom (slika 2.4), ali tako da imaju dve različite rezonantne frekvencije [33].



**Slika 2.4. Dizajn LC senzora sa dva senzitivna elementa [33]**

Jedan od glavnih nedostataka LC senzora koji su opisani je taj što je za povezivanje u paralelnu vezu induktora i kondenzatora potreban dodatni sloj odnosno *under-pass* ili *over-pass*. Što dalje povlači duži vremenski interval za izradu senzora, veću cenu izrade i na kraju zbog dodatnog sloja imamo lošiji kontakt sa podlogom što je veoma bitno ako se analiziraju parametri tvrdih materijala. U ovoj doktorskoj disertaciji su predstavljeni LC senzori inovativnog dizajna koji su izrađeni u jednom metalnom sloju. Na slici 2.5 predstavljen je LC senzor tipa #1 inovativnog dizajna izrađen u jednom metalnom sloju kod koga se interdigitalni kondenzator nalazi unutar induktora, dok je na slici 2.6 prikazan LC senzor tipa #2 izrađen u jednom sloju, s' tim što su u ovom slučaju induktor i kondenzator jedan pored drugog. Na slici 2.6 prikazan LC senzor tipa #4 izrađen u LTCC tehnologiji.



**Slika 2.5. Inovativni dizajn LC senzora tipa #1**



**Slika 2.6. Izgled LC senzora tipa #4 izrađenog u LTCC tehnologiji**

## 3

## Metode za merenje vlage u građevinskim materijalima i objektima

Merenje vlage u građevinskim materijalima je oduvek bilo važno za građevinske stručnjake i pomagalo im je prilikom dijagnostifikovanja prirode i razloga defekata na građevinskim objektima. Isto tako razvijen je i širok izbor pristupa merenju sve u cilju da se što detaljnije prouče fundamentalni procesi transporta vlage. U ovom delu su opisane metode merenja vlage u građevinarstvu: Dual sonda sa toplim impulsom; reflektometrija u vremenskom domenu; i sofisticirane tehnike koje se zasnivaju na merenju električnih parametara.

Problemi vlage unutar zgrada mogu imati razorno dejstvo na strukturu objekata, na zdravlje stanara kao i nepovoljan uticaj na predmete u zgradama. Zbog svega navedenog, merenje vlage je predmet interesovanja građevinskih stručnjaka dugi niz godina. Apsorpcija i transport vode kroz porozne materijale, u kombinaciji sa uticajem kretanja vazduha kroz strukturu predstavlja komplikovane procese. Komplikacije mogu nastati tokom perioda hladnog vremena, kada smrzavanje i širenje vode može dovesti do velikih oštećenja materijala. Tokom sušnog perioda, isparavanje vode može dovesti do stvaranja povećane količine soli na spoljašnjim površinama [34]. Trenutne promene klime ukazuju na to da zgrade moraju biti dizajnirane da se nose sa spoljašnjim uticajima vlage, sa visokom zimskom vlažnošću, sa jakim i intenzivnim zimskim kišama, poplavama i pojačanom brzinom vetra [35, 36].

Zbog toga, postoji potreba za pogodnim tehnikama merenja vlage koje će pomoći građevinarima u pronalaženju problema na zgradama i istraživanjima u daljem razumevanju transporta vlage sa ciljem poboljšanja performansi.

Građevinski stručnjaci su zainteresovani za procenu sadržaja vlage iz mnogih razloga, na primer:

- Saniranje posledica poplava, potrebno je praćenje sušenja zgrade kako bi proces saniranja štete mogao da započne u pravom trenutku;
- Zaštita starih zgrada, posebno mogu biti zainteresovani za nadzor materijala zgrade, da bi osigurali da problem koji dovodi do oštećenja može biti kontrolisan, a tamo gde je to moguće i izbegnut.

Građevinski stručnjaci imaju na raspolaganju niz tehnika, od kojih svaka ima određena ograničenja u oblasti svoje primene. Selekcija najprikladnijeg pristupa zavisice od cilja merenja, sa nekim komercijalnim rešenjima dostupnim za određene aplikacije. Generalno, tehnike bi trebalo da daju konzistentne rezultate, i da budu relativno brze i lake za primenu. Glavne tehnike merenja vlage su se malo menjale u nekoliko decenija unazad. Istorijski gledano, istraživačka zajednica je bila fokusirana na istraživanja uslova koji su doveli do stvaranja defekata na zgradama. U poslednjih nekoliko godina su uloženi veliki naponi da se razviju napredni kompjuterski modeli, sa očekivanjima da modeliranje može dovesti do smanjenja direktnih terenskih merenja. Precizna merenja vlage (apsolutni) sadržaj vlage, služe za bolje razumevanje hidrotermalnog ponašanja materijala. Inovativni razvoj je napravljen u laboratorijski sistemima, međutim, iz praktičnih razloga, oni nisu u potpunosti primenljivi na terenu.

U laboratorijskim uslovima, oprema se može propisno kalibrisati za merenje specifičnih materijala, postizanje višeg nivoa tačnosti. I pored toga, uzorci se mogu proizvoditi određenih dimenzija i homogenosti. Dalje, uzorci mogu biti laboratorijski uslovljeni za postizanje početnog sadržaja vlage i identifikovanje istorije vlage: ovo može biti važno za analizu materijala, kao što je drvo. Nivo stručnosti potrebne za istraživačke tehnike je obično daleko veći nego onaj koji je potreban za rukovanje instrumentima od strane građevinskih stručnjaka.

Inovativni zahtevi merenja istraživača se obično razlikuju od građevinskih stručnjaka i njihovi merni alati mogu biti neprikladni ili nepraktični za prenos građevinskim stručnjacima. Prevod ovih tehnika u praktične instrumente ili senzore za profesionalno građevinarstvo je izazov koji bi doprineo mnogo detaljnijem polju istraživanja i unapredio razumevanje razloga koji doprinose stvaranju oštećenja na građevinskim objektima, što u velikoj meri redukuje njihov životni vek ili iziskuje značajna sredstva za njihovu sanaciju.

### ***3.1. Najčešće korišćene tehnike u građevinskoj industriji***

Pristupačnost i dostupnost *user-friendly* i prenosive opreme određuje i opseg tehnika korišćenih od strane većine građevinskih stručnjaka. Za specijalizovane aplikacije stručnjaci mogu imati sofisticiranije tehnike na raspolaganju. Građevinski stručnjaci su obično zainteresovani za tehnike koje omogućavaju ponavljanje merenja relativnog sadržaja vlage. Neki od komercijalno dostupnih uređaja mogu da obezbede apsolutno merenje sadržaja vlage kada se primenjuju na materijalima za koje su ranije kalibrisani. Proizvođač proglašava tačnost

merjenja samo za materijale na kojima je uređaj kalibrisan, dok za druge materijale ne garantuje tačnost i treba ih tumačiti isključivo kao relativnu vlažnost materijala.

### ***3.1.1. Kalcijum karbidna metoda***

Jednostavna metoda za merenje vlage u zidovima i cementnim materijalima je bušenje rupa u materijalu, sakupljanje izbušenog materijala i gravimetrijskim odmeravanjem sadržaja vlage pre i posle sušenja. Pažljiva primena tehnike bušenja može da omogući sakupljanje materijala u vidu uzorka iz progresivnih dubina, omogućavajući da se izmeri profil vlage kroz materijale. Da bi se minimiziralo sušenje od bušenja koriste se manje brzine bušilica ili se mogu koristiti ručne bušilice.

Sadržaj vlage može brzo da se proceni ukoliko se koristi karbidni merač. Ovo zahteva izlaganje izbušenog materijala kalcijum karbidu i to u zatvorenom kontejneru. Reakcija vlage u uzorcima proizvodi određenu zapreminu acetilen gasa i to u proporcijama sadržaja vlage što uslovljava rastom nivoa pritiska u kontejneru (slika 3.1).

Ova tehnika je dugotrajna i zahteva da rupe budu ubušene u materijal, što može biti neprihvatljivo za vlasnika zgrade. Njena destruktivna priroda ograničava broj merenja koja se mogu izvesti što tehniku svrstava u nepodobne za dugotrajno praćenje i procenu promene sadržaja vlage. Ovom tehnikom moguće je dobiti merenje apsolutnog sadržaja vlage.



**Slika 3.1. Set za merenje vlage pomoću karbidnog merača [37]**

### ***3.1.2. Tehnike zasnovane na električnim osobinama materijala***

Veza između električnih svojstava poroznih materijala i sadržaja vlage u njima je ustanovljena mnogo godina unazad [38]. Merenje otpora, impedanse, kapacitivnosti i dielektrične konstante materijala, koji su pod uticajem vlage, i sve su korišćene kao osnova u merenju vlage [39]. Komercijalno dostupni uređaji rade koristeći najmanje jedan, a nekada kombinujući nekoliko ovih svojstava.

Dok su se strategije za merenje ovih svojstava razvijale godinama za širok obim korišćenja u industrijskim aplikacijama, transfer tehnologije za istraživanje građevinskih materijala još uvek zahteva pažljivo osmišljene instrumente.

Električna svojstva materijala mogu biti izuzetno osetljiva na prisustvo vode, međutim, bitan je dobar dizajn senzora. Ima puno ograničavajućih faktora koji bi trebalo da budu uzeti u obzir pre nego što se krene sa korišćenjem tehnika zasnovanim na električnim osobinama materijala. Komercijalni uređaji su često kalibrisani da daju apsolutni sadržaj vlage za kalibrisane generičke materijale kao što je drvo; očitavanja na drugim materijalima daju komparativna merenja, ali bez daljeg kalibrisanja ne mogu dati precizne apsolutne vrednosti sadržaja vlage. Dobar elektro kontakt između uređaja i materijala koji se meri je od esencijalnog značaja; za izvesne materijale ovo može biti problematično i može dati netačna merenja. Tačnost i kvalitet rezultata merenja elektro tehnikama, takođe, mogu biti uslovljeni i temperaturnim varijacijama, prisustvom soli u porama rastvora i prisustvom metalnih komponenti na mernim mestima. Varijacije u kvalitetu i nepoznata vrsta i sastav materijala korišćenih prilikom izgradnje, takođe, ograničava tačnost ovih tehnika [40,41].

Komercijalni mikrotalasni merači vlage su dostupni i mere dielektričnu konstantu materijala u kontaktu sa instrumentom i mogu da mere sadržaj vlage do dubine od 50 mm u materijalu [42]. Korišćenje ovih instrumenata je generalno ograničeno na beton. Posebna prednost je što kalibracija za različite gustine materijala nije potrebna. Međutim, prisustvo metalnih komponenti i odredjenih keramičkih komponenti u obimu merenja može rezultovati pogrešnim rezultatima.

Uz odgovarajuću pažnju na stanje materijala, elektro metode mogu ponuditi brže, nedestruktivne metode identifikacije površinskog sadržaja vlage. Stoga, ove tehnike omogućavaju građevinskim stručnjacima da dobiju brze rezultate za apsolutnu vrednost vlage u materijalima. Ove tehnike ne omogućavaju merenje sadržaja vlage duboko unutar zida i daju



samo apsolutni sadržaj vlage za materijale za koje su uređaji prethodno kalibrisani od strane proizvođača.

### 3.1.2.1. *Merenje vlage na osnovu električne otpornosti*

Merač vlage materijala PCE-PMI 1 (Slika 3.2) predstavlja uređaj za kontrolu vlage u građevinskim objektima. Merač vlage građevinskog materijala omogućava određivanje vlage betona, drveta ili nekog drugog građevinskog materijala. Uređaj se napaja baterijama i preporučuje se kod površinskog merenja vlage gde ne sme da dođe do oštećenja površine. Merni metod dozvoljava ponovno merenje na istom mestu na kom je već izvršeno merenje. Merač vlage za beton, drvo, gips PCE PMI-1 se prevashodno koristi na gradilištima. Važna primena merača vlage je i merenje vlage u zidovima bez oštećenja. U starim zgradama, merač omogućava pronalaženje vlažnih mesta u zidovima. Takođe merač vlage PCE-PMI 1 nalazi upotrebu u industriji prerade drveta i šumarstvu. Rukovanje meračem PCE-PMI 1 je prilično jednostavno. Sonda se prisloni na površinu materijala gde se želi izvršiti merenje vlage do 40 mm dubine bez oštećenja površine. PCE PMI-1 meri vlagu materijala na osnovu električne otpornosti materijala [43].



Slika 3.2. Izgled uređaja za merenje vlage PCE-PMI 1 na osnovu električne otpornosti [43]



**Tabela 3.1. Tehničke karakteristike uređaja PCE-PMI 1 [43]**

Merno područje	0 ... 100 %
Tačnost	±0,7 %
Rezolucija	0,1 %
Displej	LCD-displej
Merna dubina	20 .... 40 mm
Merni princip	Kapacitivni (električna otpornost materijala)
Tip senzora	Metalni sferoid
Napajanje	1 x 9V baterija
Dimenzije	180 mm x 45 mm x 35 mm
Masa	180 g

### 3.1.2.2. *Merenje vlage pomoću elektromagnetnih talasa*

Merač vlage za građevinske materijale PCE-WP21 prikazan na slici 3.3 je elektronski uređaj za merenje vlage betona i cementnih košuljica. Merna metoda se temelji na principu visokofrekventnih elektromagnetnih talasa. Elektromagnetni talasi prodiru približno 50 mm duboko u materijal. Merni rezultat je srednja vrednost gornjeg sloja od 50 mm. Za merenje je potrebno položiti elektrode na površinu betona. PCE-WP21 se uglavnom koristi u području unutrašnjih radova u građevinarstvu, na primer kod postavljanja keramičkih pločica, estriha, parketa [43].

**Slika 3.3. Merač vlage PCE-WP21[44]**

**Tabela 3.2. Tehničke karakteristike uređaja PCE-WP21 [44]**

Merno područje	1 ... 8 % apsolutne vlage betona
Tačnost	$\pm 0,7$ %
Rezolucija	0,1 %
Displej	3 1/2 cifreni LCD-displej
Merna dubina	do 50 mm
Kućište	Sintetika
Napajanje	1 x 9V baterija
Dimenzije	165 mm x 80 mm x 30 mm
Masa	500 gr

### ***3.1.2.3. Merenje vlage na induktivnom principu***

Merenje se može vršiti preko induktivnog senzora ili pomoću senzora sa iglama koji je preko kabla spojen na uređaj. Uređaj kalibrisan na 10 opsega da preko ubodnog senzora meri vlagu raznih vrsta drveta i materijala. SR-7825PS preko induktivnog senzora i 20 područja kalibrisanih prema gustini materijala može meriti vlagu drveta, papira, betona, azbesta, cementa, gipsa, blokova, estriha, cigle, staklene vune, mermera, granita, gume, kože, plastike (slika 3.4) [45]. Pre merenja je potrebno izabrati senzor (sa iglama ili induktivni) za materijal koji se meri i broj kalibrisane grupe za određeni materijal.



Slika 3.4. Uređaj za merenje vlage na induktivnom principu [45]

Tabela 3.3. Tehničke karakteristike uređaja SR-7825PS [45]

Merno područje	0 ... 70 %
Rezolucija	$\pm(0,5 \% +0,5)$
Tačnost	0,1 %
Dubina merenja	50mm (induktivni senzor)
Princip merenja	Merenje el.otpora
Radno temperaturno područje	0 ... 50 °C
Napajanje	4 x 1,5V AAA baterije
Dimenzije	uređaj: 165 mm x 58 mm x 33 mm, senzor: 216 mm x 42 mm x 27 mm
Masa	250 g

### 3.1.3. Umetanje materijala

Tehnike korišćene od strane građevinskih stručnjaka podrazumevaju ubacivanje uzorkovanih materijala, za koje se pretpostavlja da su u hidrauličkom kontaktu sa elementima

zgrade koje treba pratiti. Ovo može biti postignuto uvođenjem novih materijala (obično se koriste drvene tiple) ili alternativa je uklanjanje jezgra građevinskog materijala koji se može ponovo periodično vratiti radi pristupa [46]. Ovi pristupi se mogu koristiti periodično za merenje sadržaja vlage u materijalu. Umetak može zahtevati nekoliko dana za postizanje ravnoteže sa materijalom kome se meri vlaga. Kod, na primer, drvene tiple kod kamenorezaca, rezultati ne mogu biti predstavljeni u apsolutnom sadržaju vlage, i mogu da pokažu jedino da materijal postaje vlažniji ili suvlji. Tehnika je pogodna za dugoročnu procenu, na primer, za sanaciju posle poplava, ili za praćenje posebno osetljivih zgrada. U zavistnosti od prirode umetnutog materijala, metod može biti ili destruktivan ukoliko se koristi jezgro, ili nedestruktivan ukoliko je tip materijala pozicioniran u dobrom hidrauličnom kontaktu sa površinom.

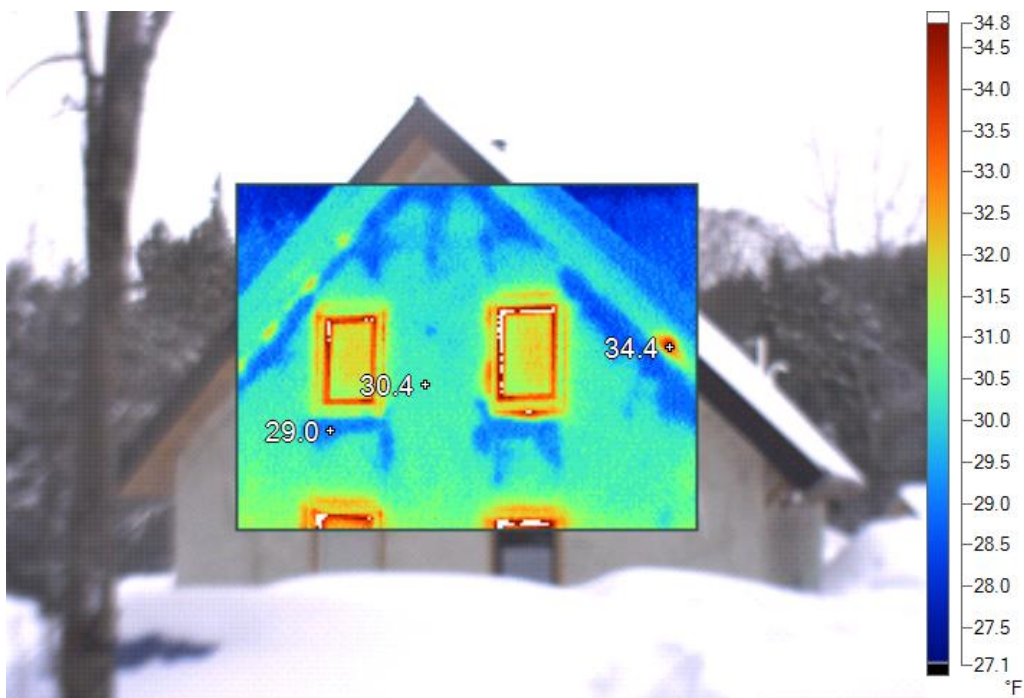
#### ***3.1.4. Praćenje parametara životne sredine***

Ako direktno merenje sadržaja vlage materijala nije moguće, često se koristi relativno merenje vlažnosti površine materijala. Sadržaj vlage iz ovoga se može izvesti da je povezan sa relativnom vlažnošću izotermne sorpcije (fizička karakteristika materijala). Medjutim, za neke materijale ne može biti značajan histerezis između ponašanja vlaženja i sušenja. U najboljem slučaju merenjem relativne vlažnosti vazduha daje indikacije stanja materijala i najpogodnije je za dugoročno praćenje materijala zgrada da bi se utvrdilo da li je materijal vlažan, suv ili je uspostavljena ravnoteža. Praktična primena je u nadgledanju zgrada da bi se utvrdilo da li je ustanovljen problem tretiran na adekvatan način. Komercijalno dostupna oprema omogućava praćenje u dužem vremenskom periodu kako bi se dobila slika šireg obima. Pravilno tumačenje rezultata iz ove oblasti zahteva iskustvo. Ova tehnika je ne destruktivne prirode i stoga je od velikog značaja za upotrebu u osetljivim primenama.

#### ***3.1.5. Termovizijska snimanja***

Neki građevinski stručnjaci koriste termo kamere da istraže nedostatke u samim zgradama. Tehnika detektuje temperaturne varijacije u površini materijala, koja može biti uzrokovana mnogim efektima, uključujući razlike u termičkom otporu susednih materijala, infiltracije vazduha i vlažnost ili vodu unutar strukture. Medjutim, iskustvo pokazuje da rezultati mogu dovesti u zabludu, naročito ukoliko operater nije upoznat sa kalibracijom i uslovima za dobijanje dobre slike, ova tehnika mora da se koristi sa oprezom. Iako tehnika može pokazati

stepen i lokaciju mogućih problema, ne može dati tačne informacije o količini vlage koja je prisutna (slika 3.5). Rezultati se ne mogu tumačiti na način da daju pouzdane rezultate relativnog prisustva vlage, već samo da ukažu na postojanje problema vlage na površini. Stoga, tehnika može da se koristi u identifikaciji postojanja problema vlage, ali evaluacija zahteva drugačiji pristup. Ova tehnika je kompletno ne destruktivna.



**Slika 3.5. Snimanje objekta pomoću termovizijske kamere daje nam mesta mogućih problema, ali ne daje informaciju o količini vlage što se može videti na slici [47]**

### **3.1.6. Ostale tehnike**

Postoji niz tehnika za merenje sadržaja vlage koje su razmatrane za upotrebu, ali se trenutno ne koriste u praksi. Horizontalni radar, je korišćen za ispitivanje sadržaja vlage u građevinskim strukturama, međutim, ovo zahteva izuzetno precizno znanje postojećih struktura kako bi se dobile osnove merenja sadržaja vlage. Sistemi bazirani na mikrotalasnoj apsorpciji su ispitivani tokom 1960-ih i 1970-ih, međutim, takvi sistemi zahtevaju usklađivanje predajnika na jednoj strani zida i prijemnika sa druge strane da bi se dobilo očitavanje, i ovo je generalno nepraktično za građevinska merenja [48]. U poslednje vreme prikazani su radovi za razvoj prenosivih verzija alata zasnovanih na nuklearnoj magnetnoj rezonanci (NMR) koja bi mogla da se koristi u građevinskim istraživanjima.

### ***3.2. Tehnike razvijene za istraživanja***

Istraživačka zajednica je aktivna u razvoju inovativnih pristupa za detektovanje i merenje sadržaja vlage u poroznim materijalima koji daleko prevazilaze zahteve građevinskih stručnjaka. U nekim slučajevima tehnike korišćene od strane građevinskih stručnjaka na licu mesta su rafinirane i primenjuju se u laboratorijskim uslovima za dobijanje preciznih merenja koja se mogu povezati sa apsolutnim merenjem vlage uz odgovarajuću kalibraciju. Pored toga, tehnike koje su razvijene u laboratorijskim uslovima, ne mogu se primeniti na licu mesta zbog opreme i zbog sigurnosnih razloga, ove tehnike često predstavljaju destruktivna merenja, koja podrazumevaju preciznu pripremu dimenzioniranih uzoraka za testiranje. Istraživačke tehnike su obično namenski korišćene za preračunavanje objekata za kontrolu opreme i obradu podataka kao i analize. Instrumenti mogu imati kompleksne zahteve vezane za snabdevanje električnom energijom. Dalje, može biti od velikog uticaja na zdravlje i bezbednost, posledice korišćenja pojedinih sistema može biti ograničeno samo na korišćenje u definisanom okruženju. Zbog navedenih faktora korišćenje aplikacija na licu mesta je jako teško, a u pojedinim sistemima i nemoguće. U narednim odeljcima dat je pojednostavljen pregled opštih pristupa.

#### ***3.2.1. Spektroskopija nuklearne magnetne rezonance***

NMR spektroskopija je komercijalno korišćena u mnogim disciplinama, u rasponu od naftnih istraživanja do istraživanja u prehrambenoj industriji, za ispitivanje sadržaja vlage u materijalima. Atomi vodonika unutar materijala, koji su izloženi velikom magnetnom polju, pokrenuti pulsom radio talasa, zatim se vrata u svoje prvobitno stanje pritom oslobađajući karakterističan signal. Dodatna karakteristika NMR jeste što omogućava merenje vlage u različitim fizičkim stanjima (hemijski vezane, fizički vezane i slobodne tečnosti). Tehnika zahteva posedovanje iskustva i sofisticiranu analizu kako bi mogla da ostvari svoj puni potencijal.

NMR obično zahteva uzorkovanje materijala određenih dimenzija koji će se skenirati: kod nekih sistema veličina uzorka je ograničena na samo nekoliko centimetara, kao posledica makroskopskih funkcija koje mogu biti prevelike da bi se analizirale. Raščlanjavanjem uzorka materijala putem NMR može se skenirati profil vlage duž snimka materijala. Zbog toga što za korišćenje uobičajene NMR metode uzorci moraju biti pripremljeni u laboratorijskim uslovima, evaluacija vode u stvarnim strukturama nije moguća. Razvoj prenosivih NMR sistema je

proučavan od strane istraživačke zajednice i može dovesti do uspešnih merenja površinskog nivoa vlage [49].

Prva primena NMR za ispitivanje raspodele vode unutar materijala zgrade obavljena je pre više od 25 godina [50]. Od tada tehnika ima široku primenu i broj istraživačkih grupa koje aktivno rade na razvoju tehnika za praćenje fenomena transporta vlage. Jedno posebno područje koje ima važnu primenu je merenje karakteristika transporta vlage u materijalu [51]. Sposobnost tehnike da identifikuje količinu vlage u različitim fizičkim stanjima u materijalu je dovela do korišćenja u drugoj velikoj oblasti gde se ova tehnika koristi za ispitivanje procesa podešavanja cementnih materijala i posmatranje ponašanja soli u poroznim materijalima [52, 53].

### ***3.2.2. Tehnike slabljenja zračenjem***

Usvojeni su različiti pristupi za merenje sadržaja vlage u materijalima koristeći slabljenje bilo elektromagnetne radijacije ili neutrona na uzorku. Ovo slabljenje može biti povezano sa sadržajem vlage unutar materijala, i uz kalibraciju može se koristiti za merenje apsolutnog nivoa vlage u materijalu. Analize ovih merenja daju količinu vlage duž snopa zraka kroz materijal. Skeniranjem preko površine distribucija vlage može da se procenjuje, i na primer okretanjem uzorka da se skenira u dve dimenzije, moguće je koristiti tomografiju kako bi se napravila trodimenzionalna slika sadržaja vlage [54]. Odlična preciznost i tačnost se mogu postići ovom metodom, međutim, oprema koja je potrebna za korišćenje ove tehnike mora da bude visoko sofisticirana.

Nekoliko različitih sistema koristi ovu tehniku za detaljno merenje sadržaja vlage u građevinskim materijalima. Ovo uključuje sisteme X-zraka, sisteme gama zraka, i neutronske radiografije [55-57]. Svi ovi sistemi su ograničeni u njihovoj primeni potrebom za pristupom pogodnom izvoru zračenja i mogućim problemima po zdravlje i sigurnost.

### ***3.2.3. Tehnika rasipanja neutrona***

Drugačija primena neutrona u merenju sadržaja vlage u materijalima jeste tehnika rasipanja neutrona. Neutroni proizvedeni od radioaktivnog raspada u reaktoru visoko energetskih čestica, kada stupaju u interakciju sa atomima vodonika, energija se gubi i rezultira neutronima manje termičke energije. Merenjem isključivo broja rasutih termalno nastalih neutrona od izloženosti neutronske izvoru, gustina atoma vodonika se može proceniti kao i sam sadržaj

nivoa vlage [58]. Tačnost merenja vlažnosti ovom tehnikom je dosta visoka, ali prostorna rezolucija je dosta slabija nego kod tehnike slabljenja zračenja usled efekta rasipanja.

### ***3.3. Dodatne tehnike u razvoju***

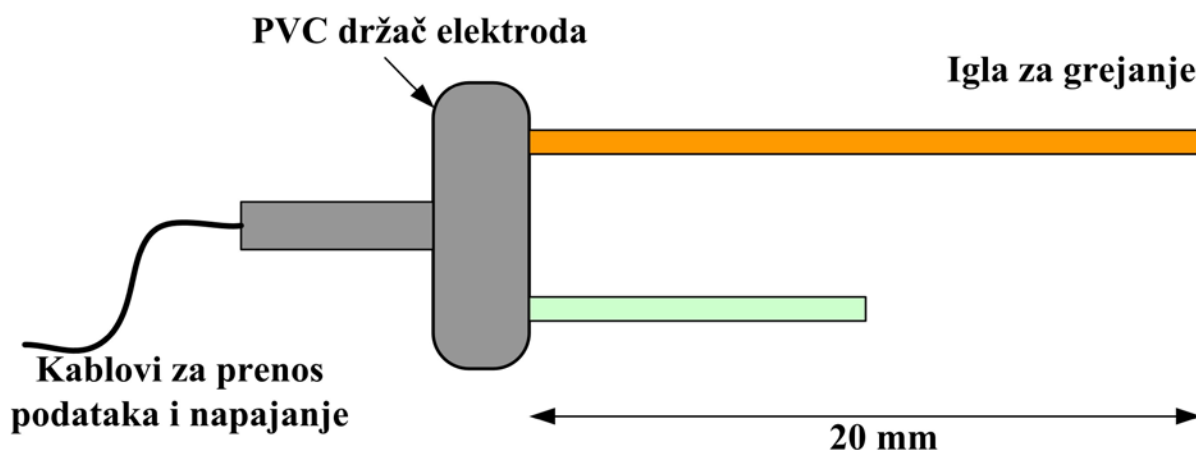
Iz prethodno opisanih tehnika može se zaključiti da ne postoji nijedna tehnika koja će obezbediti neophodne informacije na licu mesta za potrebe razvoja modela merenja. Tehnike koje se mogu koristiti na licu mesta su neophodne građevinskim stručnjacima kako bi im obezbedile informacije za poboljšanje dijagnoza i razumevanje problema u građevinarstvu koji nastaju zbog povećane koncentracije vlage. Postoje tri nove metode za merenje vlage u građevinskoj industriji a to su:

- Metoda dve sonde,
- Reflektometrija u vremenskom domenu (TDR),
- Merenje vlage bazirano na merenju električnog otpora.

Ove tri nove tehnike biće opisane u nastavku.

#### ***3.3.1. Metoda toplotnog impulsa sa dve elektrode***

U oblasti merenja vlage, pojam „dual sonda” se pojavljuje od nedavno [59]. U suštini, kratkotrajni impuls energije (tipično dužine od oko 10 sekundi) se primenjuje na igli sa „zagrejanim” vrhom. Druga igla predstavlja „senzor temperature” koja sadrži termoelement (na primer) beleži maksimalni rast temperature na određenoj udaljenosti od zagrejane igle.



Slika 3.6. Šematski prikaz metode sa dve sonde



Slika 3.6. daje šematski prikaz opisane metode. Ovaj temperaturni rast, u kombinaciji sa znanjem o zapreminskom toplotnom kapacitetu suvog materijala omogućava da se utvrdi sadržaj vlage. Napomena je da nekoliko termoelemenata može biti inkorporirano u istu iglu kako bi se omogućilo snimanje profila vlage. Tehnika u suštini nije složena i oprema koja je potrebna je standardna i relativno jeftina. Ona obuhvata sonde, stabilno električno napajanje i sistem za snimanje podataka.

Prednost ove tehnike jeste što je praktično neosetljiva na prisustvo soli u materijalu koji se meri. Osim toga, kao što je prikazano, tačne promene u sadržaju vlage su moguće čak i kada apsolutna merenja vlage nisu moguća zbog nepoznatih osobina materijala.

Metoda toplotnog impulsa sa duplim elektrodama predstavlja dobru metodu za merenje sadržaja vlage u građevinskim materijalima. Dupla sonda je instrument sa temperaturnim senzorom pozicioniranim na fiksnoj udaljenosti od izvora toplote i može meriti zapreminski temperaturni kapacitet materijala  $\rho c_p$  ( $Jm^{-3}K^{-1}$ ) kao:

$$\rho c_p = \frac{q}{\pi e r^2 \Delta T_m} , \quad (3.1)$$

gde je  $q$  količina energije primenjena po jedinici dužine grejača ( $Jm^{-1}$ ),  $e$  je osnova prirodnog logaritma,  $r$  je udaljenost između grejača i toplotnog senzora ( $m$ ),  $\Delta T_m$  je maksimalni porast temperature ( $K$ ) koji se javlja na udaljenosti  $r$  od izvora [60]. Ovaj model je za idealni grejač koji beskonačno dugo oslobađa toplotu  $q$  u trenutnom pulsu. Utvrđeno je da za materijale tipične sonde i grejnog vremena, greške u  $\rho c_p$  povezane sa ovim modelom su zanemarljive (<1%). Za vlažne materijale:

$$\rho c_p = \rho_0 c_0 + 4187 w , \quad (3.2)$$

gde je  $\rho_0$  je gustina suvog materijala,  $c_0$  je specifični toplotni kapacitet suvog materijala i  $w$  je sadržaj vlage ( $kgm^{-3}$ ). Veza pretpostavlja da je toplotni kapacitet vode konstantan  $4187 Jkg^{-1}K^{-1}$ . Dakle, ukoliko možemo da merimo  $\rho_0 c_0$ , znajući  $\rho c_p$  iz merenja sonde imamo:

$$w = \frac{\rho c_p - \rho_0 c_0}{4187} . \quad (3.3)$$

Sada, je  $\rho_0 c_0$  donekle okarakterisan za mnoge materijale [61, 62]. Takođe, je moguće meriti  $\rho_0 c_0$  (kalibracija sonde za specifične materijale) primenom standardnih laboratorijskih tehnika. Tako je moguće tačno određivanje  $w$ . Važna napomena je, da iako  $\rho_0 c_0$  nije poznata, onda se promena

$w$  u vremenu i dalje može precizno odrediti. U tom slučaju kalibracija sonde za posebne materijale nije više potrebna.

Da bi sonda mogla da se koristi u građevinskim materijalima, svaki izvor grešaka ne smeju da rezultiraju značajnim odstupanjem od jednačine (3.1). Postoje potencijalni izvori grešaka pa je stoga potrebno pažljivo ispitati:

- Kretanje vlage u uzorku kao rezultat ulaza toplote,
- Rastojanje sonde,
- Dimenzije sonde,
- Vreme zagrevanja,
- Materijal sonde,
- Termalnu otpornost na kontaktima sonde/zid interfejsa,
- Greške u merenjima  $q$ ,
- Greške u merenjima  $\Delta T_m$ ,
- Greške zbog neadekvatnih pretpostavki homogenosti materijala.

Istraživanja koja su u toku obrađuju ove probleme putem modeliranja i eksperimentalnih radova [60].

### ***3.3.2. Reflektometrija u vremenskom domenu***

Koncept TDR je krajnje jednostavan, i oslanja se na osnovne fizičke principe na širenju elektromagnetnih signala duž talasovoda. Brzina ( $v$ ) odgovarajućeg elektromagnetnog signala (sa pogodnom frekvencijom da talasovod može da ga prenese) je vezana za brzinu svetlosti u vakumu ( $c$ ) i dielektričnu konstantu ili (relativnu propustljivost) okolnih dielektričnih medija ( $\epsilon_r$ ) jednačinom:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} . \quad (3.4)$$

Kako je brzina svetlosti u vakumu konstantna, brzina svetlosti koja se oslobađa je dielektrična konstanta i ništa više. Dielektrična konstanta je pak pod snažnim uticajem sadržaja vlage okolnih medija. Voda ima dielektričnu konstantu veću nego tipični građevinski materijali, otuda je TDR posebno osetljiva na prisustvo vlage i sa odgovarajućom kalibracijom materijala, apsolutna merenja sadržaja vlage mogu biti veoma precizno izvedena. Merenja vremena potrebnog da se signal vrati posle reflektovanja na kraju TDR talasovoda daje direktne mere jasne dielektrične konstante duž talasovoda. Modifikacijom jednačine (3.4), vreme  $t$  uzeto za signal koji putuje duž talasovoda dužinom  $L$  i povratak može se iskazati jednačinom:

$$t = \frac{2L\sqrt{\varepsilon_r}}{c} . \quad (3.5)$$

Praktičnost TDR zahteva izuzetno precizno merenje vremena za prenos signala i refleksiju, za sonde koje se koriste u građevinarstvu može biti reda nanosekunde. Stoga je za ovakva merenja potrebna elektronika visoke preciznosti. Takodje, je bitno da je svaka sonda ponaosob kalibrisana za određivanje dužine talasovoda i karakterističnog signala prenosa u okviru glave sonde. Kalibracija se može postići kroz uporedna merenja sondi u tečnostima sa dobro definisanim dielektričnim svojstvima. Pošto tehnika meri prosečni sadržaj vlage po dužini talasovoda, profili vlage ne mogu biti izmereni jednom sondom.

Jedna od prednosti TDR jeste što se može kombinovati sa drugim električnim merenjima za procenu koncentracije soli u porama rastvora, i sa odgovarajućim analitičkim pristupom i kalibracijom, može se dijagnostifikovati slobodan i vezani sadržaj vode [63]. Merenja mogu biti izvršena i analizirana za nekoliko sekundi korišćenjem odgovarajućeg sistema za obradu podataka mogu se pratiti dinamičke promene sadržaja vlage u okviru materijala. Uz odgovarajuću kalibraciju, TDR može izmeriti apsolutni sadržaj vlage nekog materijala sa preciznošću od 2% [64].

Dva glavna izazova u primeni TDR metode za merenje i praćenje koncentracije vlage su dizajn i instalacija senzora.

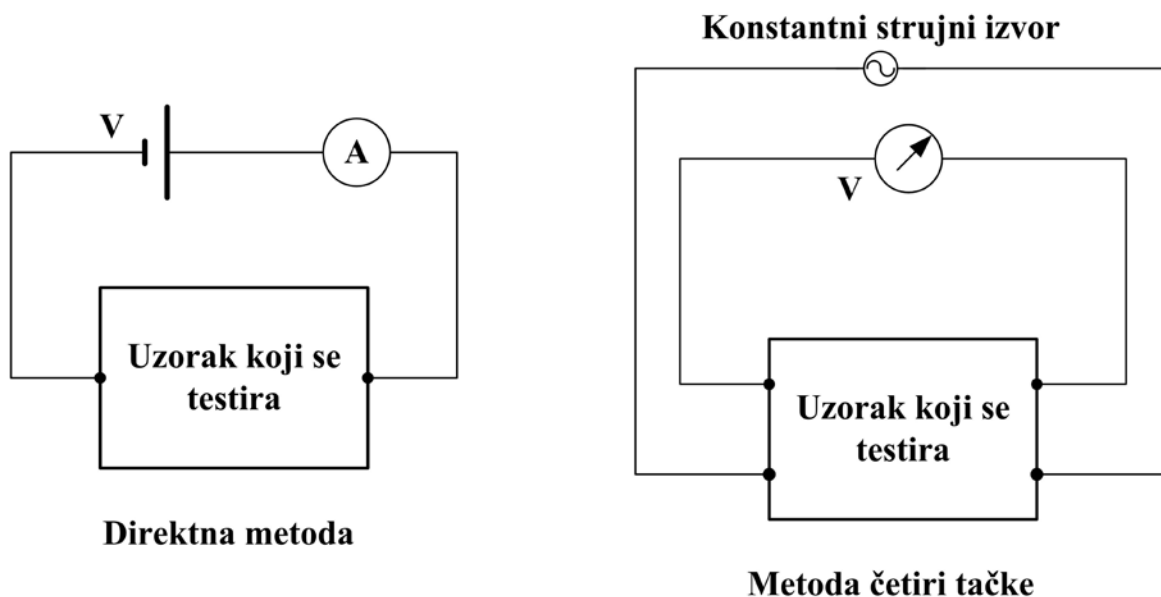
Prvi izazov je dizajn i razvoj odgovarajućih senzora koji se mogu kalibrisati zbog preciznog merenja sadržaja vlage. U merenju vlage zemljišta, TDR metoda ima tendenciju da budu relativno dugo korišćena kao komercijalna metoda koja može da prati nivo prisutne vlage u zemljištu na nivou korena biljke. Za građevinske aplikacije kraća dužina talasovoda je obavezna.

Za primenu u građevinskim aplikacijama uobičajena su merenja sa tri različite dužine talasovoda (50, 75 i 100 mm).

Dok primena TDR tehnike u zemljištu ne predstavlja veliki problem, primena senzora u građevinskim materijalima je daleko veći izazov. Za dvostruki talasovod TDR senzor mora da ima dve pristupne izbušene rupe da bi se senzor instalirao. Kontakt između senzora i materijala mora da bude dobar kako bi se sprečilo stvaranje džepova vazduha, koji mogu da utiču na merenja. Ove zahteve je za neke materijale nemoguće postići, na primer, za beton sa velikom količinom krupnog agregata može se dokazati da je primena ovog pristupa teško izvodljiva.

### 3.3.3. Električne metode

Osnovne metode električnog otpora ili metode merenja provodljivosti nude jednostavnu i jeftinu strategiju za merenje sadržaja vlage u građevinskim materijalima. Najosnovniji sistemi funkcionišu dovođenjem DC napona između dve sonde i merenjem dobijene struje.



**Slika 3.7. Osnovni blok dijagrami metode sa dve elektrode i metode sa četiri tačke**

Mada su komercijalno dostupni, ovi uređaji nude jako loše performanse usled polarizacije i problema kontakata elektroda. Bolje performanse su ostvarene korišćenjem AC pobudnog potencijala ili struja da se prevaziđe elektrolitička polarizacija sonde. Međutim, problemi kontakata elektroda mogu i dalje biti prisutni.

Dobro predstavljena tehnika za prevazilaženje problema kontakta je metoda četiri tačke koja je prvi put prikazana od strane *Schlumberger* 1920-e za potrebe merenja otpornosti terena. Osnovna konfiguracija dve elektrode i metode četiri tačke je prikazana na slici 3.7.

Tehnika četiri tačke je zasnovana na korišćenju konstantne struje generatora za generisanje struje u uzorak kroz dve elektrode i dodatne dve elektrode koje se koriste za merenje eventualnog pada napona u različitim tačkama na površini materijala. Korišćenjem konstantne struje generatora, struja koja teče kroz materijal će u velikoj meri biti nezavisna od sonde/otpora kontakata materijala. Otpor nekog materijala je definisan kao otpor između površina kubnih jedinica mere materijala. U praksi ovo bi bilo jako nepraktično za sprovođenje na licu mesta i postala je uobičajena praksa da se izmeri otpornost na površini materijala i zatim izračuna vrednost otpora koristeći trenutno izmereni napon i poznavanje konfiguracije elektroda koje se koriste. Tehnika se dobro pokazala i koristi se za otkrivanje podzemnih voda, nafte, razlike u slojevima stena i arheoloških nalazišta ispod terena. Ključna karakteristika ove metode, koja tek treba da bude eksploatisana u građevinskim merenjima, je da može da obezbedi prostornu rezoluciju i zato nudi mogućnost otkrivanja odstupanja vlage ispod površine materijala.

Kada se struja generiše u homogen materijal na površini tačke izvora poteći će iz elektrode kreirajući poluloptu izjednačene površine. Potencijalni nagib stoga zavisi od gustine struje i otpornosti materijala i dat je pomoću:

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \rho i, \quad (4.6)$$

gde  $\rho$  predstavlja otpornost materijala i  $i$  predstavlja trenutnu gustinu struje.

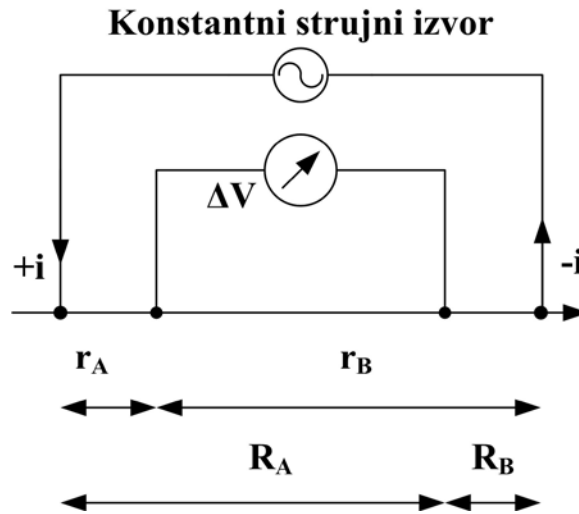
Iz ovoga sledi da se potencijal  $V_r$  u udaljenosti  $r$  od elektrode može dobiti integracijom jednačine (4.5) i otuda je:

$$V_r = \int \partial V = \frac{\rho i}{2\pi r}. \quad (4.7)$$

Ovo omogućava izračunavanje potencijala u bilo kom trenutku na ili ispod površine homogenog materijala. Ukoliko je materijal uniforman, otpornost treba da bude konstantna i nezavisna od oba rastojanja elektroda i geometrija. Međutim, ukoliko je prisutna nehomogenost kao što su oblasti visokog ili niskog sadržaja vlage, očigledno je da će otpornost varirati sa položajem elektrode.

U praksi će elektrode za merenje pada napona biti pozicionirane na konačnoj udaljenosti od elektroda kroz koje se propušta konstantna struja kao što je ilustrovano na slici 3.8. Stoga će

se potencijal u bilo kom trenutku sastojati od zbira potencijalnih doprinosa iz svake indukovane elektrode.



**Slika 3.8. Raspored elektroda za merenje metodom četiri tačke**

Razlika između dva napona osetljivih elektroda je izračunata iz jednačine (4.7) tako da je potencijalna razlika  $\Delta V$  data sa:

$$\Delta V = \frac{\rho i}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right]. \quad (4.8)$$

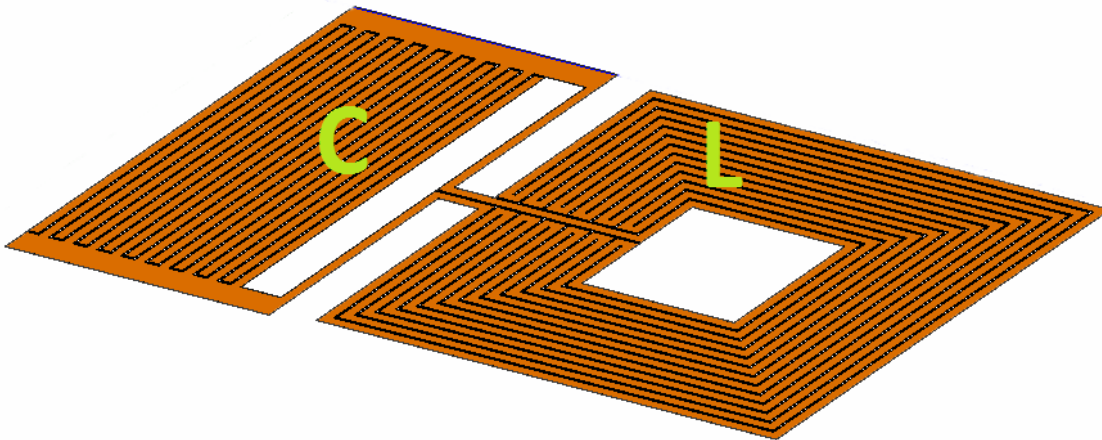
Očigledno prema ovome otpor se može izračunati za bilo koju konfiguraciju elektrode. Važno je napomenuti da očigledna otpornost ne predstavlja prosečnu otpornost materijala i u praksi može biti i negativne vrednosti [65-67].

## 4

## Princip rada i metoda merenja

## 4.1. Princip rada senzora

Senzori koji su opisani u ovom radu predstavljaju paralelno rezonantno LC kolo koje se sastoji od induktora i interdigitalnog (češljastog) kondenzatora (slika 4.1).

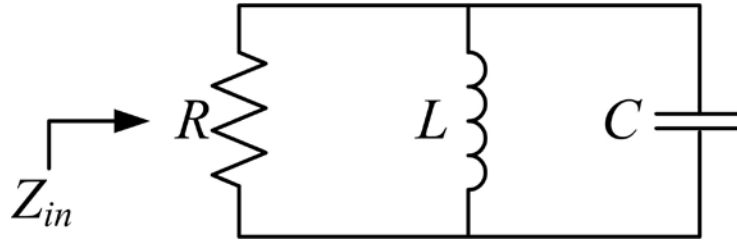


Slika 4.1. Rezonantno LC kolo

Kolo, sa najmanje jednim kondenzatorom i jednim induktorom, je u rezonanci, kada je imaginarna komponenta njene impedanse jednaka nuli, odnosno njegova impedansa je čisto otporna [68]. Paralelno rezonantno kolo, koje je prikazano na slici 4.2, sastoji se od otporne komponente  $R$ , induktivne komponente  $L$ , kapacitivne komponente  $C$ . Ulazna impedansa takvog kola je:

$$Z_{in} = \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right)^{-1}, \quad (4.1)$$

gde je  $j$  imaginarna jedinica  $\omega$  je kružna frekvencija definisana sa  $\omega = 2\pi f$ , gde je  $f$  rezonantna frekvencija kola.



Slika 4.2. Ekvivalentna šema rezonantnog LC kola

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (4.2)$$

$$Q = \omega \frac{(\text{prosečno uskladištena energija})}{(\text{gubitak energije})} = \omega \frac{W_L + W_C}{P_R}, \quad (4.3)$$

gde je  $W_L$  prosečna magnetna energija uskladištena u induktoru  $L$ ,  $W_C$  prosečna električna energija skladištena u kondenzatoru  $C$  i  $P_R$  je snaga disipacije otpornika  $R$ . Stoga je  $Q$  mera gubitaka nekog rezonantnog kola. U slučaju paralelnog rezonantnog kola:

$$W_C = \frac{1}{4}|U|^2 C, \quad (4.4)$$

$$W_L = \frac{1}{4}|U|^2 \frac{1}{\omega^2 L}, \quad (4.5)$$

$$P_R = \frac{1}{2} \frac{|U|^2}{R}, \quad (4.6)$$

gde je  $U$  napon rezonantnog kola. Zamenom jednačina 4.4 – 4.6 u jednačinu 4.3, za  $Q$  faktor dobija se sledeća jednačina:

$$Q = \omega_{res} RC = R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (4.7)$$

Propusni opseg ( $B$ ) paralelnog rezonantnog kola se definiše kao opseg frekvencija u kome srednja snaga na otporniku  $R$  je jednaka ili veća od polovine njegove maksimalne vrednosti. Odnosno, apsolutna vrednost impedanse strujnog kola je jednaka ili veća od maksimalne impedanse koja se javlja na rezonantnoj frekvenciji podeljena sa  $\sqrt{2}$ . Ovaj uslov je definisan sa [69]:

$$\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} = \frac{\sqrt{2}}{R}. \quad (4.8)$$

Dva rešenja koja daju pozitivne vrednosti ugaone frekvencije su:



$$\omega_{1,2} = \pm \frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} . \quad (4.9)$$

Propusni opseg je:

$$B = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi RC} . \quad (4.10)$$

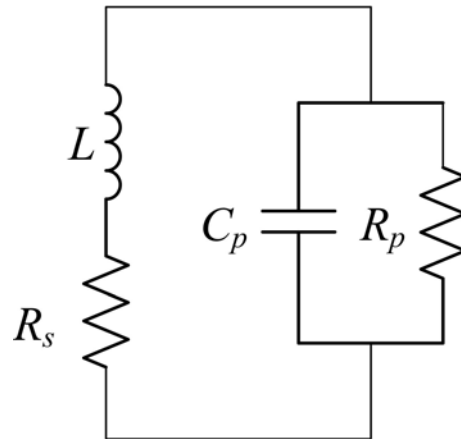
Na osnovu prethodnih jednačina može se zaključiti da Q faktor rezonantnog kola može biti opisan kao odnos rezonantne frekvencije i propusnog opsega:

$$Q = \frac{f_{res}}{B} \quad (4.11)$$

Stoga u frekventnom domenu,  $Q$  predstavlja relativnu oštrinu rezonantnog pika [70].

#### 4.1.1. Induktor

Induktori koji se koriste u LC kolima senzora predstavljeni u ovoj disertaciji nisu idealni, pa pored induktivnosti postoje i kapacitivne i otporne komponente. Ekvivalentno kolo induktora prikazano je na slici 4.3. Ekvivalentno kolo uključuje induktivnost  $L$  i redna otpornost obeležena sa  $R_s$ . Pored toga, ekvivalentno kolo sadrži paralelnu kapacitivnost  $C_p$ , i paralelnu otpornost  $R_p$ . Ekvivalentno kolo može se koristiti za izračunavanje impedanse induktora.

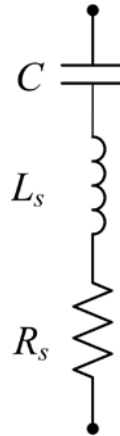


Slika 4.3. Ekvivalentno kolo induktora

#### 4.1.2. Interdigitalni (češljasti) kondenzator

U disertaciji je predstavljeno više tipova LC senzora koji se sastoje od induktora i interdigitalnog (češljastog) kondenzatora koji ima ulogu detekcije promene količine vlage

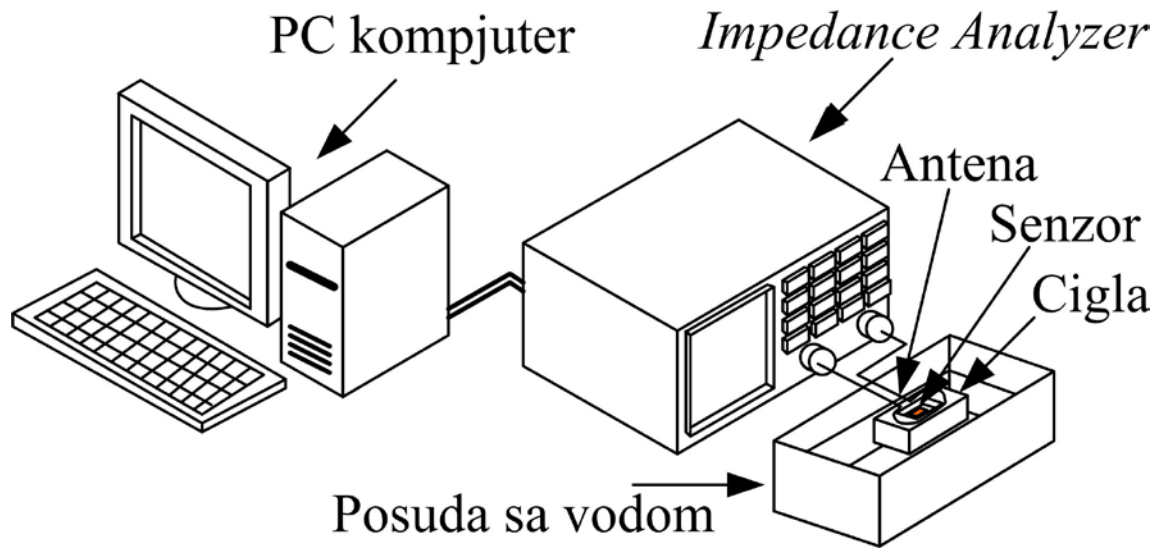
u građevinskom materijalu, tako što se promenom kapacitivnosti interdigitalnog kondenzatora menja rezonantna frekvencija (jednačina 4.2). Pored kapacitivnosti  $C$ , ekvivalentno kolo interdigitalnog kondenzatora čine još redna otpornost  $R_s$  i redna induktivnost  $L_s$ . Ekvivalentno kolo interdigitalnog kondenzatora prikazano je na slici 4.4.



**Slika 4.4. Ekvivalentno kolo interdigitalnog kondenzatora**

### ***4.3. Metoda merenja***

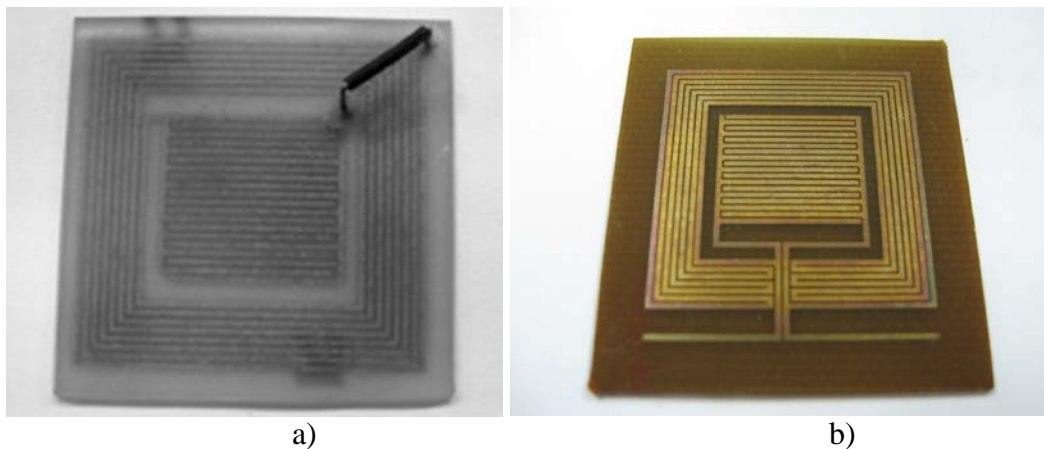
U svim eksperimentima koji su opisani u nastavku korišćen je isti princip merenja, pomoću antenskog namotaja merena je impedansa bežičnog LC senzora. Korišćena su dva analizatora impedanse, a razlog za to je bio što su neki tipovi senzora imali veću rezonantnu frekvenciju koja je izlazila iz opsega instrumenta pa je iz tog razloga korišćen drugi uređaj (HP4194A od 100 Hz do 40 MHz sa Z probama od 100 MHz; HP4191A od 1 MHz do 1000 MHz). Na slici 4.5. predstavljena je blok šema kompletne eksperimentalne postavke. U posudu sa vodom je postavljan građevinski materijal unutar koga je postavljen LC senzor a oko senzora je montiran antenski namotaj. Antenski namotaj je bio povezan na uređaj Impedance Analyzer kojim je upravljano pomoću računara (vršena su merenja i snimani su rezultati merenja). Posle svakog merenja impedanse vršeno je merenje mase opeke na preciznoj vagi (sa greškom  $\pm 2$  gr). Nakon toga je sledila statistička i grafička obrada rezultata merenja i poređenje rezultata sa komercijalnim instrumentom za merenje vlage.



Slika 4.5. Blok šema eksperimentalne postavke korišćene u eksperimentima

## 5 Merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima korišćenjem bežičnih LC senzora izrađenih na PCB-u

U ovom poglavlju biće predstavljeno više tipova bežičnih pasivnih LC senzora inovativnog dizajna za merenje vlage u građevinskim materijalima i konstrukcijama. Prvi tip senzora predstavlja paralelnu vezu spiralnog induktora i interdigitalnog kondenzatora koji su povezani paralelno. Najčešće korišćeni dizajn senzora koji se može naći u literaturi, a koristi se za bežična merenja je prikazan na slici 5.1 [71], i može se videti da najveći problem predstavlja dodatni kontakt koji se koristi da bi se spojio spiralni induktor i interdigitalni kondenzator. Osnovna prednost senzora koji su predloženi i opisani u ovoj disertaciji jeste to što su izrađeni u jednom metalnom sloju, odnosno nije potrebno naknadno lemljenje kontakta čime se ostvaruje mnogo bolji kontakt senzora sa podlogom. Takođe, prednost novog dizajna senzora je i to što je jeftiniji za proizvodnju. Za testiranje senzora korišćeni su građevinska opeka i YTONG blok kao jedni od najčešće korišćenih materijala u građevinarstvu. Senzori su izrađeni na štampanoj ploči (PCB) sa provodnim segmentima od bakra. Dielektrična konstanta vode je znatno veća u poređenju sa dielektričnom konstantom test uzoraka, pa je povećana koncentracija vode (odnosno vlage) u uzorcima uslovljavala smanjenje rezonantne frekvencije senzora.

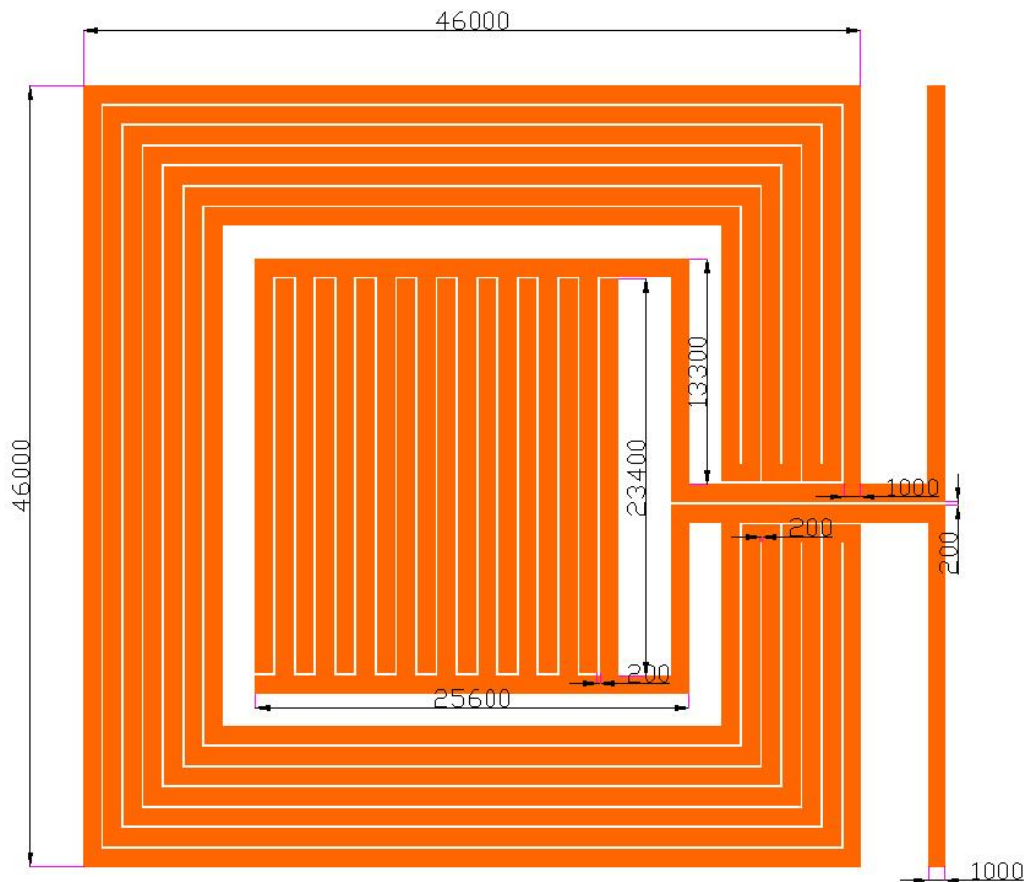


Slika 5.1. a) Dizajn bežičnog LC senzora koji se najčešće može naći u literaturi [71];  
b) Novi dizajn bežičnog LC senzora

Češljasti (interdigitalni) kondenzator se nalazi u unutrašnjem prostoru induktora realizovan u jednom metalnom sloju kao što se može videti na slici 5.1. b), bez *overpass* ili *underpass* provodnika (što je tipičan dizajn u slučaju kada induktor ima oblik kvadratne spirale kao što je prikazano na slici 5.1.a)).

### 5.1. Merenja vlage u građevinskim materijalima korišćenjem LC senzora tipa #1

Na slici 5.2 prikazane su dimenzije fabrikovanog LC senzora u  $\mu\text{m}$ . Pasivna priroda omogućava dugoročno praćenje određenih parametara bez ograničenja kao što je npr. vek trajanja baterije.

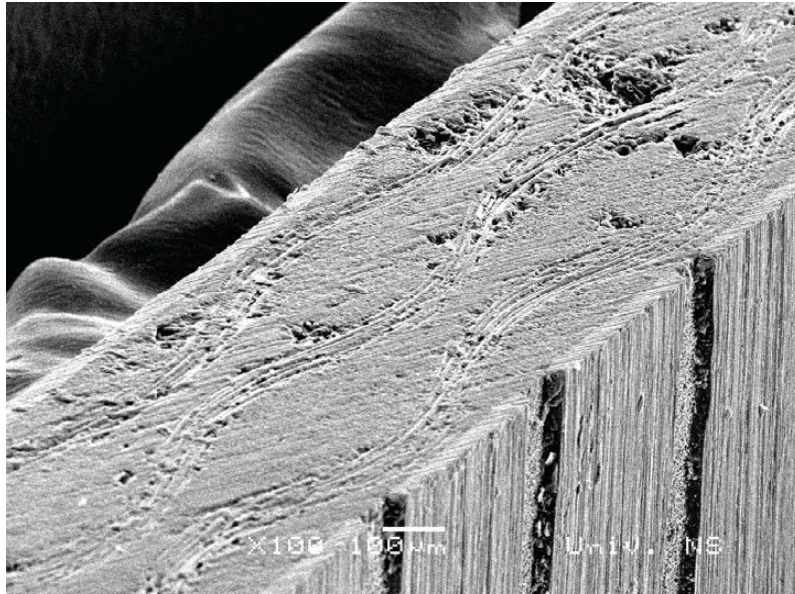


**Slika 5.2. Dimenzije fabrikovanog LC senzora tipa #1 sa novim dizajnom induktora**

Ovakvi senzori se obično realizuju tako da ili induktivnost ili kapacitivnost zavise od parametara od interesa i njihova promena može se detektovati kroz promenu

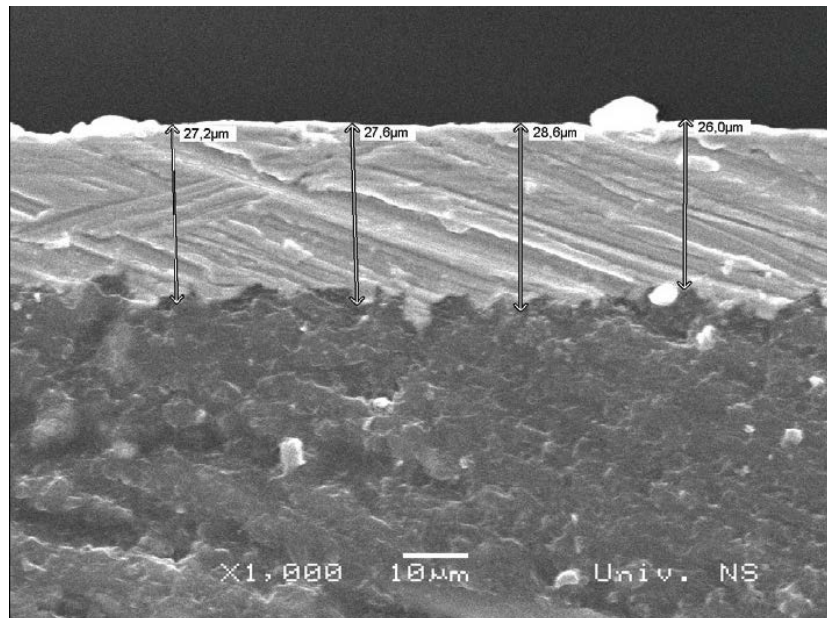
rezonantne frekvencije čitavog kola. U ovom slučaju senzor je projektovan tako da se vrednost induktivnosti održava konstantnom, dok se kapacitivnost interdigitalnog kondenzatora menja u zavisnosti od koncentracije vlage u testiranom građevinskom materijalu. Povećanje koncentracije vlage u građevinskom materijalu, dovodi do povećanja permitivnosti (permitivnost građevinskih materijala kreće se od 2-5 a vode od 70-80 u zavisnosti da li je voda tvrda ili meka), a to direktno utiče na povećanje kapacitivnosti kondenzatora što dovodi do smanjenja rezonantne frekvencije senzora, a te promene su detektovane pomoću antensnog namotaja.

Pasivan, bežični senzor koji se sastoji od induktora i češljastog (interdigital) kondenzatora (IDC) koristi se kao senzor za veliki broj primena, gde se iz promena kapacitivnosti kondenzatora jednostavno mogu izračunati određeni parametri životne sredine, kao što su: vlažnost, koncentracija nekih gasova i sl. Predloženi bežični senzor je dizajniran za merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima. Glavne odlike senzora su jednostavan dizajn, niski troškovi proizvodnje i najvažnije je da ne zahteva nikakvo napajanje. Senzor je napravljen u jednom metalnom sloju (bakar), što mu obezbeđuje odličnu adheziju (prijanjanje) na građevinski materijal na kojem je potrebno izvršiti merenje koncentracije vlage. Takođe, moguće je u toku izgradnje građevinskog objekta ubaciti senzor u građevinski materijal (beton, malter i sl.), a nakon toga se ručnim instrumentom za merenje rezonantne frekvencije može izvršiti merenje, i na osnovu izmerenih podataka moguće je odrediti koncentraciju vlage i odlučiti da li postoji potreba za odgovarajućim postupcima za zaštitu. Takođe, moguće primene mogu biti merenje vlage u različitim građevinskim materijalima (drvo, toplotna izolacija, beton, malter) i određenim strukturnim elementima zgrada, zatvorenih bazena, kao i na mnogim drugim mestima i okolnostima u kojima postoji potreba da se ima uvid u promene koncentracije vlage. Podaci o količini apsorbovane vode su veoma važni u građevinskoj praksi, jer vlaga narušava izolaciona svojstva, smanjuje otpornost na mraz i ubrzava proces propadanja građevinskog materijala i smanjuje životni vek građevinskih objekata.

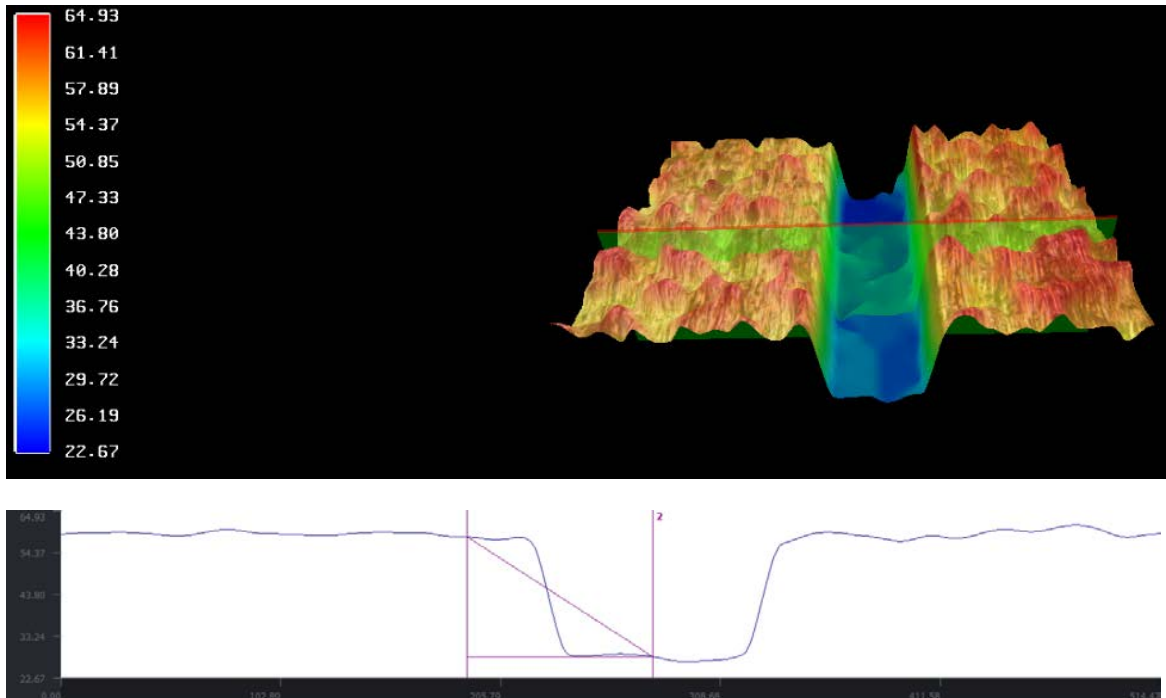


**Slika 5.3. SEM slika LC senzora, izgled poprečnog preseka i provodnih segmenata**

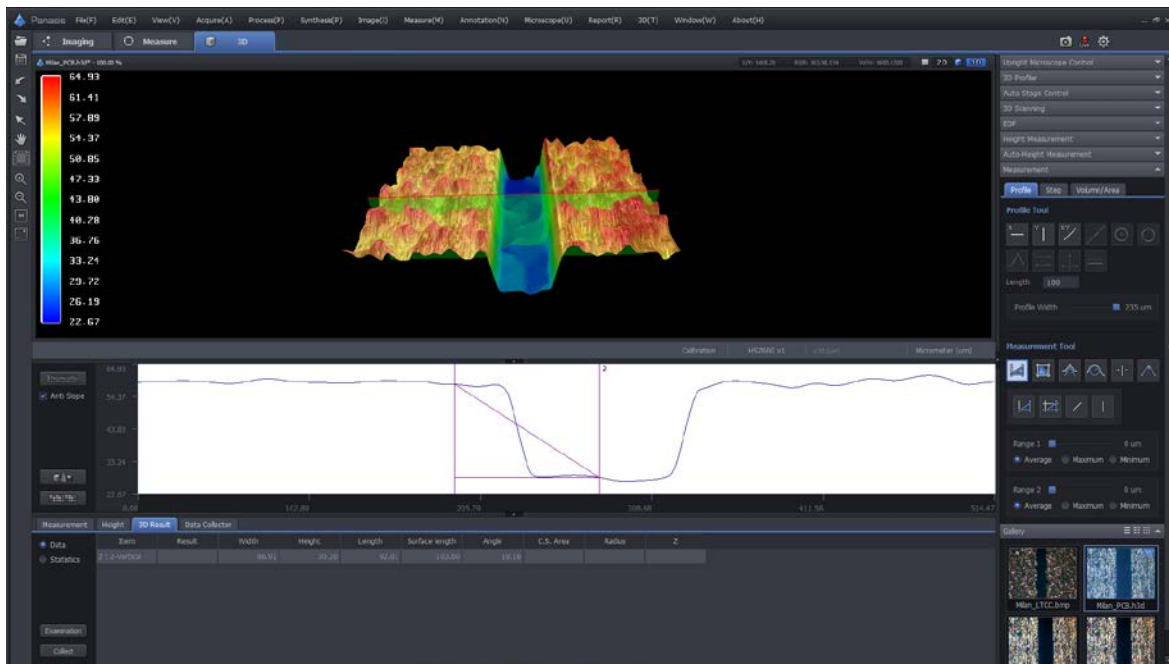
Debljina bakra direktno utiče na otpornost senzora su iz tog razloga urađena merenja na *SEM*-u i 3D profilometru. Slika 5.3 predstavlja *SEM* sliku i prikazuje izgled poprečnog preseka PCB supstrata i provodnog sloja bakra fabrikovanog LC senzora. Debljina sloja bakra je prikazana na slici 5.4 i može se zaključiti da ova debljina varira u opsegu od 26 μm do 28,6 μm.



**Slika 5.4. SEM slika LC senzora sa označenom debljinom provodnih segmenata**



Slika 5.5. 3D profil senzora izrađenog na PCB-u



Slika 5.6. Izgled softvera za merenje 3D profila materijala

Pored merenja pomoću SEM-a karakterizacija senzora izrađenih na PCB-u urađena je na 3D proilometru Huvitz HRM 300 [72], pri čemu su dobijeni jako slični rezultati kao i na SEM-u. Rezultati merenja 3D profila PCB-a prikazani su na slici 5.5.



Na slici 5.6 prikazan je izgled softvera za merenja profila materijala korišćenjem 3D profilometra. Rezultati koji su dobijeni za debljinu bakra na PCB supstratu kreću se od 30,20  $\mu\text{m}$  – 30,43  $\mu\text{m}$ .

Merenja su vršena beskontaktnim putem pomoću spregnutog antenskog namotaja. Dakle, promena koncentracije vlage u uzorku se meri bežično (antenskim namotajem) praćenjem promene rezonantne frekvencije senzora. Merenje promene rezonantne frekvencije se može zasnivati na merenju impedanse čitavog kola pomoću merača impedanse ili merenju promene rezonantne frekvencije senzora pomoću vektorskog analizatora spektra. Merenja su vršena pomoću instrumenata HP-4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer. Dielektrična konstanta vode je znatno veća u poređenju sa dielektričnom konstantom test uzorka, pa povećanje koncentracije vode (odnosno vlage) u uzorcima uslovljava povećanje kapacitivnosti interdigitetnog kondenzatora, što povlači smanjenje rezonantne frekvencije senzora, a to se može zaključiti iz dobro poznate formule:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.1)$$

gde je  $f_{res}$  rezonantna frekvencija kola, a  $L$  i  $C$  induktivnost induktora i kapacitivnost kondenzatora, respektivno. Test uzorci su potapani u posudu sa vodom u dubinu približno 10 mm, i na taj način su kapilarnim putem upijali vlagu par dana dok ne dođe do potpunog zasićenja. Nakon toga je sledio proces sušenja i merenja težine uzoraka kao i merenje rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora, u određenim vremenskim intervalima.



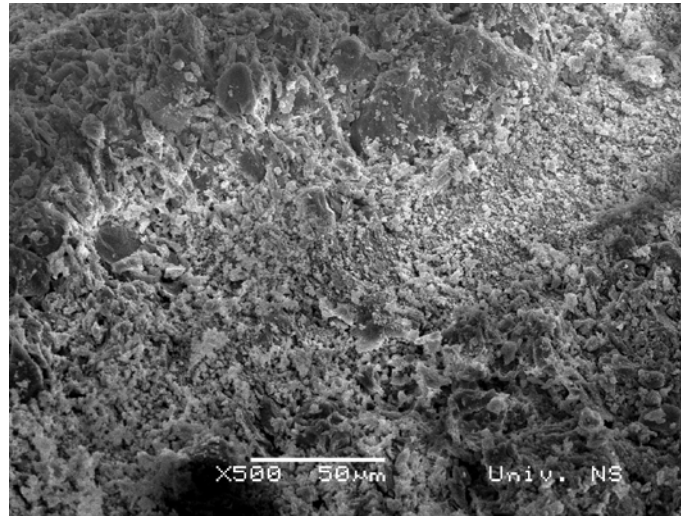
**Slika 5.7. Eksperimentalna postavka za merenje koncentracije vlage u opeci od pečene gline korišćenjem LC senzora, antenskog namotaja i instrumenta HP-4194A**

Eksperimentalna postavka za merenje rezonantne frekvencije je ilustrovana na slici 5.7. Određivanje sadržaja vode vršeno je merenjem mase suvog uzorka i uzorka koji je bio uronjen u vodu, i na taj način je određivan maseni udeo vode u ukupnoj težini uzorka (slika 5.8).



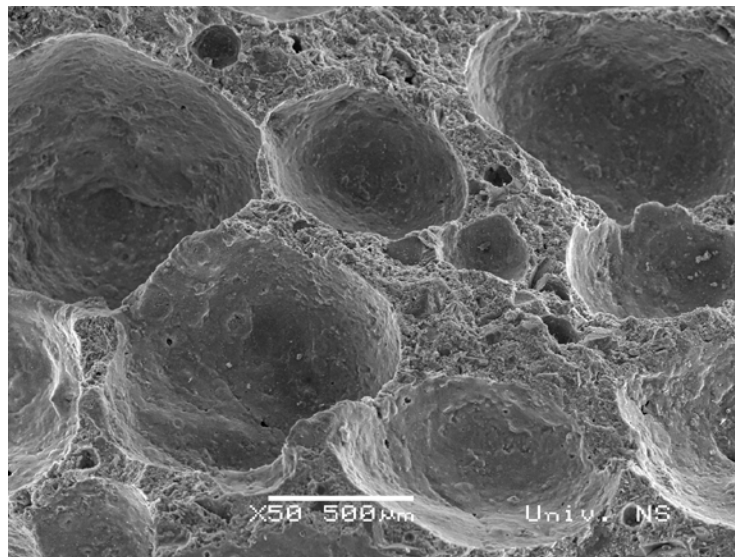
**Slika 5.8. Merenje mase opeke od pečene gline preciznom elektronskom vagom**

Za ispitivanje i testiranje su korišćeni opeka od pečene gline i YTONG blok kao jedni od najčešće korišćenih građevinskih materijala.



**Slika 5.9. SEM slika unutrašnje strukture opeke od pečene gline**

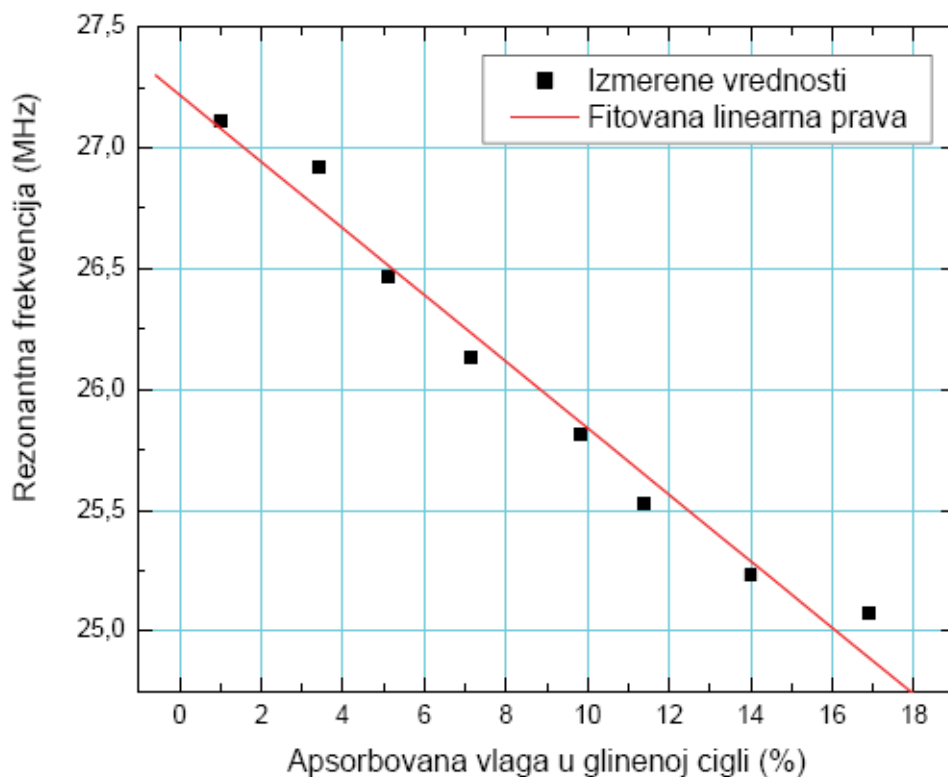
Opeka od pečene gline je tradicionalni građevinski materijal koji se koristi uglavnom za zidanje zidova. Faze u proizvodnji opeke od pečene gline su: ekstrakcija sirovina, mešanje i oblikovanje, sušenje, pečenje, pakovanje i distribucija. Opeka koja je korišćena u eksperimentu je dimenzija 250 mm × 120 mm × 65 mm. Ovaj proizvod je klasifikovan kao HD opeka (gustine 1400 kg/m<sup>3</sup>), za zidanje i zaštićen je u skladu sa EN 771-1 [73]. Na slici 5.9 prikazana je SEM slika strukture opeke od pečene gline.



**Slika 5.10. SEM slika unutrašnje strukture YTONG bloka**

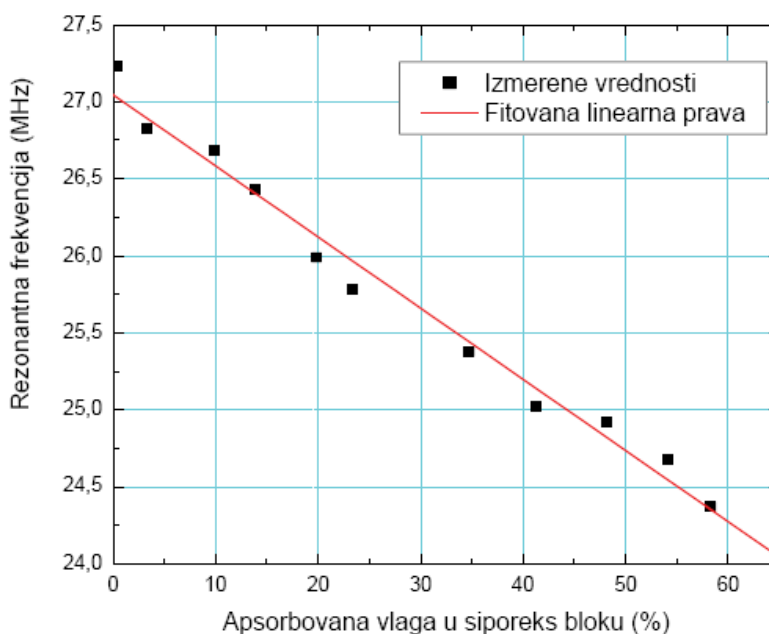
YTONG blok je relativno nov građevinski materijal koji se danas široko koristi za izgradnju zidova sa poboljšanim termičkim svojstvima i manje je mase od tradicionalnih građevinskih materijala. Laki ćelijski beton je napravljen od prirodnih sirovina - peska, kreča, cementa, vode i vazdušnog agensa. Gustina YTONG bloka je  $500 \text{ kg/m}^3$  i blok koji je korišćen za testiranje ima dimenzije  $230 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ . Namena YTONG blokova za zidanje definisana je u skladu sa EN 771-4 [74]. Na slici 5.10 prikazana je SEM slika strukture YTONG bloka.

Na slici 5.11 prikazana je zavisnost rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora tipa #1 u funkciji koncentracije vlage u opeci od pečene gline. Sa ovog grafika može se uočiti da se rezonantna frekvencija menja od 27,11 MHz do 25,07 MHz, a procenat apsorbovane vode u rasponu od 1 % do 16,4 %. Opseg promene rezonantne frekvencije je 2,04 MHz dok je promena koncentracije vlage ukupno 15,4 %. Može se, takođe, videti da je odstupanje izmerenih vrednosti od idealne linearne zavisnosti veoma malo (na slici je crvenom linijom prikazana linearna fitovana vrednost).



**Slika 5.11. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #1 u funkciji koncentracije vlage u opeci od pečene gline**

Zavisnost rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora tipa #1 od sadržaja vode u YTONG bloku je prikazana na slici 5.12. Sa slike se može videti da se rezonantna frekvencija menjala u opsegu od 27,5 MHz do 24,4 MHz, a procenat koncentracije vode u rasponu od 0,4 % do 58 %. Ukupna promena rezonantne frekvencije je 3,1 MHz, a promena koncentracije vode je ukupno 57,6 %. Na slici je crvenom linijom prikazana linearna fitovana vrednost. Zbog vazdušnih pora, YTONG blok ima veći stepen upijanja vode od opeke.



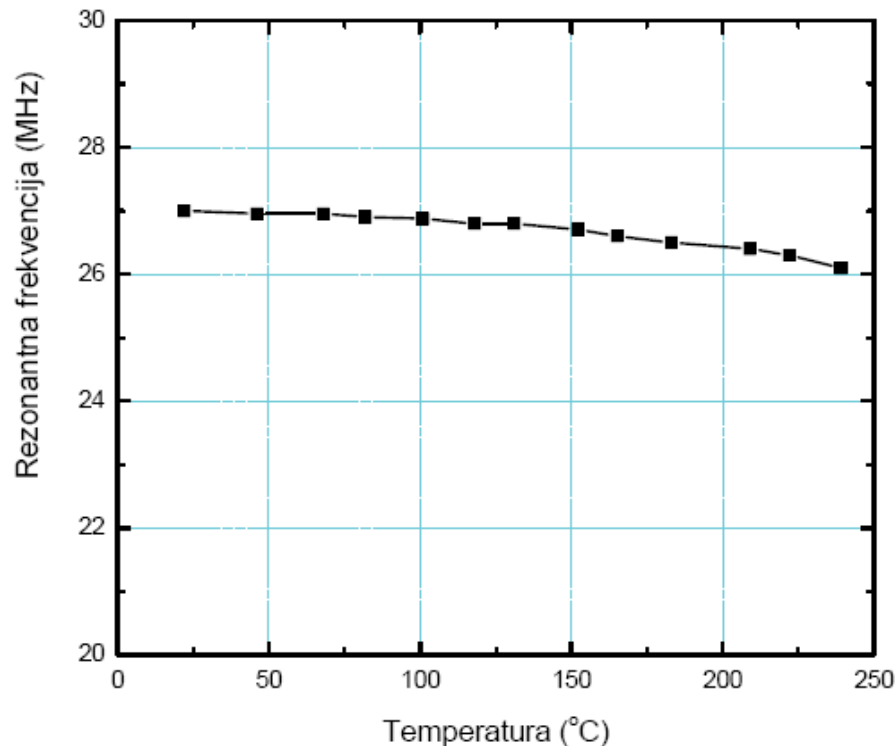
**Slika 5.12. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #1 u funkciji koncentracije vode u YTONG bloku**

U tabeli 5.1 prikazane su uporedne vrednosti rezonantne frekvencije za opeku i YTONG blok za iste vrednosti koncentracije vlage. Može se zaključiti da se za manje vrednosti vlage vrednosti rezonantne frekvencije za dva različita materijala razlikuju za svega 1%, dok se za veće vrednosti vlage u materijalu ta razlika povećava i za 10% vlage ta razlika iznosi 2,8%. Ova razlika nastaje zbog strukture materijala, jer opeka ima dosta homogeniju strukturu, za razliku od YTONG bloka koji ima veliki broj vazdušnih pora u svojoj strukturi. Zbog toga bi trebalo senzore koji su opisani u ovoj disertaciji, kalibrisati za svaki materijal posebno kao što rade poznati proizvođači mernih instrumenata (na primer uređaj Testo 606-2 [75], ima posebna podešavanja za svaki tip građevinskog materijala, i za svaku vrstu drveta).

**Tabela 5.1. Uporedne vrednosti merenja koncentracije vlage na dva različita tipa građevinskog materijala**

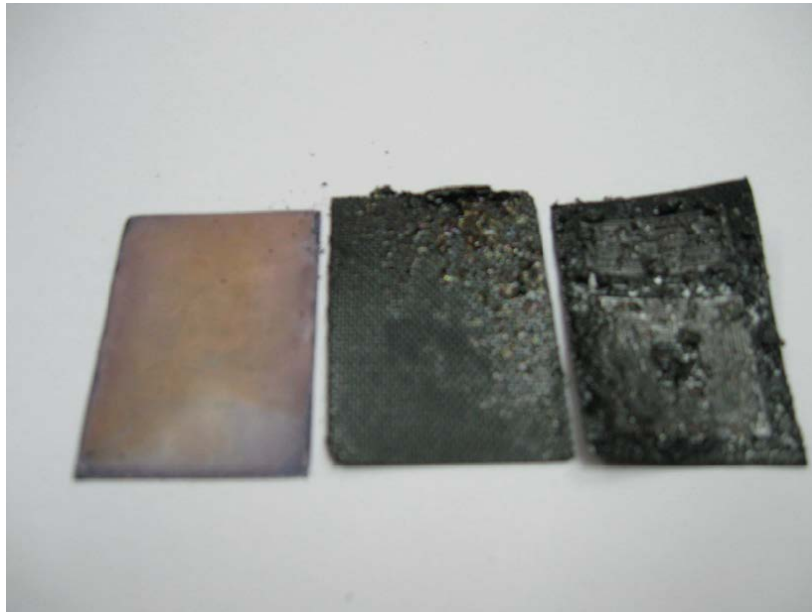
Tip građevinskog materijala	Koncentracija vlage	Rezonantna frekvencija [MHz]
Opeka	5 %	26,53
YTONG blok	5 %	26,81
Opeka	10 %	26,57
YTONG blok	10 %	25,84

Imajući u vidu da su građevinski materijali izloženi različitim uticajima okoline i različitim vremenskim uslovima, senzori koji se koriste u građevinskoj industriji treba da budu otporni na različite spoljašnje uticaje, a posebno na temperaturne promene. Zbog toga je ispitan uticaj temperature na rezonantnu frekvenciju opisanog senzora, kao i maksimalna temperatura koju mogu da izdrže bez oštećenja senzori koji su izrađeni na PCB-u. Za ovu analizu korišćena je standardna temperaturna peć kompanije ELECTRON [76].



**Slika 5.13. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #1 u funkciji temperature**

Zavisnost rezonantne frekvencije senzora u funkciji temperature (kod opeke bez uticaja vode) je prikazana na slici 5.14. Može se videti da se rezonantna frekvencija menja u opsegu od 27 MHz do 26,1 MHz, za temperaturne promene u opsegu od 25 °C do 240 °C (za veće temperature je došlo do spaljivanja PCB-a što je ilustrovano na slici 5.10). Može se zaključiti da je varijacija rezonantne frekvencije od 3,3 % veoma mala za tako širok temperaturni opseg. Na osnovu toga može se zaključiti da se predloženi dizajn LC senzora na PCB-u može uspešno koristiti za praćenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima u širokom opsegu temperatura i ostalih uslova sredine.



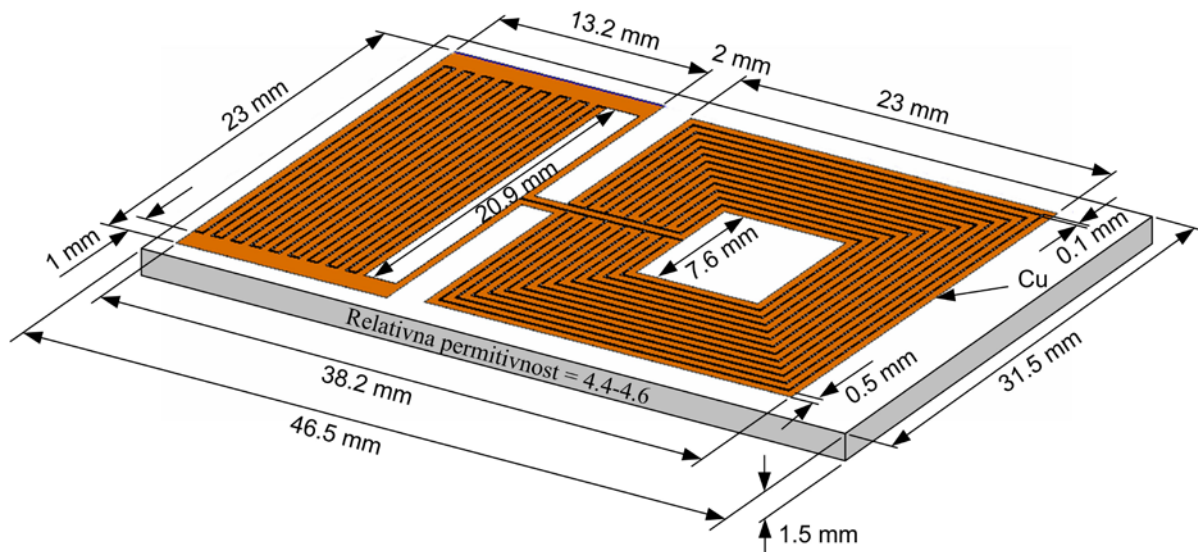
**Slika 5.14. Izgled spaljenog senzora nakon izlaganja temperaturi iznad 240 °C**

## ***5.2. Merenja vlage u građevinskim materijalima korišćenjem LC senzora tipa #2***

U ovom delu biće opisan LC sensor tipa #2 za merenje vlage u građevinskim materijalima. Glavna razlika u odnosu na senzor tipa #1 je taj što se induktor i kondenzator nalaze jedan pored drugog kao što je prikazano na slici 5.11. Spoljašnje dimenzije induktora su 23 mm x 23 mm. Kondenzator ima 18 prstiju dužine 20,9 mm sa razmakom između provodnih segmenata od 0,1 mm. Širina provodnih linija induktora i kondenzatora je 0,5 mm. Debljina bakra na štampanoj ploči po specifikacijama proizodača je 35  $\mu$ m. Ukupna masa senzora je 5,37 grama. Površina induktivnog dela



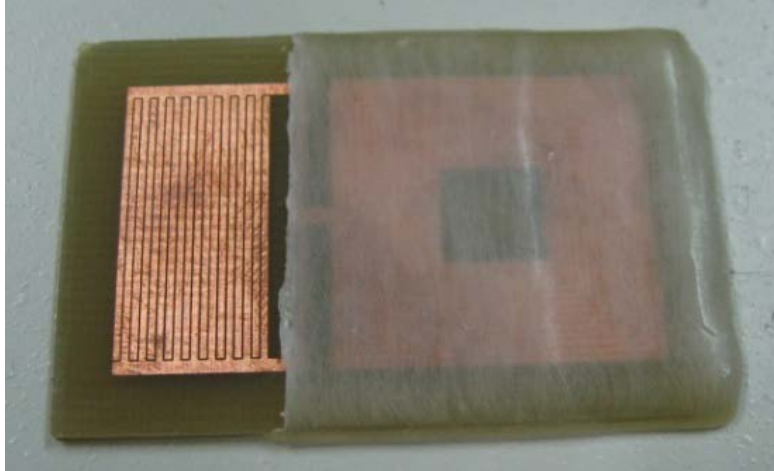
senzora bila je obložena tankim slojem parafina, čija je debljina oko  $500\ \mu\text{m}$  u cilju sprečavanja kratkog spoja prilikom kondenzacije vlage na senzoru. Sensor predstavlja paralelnu vezu induktora  $L$  i interdigitalnog kondenzatora  $C$ , povezanih kao što je prikazano na slici 5.15 [77].



**Slika 5.15. Inovativni dizajn LC senzora tipa #2 i njegove dimenzije**

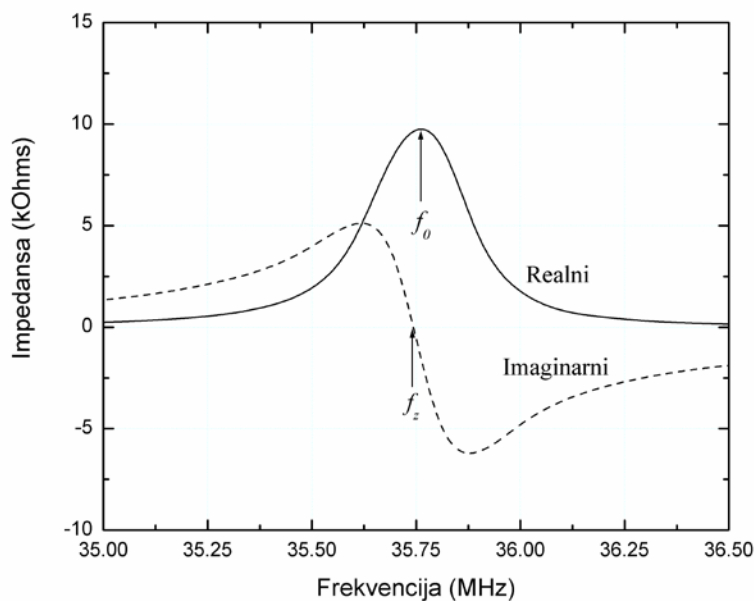
Senzor je napravljen na jednostrano štampanoj ploči (PCB) sa bakrom kao provodnim materijalom. Kada kapacitivni deo senzora dođe u dodir sa vodom, njegova efektivna dielektrična konstanta se povećava zbog visoke dielektrične konstante vode. Dielektrična konstanta vode se kreće od 70-80 u zavistnosti od toga da li je voda tvrda ili meka, dok se dielektrična konstanta građevinskih materijala kreće od 2-5. Tako da će i male količine vode u građevinskom materijalu izazvati promene ekvivalentne kapacitivnosti. Varijacija efektivne dielektrične konstante menja kapacitet kondenzatora, što dovodi do promene rezonantne frekvencije senzora i omogućava praćenje sadržaja vode ili nivoa vlažnosti. Fabrikovan senzor tipa #2 je prikazan na slici 5.16. Tanak sloj parafina može se videti na slici, i prekriva induktivni deo senzora, sprečavajući kratke spojeve između namotaja induktora.





**Slika 5.16. Fabrikovani LC senzor tipa #2, sa slojem parafina preko induktivnog dela**

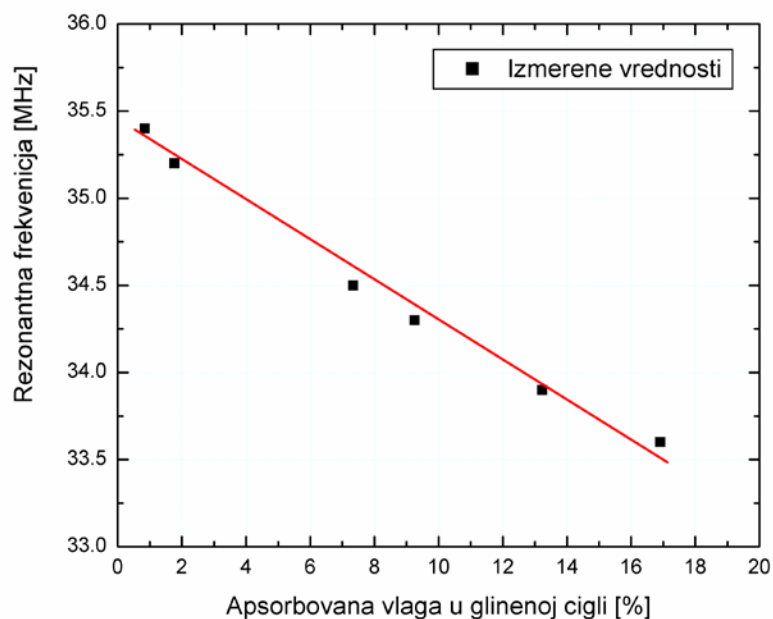
Izmerene vrednosti induktivnosti induktivnog dela LC senzora i kapacitivnosti kapacitivnog dela (izrađenih na odvojenim PCB podlogama) bili su 1,57 mH i 12,71 pF, respektivno. U skladu sa ovim vrednostima i korišćenjem jednačine (5.1), izračunata rezonantna frekvencija (bez vlage) je 35,64 MHz. Vrednost izmerene rezonantne frekvencije celog LC senzora 35,76 MHz (slika 5.17), što je u dobroj saglasnosti sa izračunatim vrednostima.



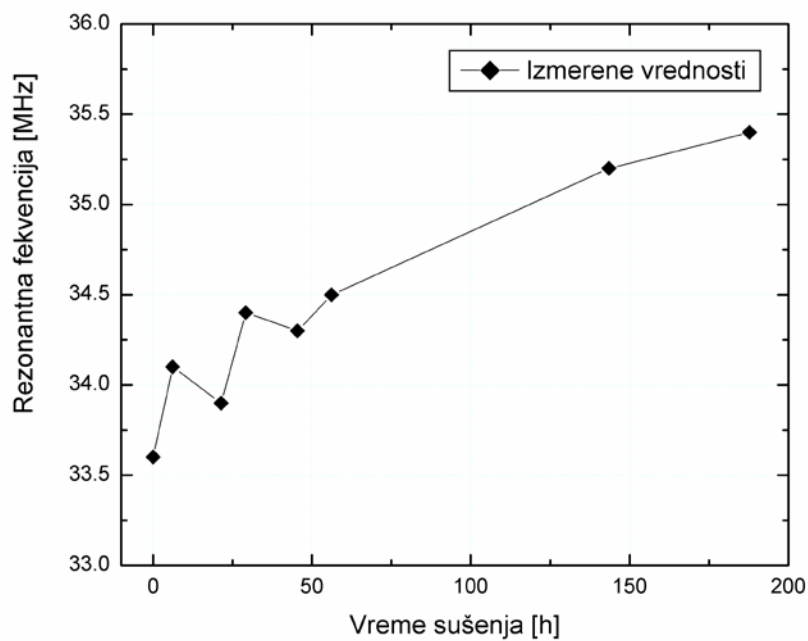
**Slika 5.17. Realni i imaginarni deo impedanse za LC senzor tipa #2**

U toku eksperimenta LC senzor je bio postavljen u sredini opeke ili YTONG bloka. Antenski namotaj je smešten oko strukture senzora, a izvodi antene su povezani sa analizatorom impedanse HP-4194A. Građevinska opeka je bila postavljena na keramičke podmetače da bi se osiguralo da cigla bude u vodi oko 10 mm visine. Merenja su rađena u dva ciklusa tokom apsorpcije vode iz bazena, i tokom ciklusa sušenja opeke. Merenje apsorpcije vode u opeci (ili YTONG bloku) je vršeno merenjem težine, istovremeno sa merenjem impedanse senzora. Naime, masa suve opeke je prvo izmerena, na preciznoj vagi *Libela Elsi BV-P3853*, pre stavljanja cigle u bazen sa vodom. Kada je opeka postavljena u bazen sa vodom, nakon određenog perioda (oko dva dana), opeka je bila zasićena vodom (nije mogla da apsorbuje više vode). Nakon toga, merenje impedanse senzora LC (u sredini) i težine opeke vršena su istovremeno. Kroz odnos težine mokrog i suvog uzorka, procenat apsorpcije vode je izračunat.

Slika 5.18 prikazuje zavisnost rezonantne frekvencije u funkciji sadržaja vlage u građevinskoj opeci. Na osnovu grafika može se zaključiti da se rezonantna frekvencija menja od 35,4 MHz do 33,6 MHz, dok se procenat vlage u građevinskoj opeci povećava od 1 % do 17 %. Varijacija rezonantne frekvencije je 1,8 MHz za promenu koncentracije vlage od 16 %. Odstupanje izmerenih vrednosti od idealne linearne zavisnosti je veoma malo (maksimalna greška je 0,29 %). Slika 5.19 predstavlja zavisnost rezonantne frekvencije u funkciji vremena sušenja. Vreme potrebno za kompletno sušenje opeke na sobnoj temperaturi je oko 190 sati (približno 8 dana). Tokom sušenja voda počinje da isparava, što uslovljava i smanjenje dielektrične konstante i kapacitivnosti, a samim tim i rezonantna frekvencija se povećava što se može videti na slici 5.19.

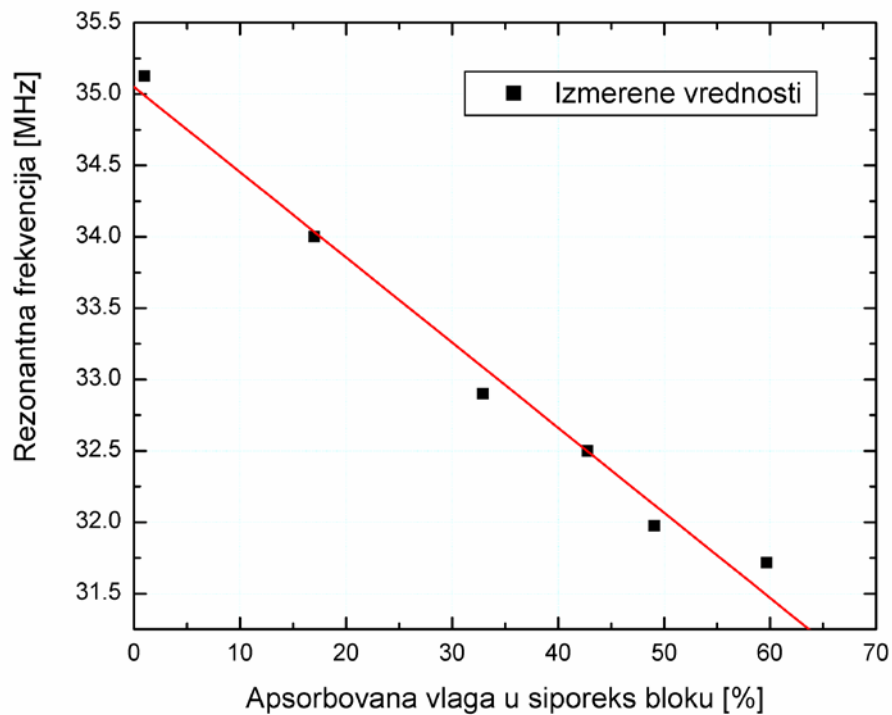


**Slika 5.18. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #2 u funkciji apsorbovane vode u opeci od pečene gline**

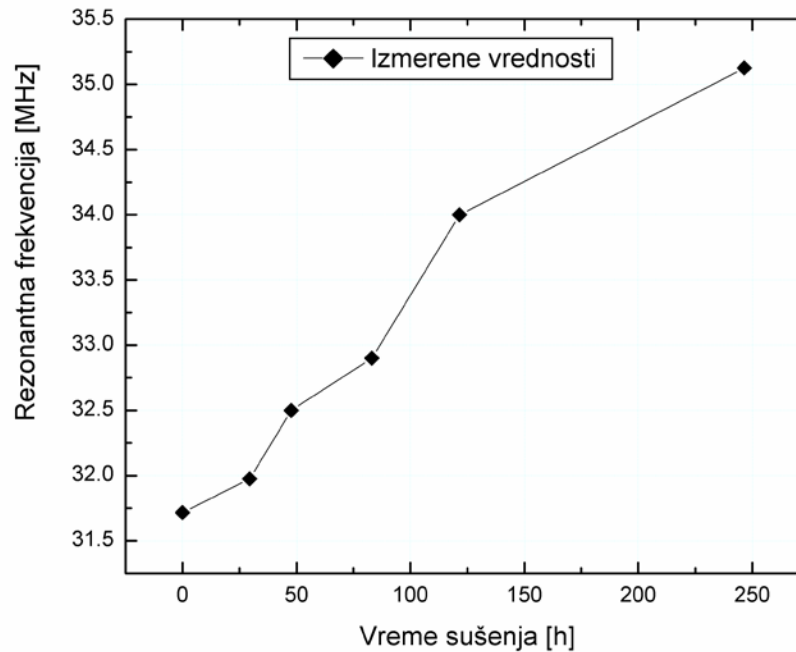


**Slika 5.19. Rezonantna frekvencija LC senzora tipa #2 kao funkcija vremena tokom sušenja opeke na sobnoj temperaturi**

Zavisnost rezonantne frekvencije u funkciji sadržaja vode u YTONG bloku je prikazana na slici 5.20. Sa ove slike može se videti da se rezonantna frekvencija promenila od 35,1 MHz do 31,8 MHz, dok je procenat apsorbovane vode varirao u rasponu od 1 % do 59 %. Ukupna promena rezonantne frekvencije je 3,3 MHz za promenu količine vlage od 58 %. Odstupanje izmerenih vrednosti od idealne linearne zavisnosti je oko 0,68 %. Zavisnost rezonantne frekvencije u funkciji vremena tokom sušenja YTONG bloka je prikazano na slici 5.21. Vreme potrebno za sušenje YTONG bloka je oko 250 časova (nešto više od 10 dana).



**Slika 5.20. Promena rezonantne frekvencije LC senzora tipa #2 u funkciji apsorbovane vode u YTONG bloku**



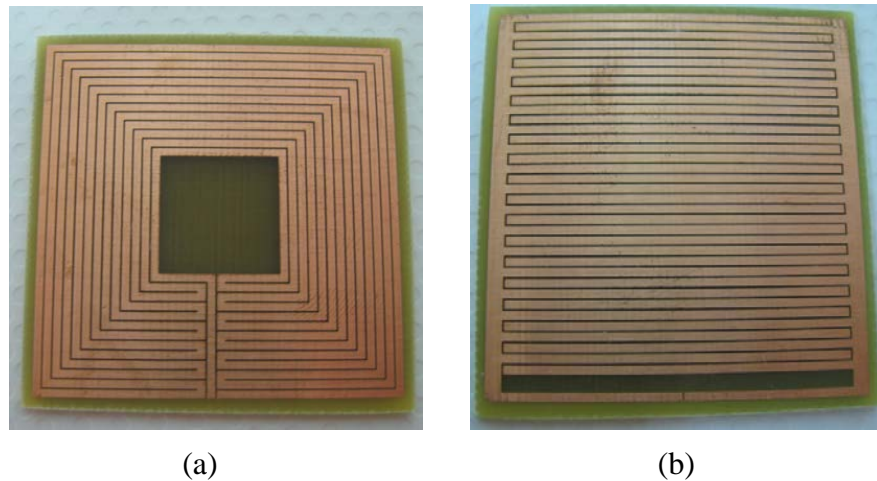
**Slika 5.21. Rezonantna frekvencija LC senzora tipa #2 kao funkcija vremena tokom sušenja YTONG bloka na sobnoj temperaturi**

YTONG blok ima skoro tri puta veću moć upijanja vode od opeke zbog svoje porozne strukture. Rezonantna frekvencija senzora kod merenja vlage u opeci je bila manja nego kod YTONG bloka (npr., za 15% apsorpcije vode  $f_{res}=33,72$  MHz za opeku, dok  $f_{res}=34,12$  MHz za YTONG blok ) opeka je gušća i ima veću efektivnu dielektričnu konstantu.

Iz prikazanih grafika može se zaključiti da se predloženi LC senzor tipa #2 može primeniti za praćenje promene vlažnosti u zidovima i podovima građevinskih objekata koji se nalaze u vlažnim područjima. Rezonantna frekvencija senzora je linearno proporcionalna sadržaju vode u građevinskim materijalima. Kontinuirano praćenje vlage u građevinskim materijalima će omogućiti efikasno upravljanje, rehabilitaciju i održavanje zgrada, crkava, mostova i drugih objekata.

### 5.3. Merenja vlage u građevinskim materijalima korišćenjem LC senzora tipa #3

Senzor tipa #3 je jedini senzor opisan u ovom radu, a napravljen je u dva metalna sloja (bakar), slika 5.22, pružajući odlično prijanjanje testiranih građevinskih materijala. Dobar kontakt između senzora i materijala u kome se testira sadržaj vode je od suštinskog značaja za dobijanje preciznih i tačnih rezultata. Direktni kontakt između senzora i građevinskog materijala se postiže donjom stranom senzora (kapacitivni deo senzora) u obliku interdigitalnog kondenzatora ( Slika 5.22. (b)) .



**Slika 5.22. Izgled LC senzora tipa #3 izrađen na dvostranoj PCB ploči; (a) induktivni deo senzora sastavljen od 13 namotaja; (b) izgled druge strane senzora koja predstavlja interdigitalni kondenzator**

Kao prethodno opisana dva senzora i LC senzor tipa #3 je izrađen na PCB-u. Parametri LC senzora tipa #3 dati su u Tabeli 5.2 za induktivni deo senzora, a u tabeli 5.3 su dati parametri kapacitivnog dela. Za očitavanje rezonantne frekvencije senzora korišćen je antenski namotaj i analizator impedanse HP4194A. Kod merenja za LC senzor tipa #3 korišćena je Z sonda iz razloga što je u tom slučaju opseg merenja instrumenta od 100 Hz do 100 MHz, a rezonantna frekvencija LC senzora tipa #3 je 95,85 MHz. Kapacitet interdigitalnog kondenzatora zavisi od geometrijskih parametara samog kondenzatora i to redom, od razmaka između prstiju ( $s$ ), dužine prstiju ( $l$ ), dužine gap-a ( $g$ ) i širine prstiju ( $w$ ), debljine provodnika ( $t$ ) i dielektrične konstante materijala između prstiju.

**Tabela 5.2. Parametri induktivnog dela senzora tipa #3**

Parametar	Vrednost
Geometrija namotaja	kvadratni
Dužina spoljne strane	23 mm
Broj namotaja	13
Širina namotaja	0,5 mm
Razmak između namotaja	0,1 mm
Debljina provodnika	0,034 mm

**Tabela 5.3. Parametri kapacitivnog dela senzora tipa #3**

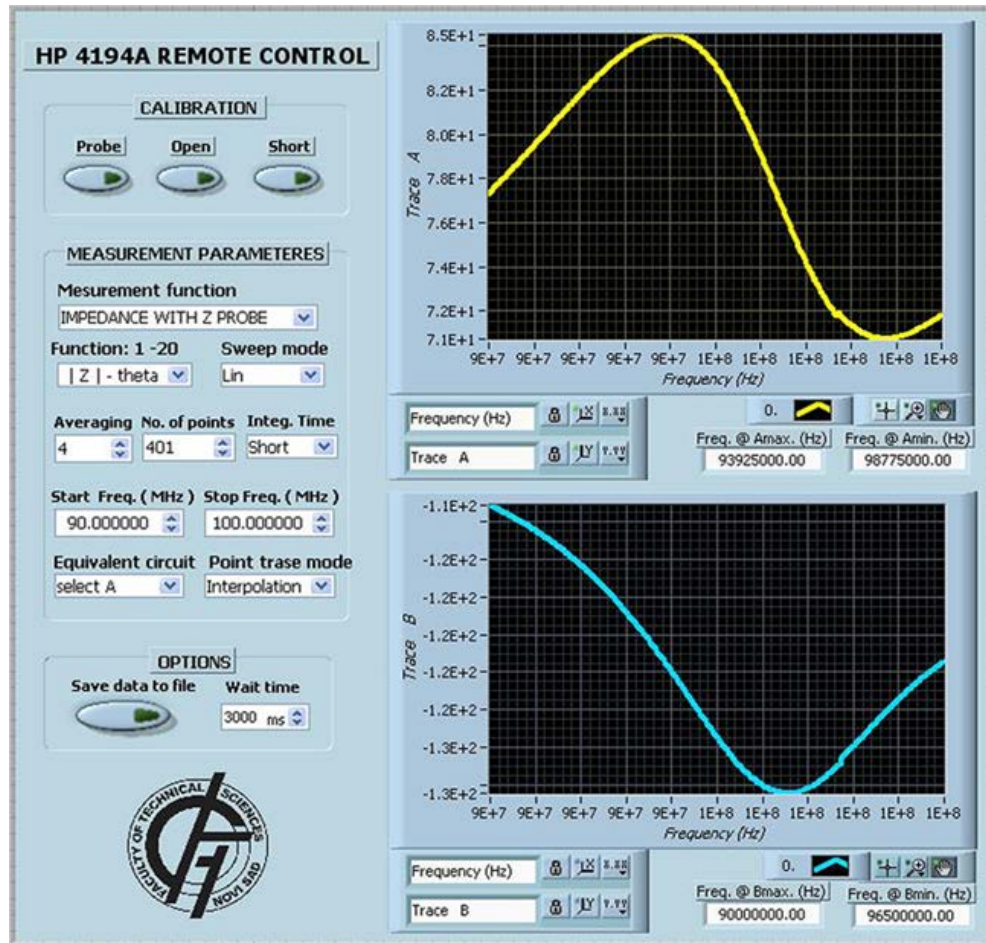
Parametar	Vrednost
Širina prstiju ( $w$ )	0,5 mm
Razmak između prstiju ( $s$ )	0,1 mm
Dužina gap-a ( $g$ )	0,1 mm
Dužina prstiju ( $l$ )	20,9 mm
Debljina provodinka ( $t$ )	0.034 mm
Ukupan broj prstiju ( $n$ )	36

Osetljivost uređaja zavisi od promene osobina dielektričnog sloja (to znači sadržaj vode u analiziranom slučaju) između elektroda (ili prstiju). Kolo, sa najmanje jednim kondenzatorom i jednim induktorom, je u rezonanci, kada je imaginarna komponenta impedanse jednaka nuli, tj njegova impedansa je čisto otporna.

Frekventni odziv senzora može se meriti pomoću antenskog kalema korišćenjem analizatora impedanse HP-4194A. Veza između induktora i namotaja antene se naziva induktivnom spregom ili međusobna indukcija.

Rezonantna frekvencija LC senzora tipa #3 je određena merenjem faze (impedansa) antenskog kalema (postavljena oko senzora) pomoću analizatora impedanse. Ovaj instrument je kompjuterski kontrolisan preko GPIB interfejsa i korišćen je softverski alat koji je razvijen u laboratoriji. Ovaj alat obavlja kompletnu kalibraciju i merni proces, kao i snimanje izmerenih podataka. Slika 5.23. prikazuje *user-friendly* interfejs LabVIEW softvera za PC komunikaciju i potpunu kontrolu mernih procesa korišćenjem analizatora impedanse HP-4194A. Merenje vlage u građevinskoj opeci i YTONG bloku korišćenjem bežičnog LC senzora tipa #3 prikazano je na slici 5.24.





Slika 5.23. Prednji panel softverskog alata LabVIEW za kontrolu merenja pomoću Impedance Analyzer HP-4194A sa Z sondama



Slika 5.24. Merenje vlage u građevinskoj opeci i YTONG bloku korišćenjem bežičnog LC senzora tipa #3

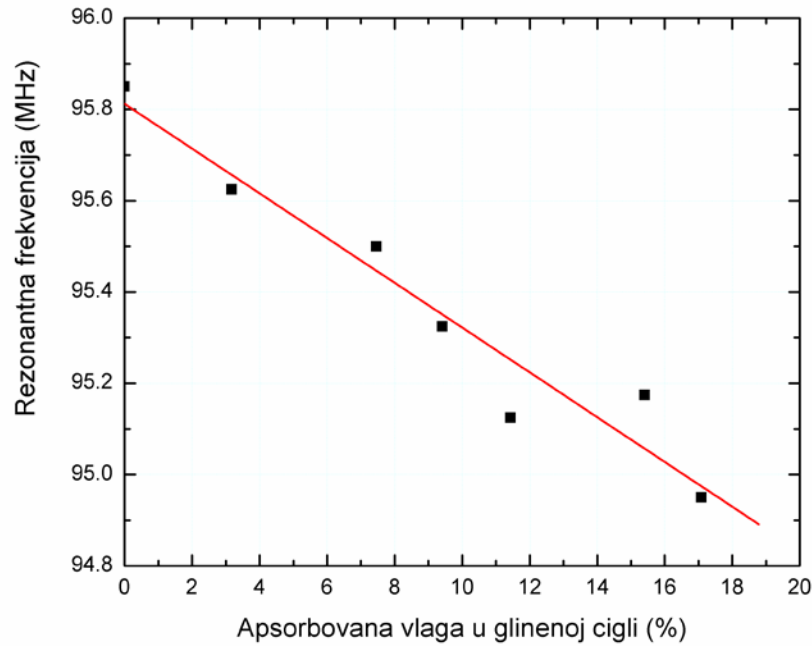


Zavisnost rezonantne frekvencije u funkciji procenta sadržaja vode u građevinskoj opeci je prikazana na slici 5.25. Iz ovih podataka može se uočiti da se rezonantna frekvencija menja iz 95,85 MHz do 94,95 MHz, dok se procenat upijanja vode u opeci povećava od 0 % do 17,08 %. Varijacija rezonantne frekvencije je 0,9 MHz, a koncentracija vode se menja za 17,08 %. Zavisnost rezonantne frekvencije u funkciji sadržaja vode u YTONG bloku je prikazana na je slici 5.26. Može se videti da se rezonantna frekvencija menja od 95,875 MHz do 93,3 MHz, dok se procenat apsorbovane vode kreće u opsegu od 0 % do 64,86 %. YTONG blok ima skoro tri puta veću moć upijanja vode od opeke zbog svoje porozne strukture što je već opisano.

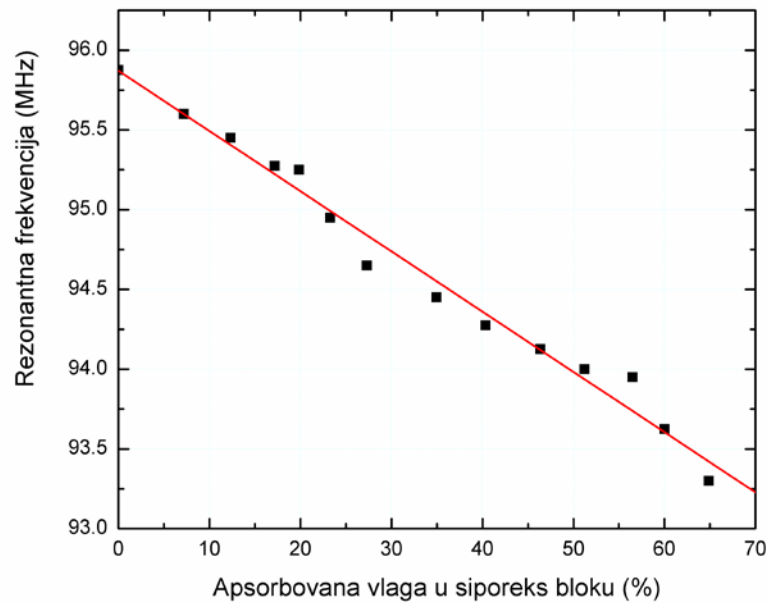
Na slikama 5.25 i 5.26 prikazani su različiti opsezi absorbovane vlage za dva različita građevinska materijala, a razlog za to je različita struktura materijala. Jako gustra struktura glinene opeke ne dozvoljava da ona upije više od 18 % vlage u odnosu na svoju težinu, dok YTONG blok koji ima puno vazdušnih šupljina može da upije vlagu do skoro 70 % svoje težine.

Rezonantna frekvencija senzora je linearno proporcionalna sadržaju vode u građevinskim materijalima. Predloženi LC sensor tipa #3 može se uspešno koristiti za praćenje sadržaja vode u materijalima kao što su opeka od pečene gline i YTONG blok.

Posle upoređivanja rezultata merenja senzora koji su opisani u ovom poglavlju i komercijalnog uređaja, može se zaključiti da razvijeni senzori imaju značajne prednosti kao što su jednostavan dizajn i mala cena, dobra osetljivost, rezolucija, i pouzdanost. Dodatna prednost opisanih senzora je što su pasivni, bez unutrašnjeg napajanja, kao što su baterije, pa nemaju ograničenje upotrebe na životni vek baterije. Takođe, opisani senzori imaju inovativni dizajn.



**Slika 5.25. Rezonantna frekvencija LC senzora tipa #3 u funkciji količine vode u opeci od pečene gline**



**Slika 5.26. Rezonantna frekvencija LC senzora tipa #3 u funkciji količine vode u YTONG bloku**

**6**

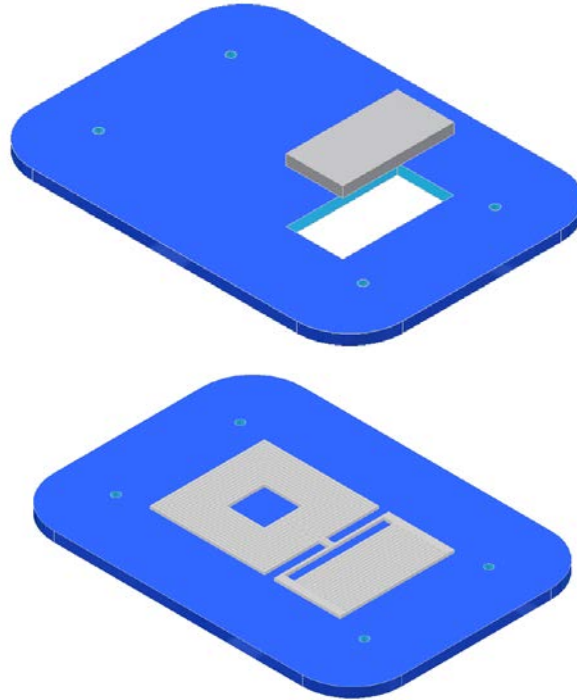
## **Merenje koncentracije vlage u građevinskim materijalima korišćenjem LC senzora izrađenih u LTCC tehnologiji**

U ovom poglavlju biće opisana primena bežičnih LC senzora za merenje koncentracije vode (ili vlažnosti) u građevinskim materijalima. Senzori su proizvedeni u LTCC (*Low Temperature Co-fired Ceramic*) tehnologiji, i sastoje se od paralelne veze induktora i češljastog kondenzatora. Senzor se postavlja u test uzorak građevinskog materijala koji je uronjen u vodu, tako da se promena koncentracije vode u uzorku može meriti bežično (antenskim namotajem) praćenjem promene rezonantne frekvencije senzora. Za ispitivanje i testiranje su korišćeni opeka od pečene gline i YTONG blok. Dielektrična konstanta vode je znatno veća u poređenju sa dielektričnom konstantom test uzorka, pa je povećana koncentracija vode (odnosno vlage) u uzorcima uslovljavala smanjenje rezonantne frekvencije senzora. Merenja su vršena pomoću instrumenata RF Impedance Analyzer HP-4191A (1 MHz – 1000 MHz), na sobnoj temperaturi.

U ovom poglavlju opisan je način pronalaženja optimalnog dizajna senzora za merenje vlažnosti. Simulacije su izvršene u COMSOL softverskom paketu nakon čega se pristupilo i proizvodnji datog senzora u LTCC tehnologiji. Promena koncentracije vode u uzorku merena je bežično (antenskim namotajem) praćenjem promene rezonantne frekvencije senzora. Merenja su vršena pomoću analizatora impedanse HP-4191A.

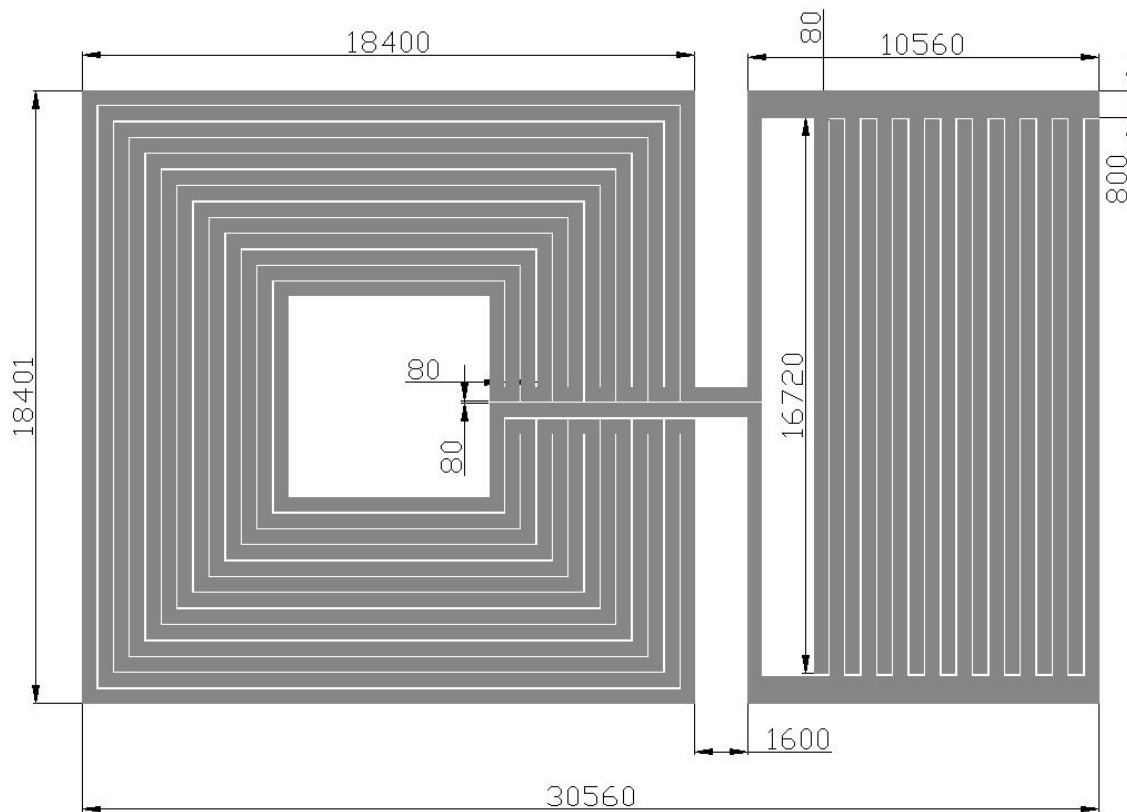
### ***6.1. Bežični LC senzor tipa #4 fabrikovan u LTCC tehnologiji***

Senzor se sastoji od tri sloja. Kvadratni spiralni induktor i interdigitetni kondenzator su projektovani na prvom sloju dok je na drugom sloju napravljen otvor iznad elektroda kondenzatora kroz koji se ostvaruje kontakt senzora sa merenim uzorkom (slika 6.1).



**Slika 6.1. 3D model LC senzora tipa #4 fabrikovanog u LTCC tehnologiji**

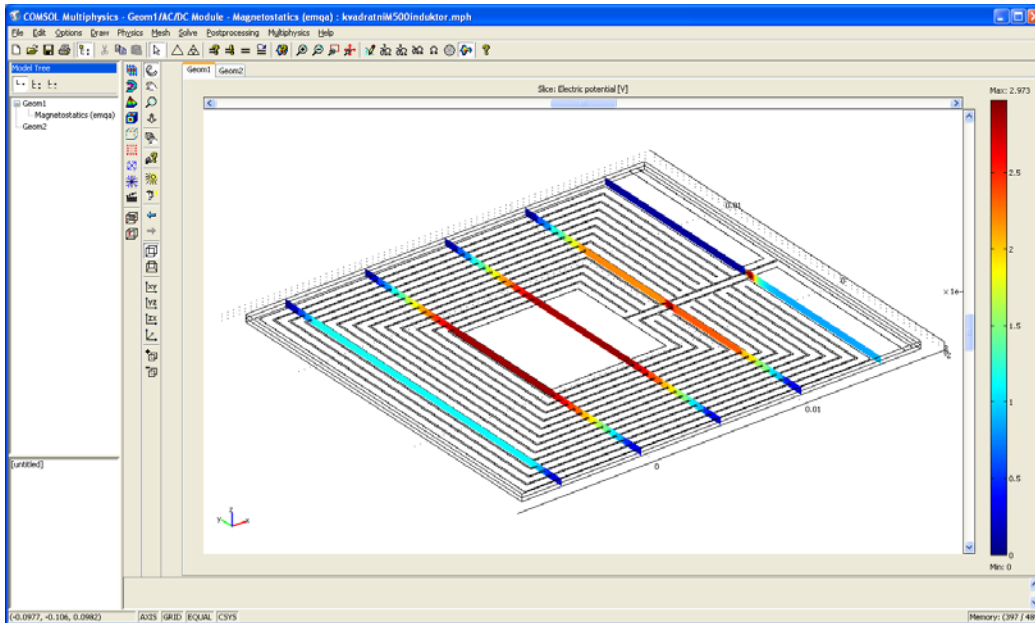
Materijal kome se meri vlažnost postavlja se u kontakt sa elektrodama interdigitalnog kondenzatora i kako se permitivnost datog sloja menja (u zavisnosti od količine vlage u datom materijalu) tako se menja i kapacitivnost interdigitalnog kondenzatora što uslovljava promenu rezonantne frekvencije senzora koja je bežično merena pomoću antenskog namotaja i analizatora impedanse. Pasivna priroda ovakvog LC senzora omogućava dugotrajno praćenje određenih parametara bez ograničenja. Ovakvi senzori se obično realizuju tako da ili induktivnost ili kapacitivnost zavise od parametara od interesa i njihova promena može se detektovati kroz promenu rezonantne frekvencije čitavog kola. U ovom radu senzor je projektovan na taj način da se vrednost induktivnosti održava konstantnom, dok se kapacitivnost interdigitetnog kondenzatora menja u zavisnosti od koncentracije vlage.



**Slika 6.2. Dimenzije LC senzora tipa #4**

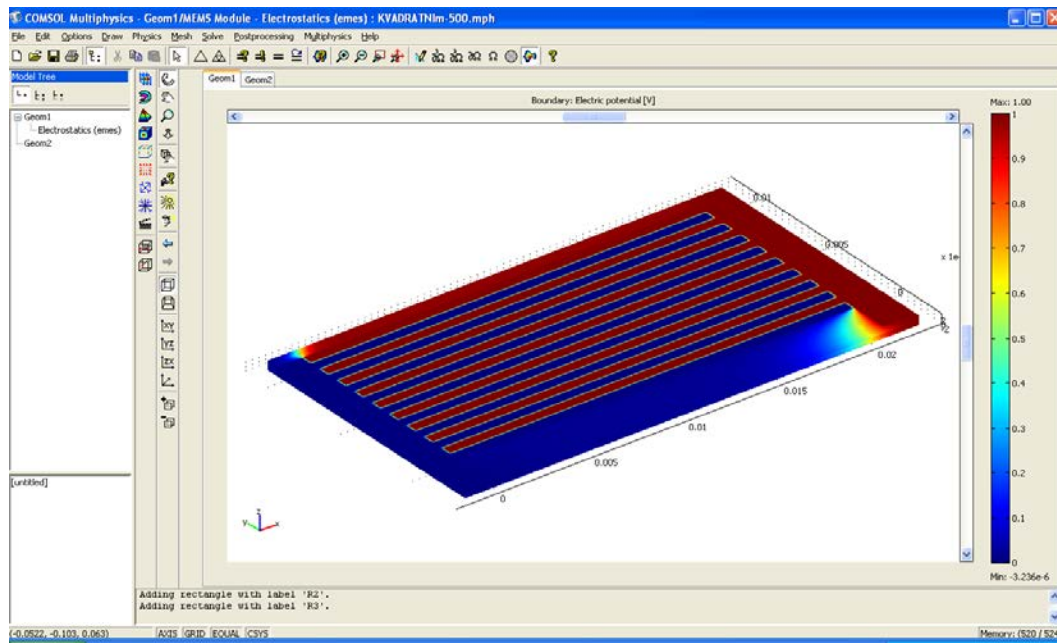
Za nalaženje senzora željenih specifikacija potrebno je fabrikovati veliki broj struktura i izvršiti njihovu karakterizaciju. Alternativni metod je korišćenje savremenih elektromagnetnih (EM) simulatora. Pored toga što je ovakav način ekonomičniji ujedno je i mnogo fleksibilniji iz razloga što se vrlo lako mogu promeniti geometrijski ili tehnološki parametri i na taj način doći do optimalne strukture koja zadovoljava željene performanse. U ovom radu program COMSOL Multiphysics je korišćen u cilju dobijanja optimalnog dizajna senzora za detekciju vlage. Nakon analize simulacionih rezultata izabrana je odgovarajuća geometrija i tipovi materijala za realizaciju projektovanog senzora. Elektromagnetski simulator COMSOL se pokazao kao moćan alat za određivanje performansi ovakvog senzora jer se njegovim korišćenjem može dobiti optimalni dizajn novih senzora i samim tim izbeći pravljenje velikog broja testnih primeraka, što svakako utiče na smanjenje cene novih senzora. Osnovna prednost predloženog dizajna senzora jeste to što je pasivan, bežičan i pogodan za dugoročno merenje parametara od interesa ali i jeftin.

Projektovanje i simulacija kvadratnog spiralnog induktora vrši se odabirom Magnetostatics-a u AC/DC modulu. Ovaj proces se odvija u 5 koraka: opcije i podešavanja, definisanje geometrije modela, definisanje graničnih uslova i podešavanje poddomena, generisanje mreže i izračunavanje. Na slici 6.3. se vidi grafički prikaz vrednosti električnog potencijala duž induktora.



**Slika 6.3. Vrednost električnog potencijala duž induktora**

Interdigitalni kondenzator se simulira korišćenjem MEMS modula. Kapacitivnost se izračunava nakon pređenih pet prethodno navedenih koraka projektovanja i simulacije. Na slici 6.4. prikazan je električni potencijal na površini interdigitalnog kondenzatora u COMSOL-u.



Slika 6.4. Električni potencijal na površini interdigitetnog kondenzatora

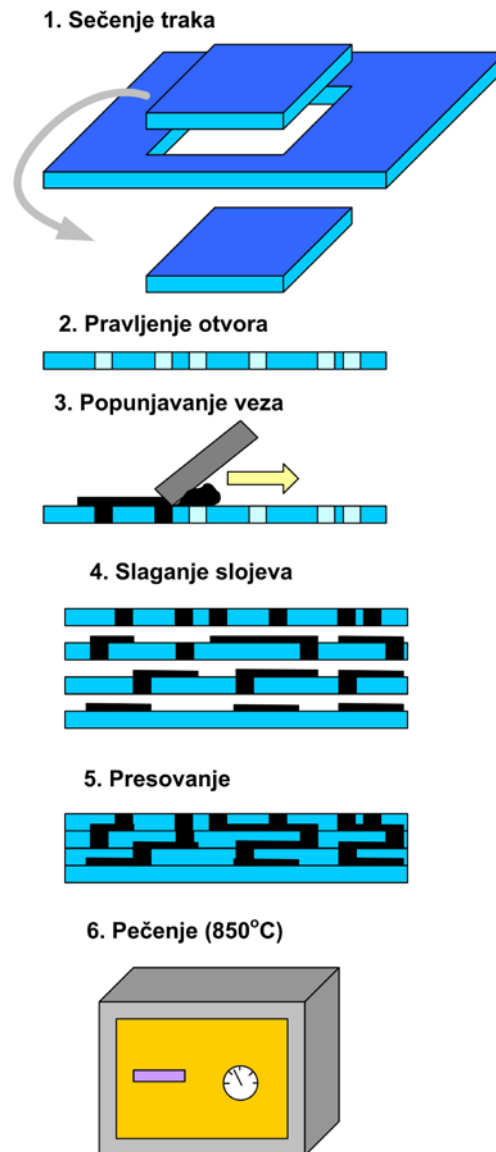
Tabela 6.1. Vrednosti induktivnosti i kapacitivnosti za LC senzor tipa #4 dobijene procesom simulacije

	Induktivnost $L$ [nH]	Kapacitivnost $C$ [pF]	Rezonantna frekvencija $f_{res}$ [GHz]
Senzor	114	19,1	0,1

Nakon pronalaska optimalnog dizajna izvršena je i proizvodnja predloženog senzora u LTCC tehnologiji koja se od nedavno, zahvaljujući vrlo dobrim električnim i mehaničkim svojstvima, visokoj pouzdanosti i stabilnosti, kao i mogućnosti izrade trodimenzionalnih (3D) integrisanih mikrostrukture, koristi za proizvodnju senzora i aktuatora. U tabeli 6.1 date su vrednosti induktivnosti i kapacitivnosti predloženog dizajna induktora i interdigitalnog kondenzatora. U fabrikaciji senzora korišćen je materijal Heraeus CT700. Proces projektovanja i izrade LTCC komponenti i kola iako je naizgled jednostavan ipak je veoma dug i ozbiljan pri čemu treba voditi računa o određenim pravilima kako bi se izbegli neželjeni efekti.

Dijagram toka za LTCC proizvodni proces predstavljen je na slici 6.5. Kao što se vidi sa slike 6.5. postupak izrade komponenti u LTCC tehnologiji sastoji se iz nekoliko faza:

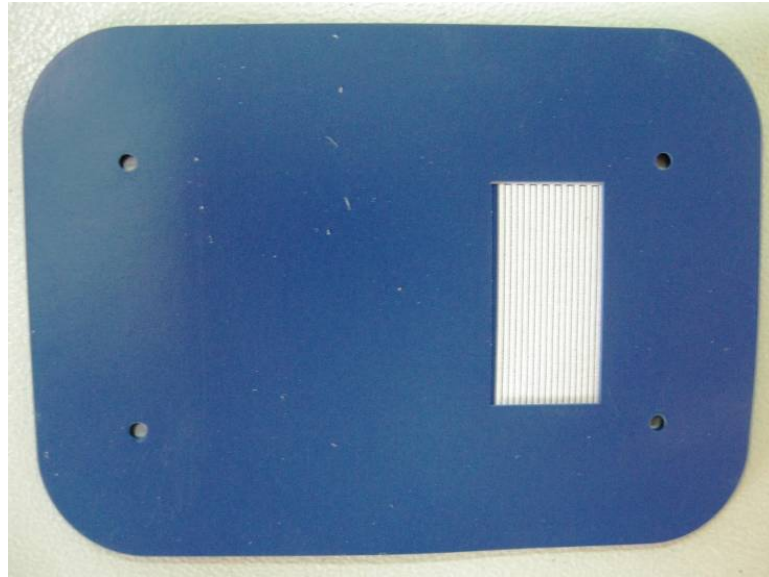
1. sečenje traka i pravljenje veza između slojeva,
2. nanošenje provodnih pasti i popunjavanje veza između slojeva,
3. slaganje slojeva,
4. presovanje (laminacija) slojeva
5. pečenje i
6. provera električnih karakteristika.



Slika 6.5. Šematski izgled procesa izrade komponenti/kola u LTCC tehnologiji



Slojevi su laminirani na pritisku od 70 bari pri temperaturi od 75 °C tokom 3 minuta. Tako laminirani slojevi se peku u peći u šest zona gde temperatura dostiže 880 °C u roku od 2 h. Prolazeći kroz sve prethodno navedene faze procesa izrade komponenti u LTCC tehnologiji dobija se struktura senzora vlažnosti (slika 6.6) čiji je dizajn opisan na početku poglavlja.

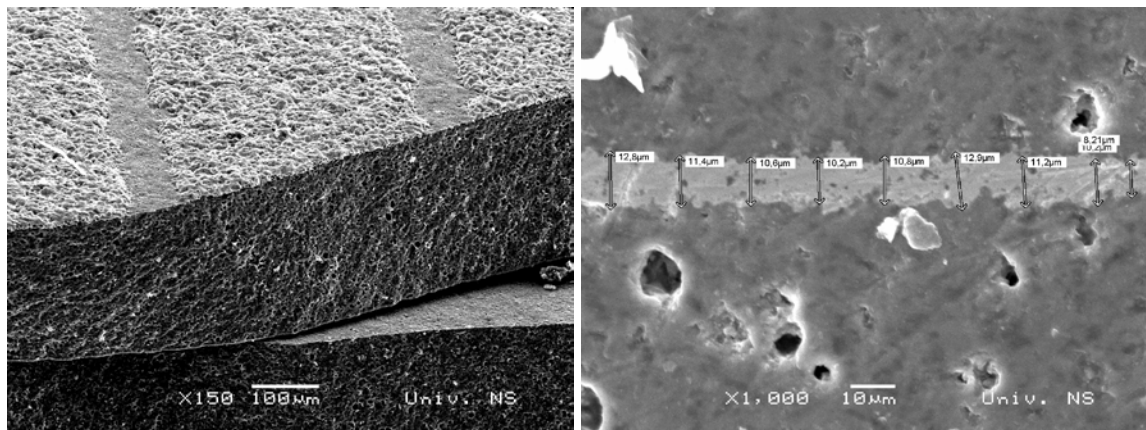


**Slika 6.6. Izgled senzora proizvedenog LTCC tehnologijom**

Pošto je cilj bio projektovanje bežičnog rezonantnog senzora merenje je vršeno beskontaktnim putem pomoću spregnutog antenskog namotaja. Promena koncentracije vode u uzorku se meri bežično (antenskim namotajem) praćenjem promene rezonantne frekvencije senzora. Merenje promene rezonantne frekvencije se može zasnivati na merenju impedanse čitavog kola pomoću merača impedanse ili merenju promene rezonantne frekvencije senzora pomoću vektorskog analizatora spektra. U ovom radu merenja su vršena pomoću analizatora impedanse HP-4191A, na sobnoj temperaturi. Za ispitivanje i testiranje su korišćeni opeka od pečene gline i YTONG blok kao jedni od najčešće korišćenih građevinskih materijala. Dielektrična konstanta vode je znatno veća u poređenju sa dielektričnom konstantom test uzorka, pa povećanje koncentracije vode (odnosno vlage) u uzorcima uslovljava povećanje kapacitivnosti interdigitetnog kondenzatora, što povlači smanjenje rezonantne frekvencije senzora. Test uzorci su potapani u vodu u dubinu približno 10 mm, i na taj način su kapilarno upijali vlagu par dana dok ne budu zasićeni. Nakon toga je sledio proces sušenja i merenja težine uzoraka

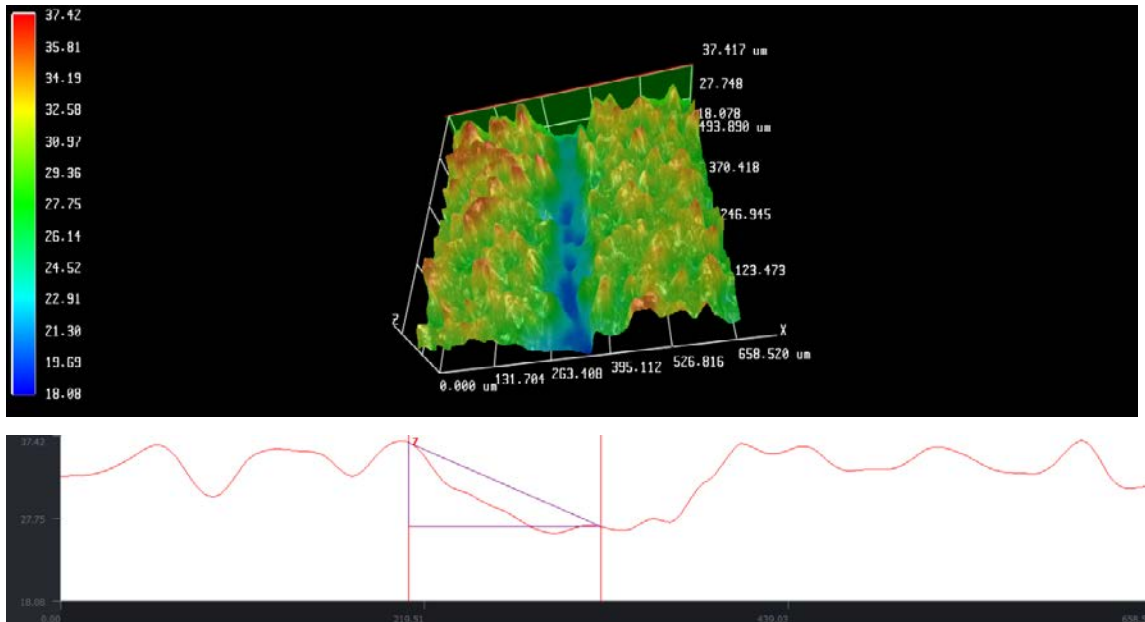
kao i merenje rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora, u određenim vremenskim intervalima.

Na slici 6.7 a) prikazan je izgled poprečnog preseka LC senzora izrađenog u LTCC tehnologiji, dok je na slici 6.7 b) prikazana debljina provodnog sloja srebra. Sa slike se može zaključiti da su razmaci između provodnih slojeva kao i širina provodnih slojeva manji nego na modelu koji je prikazan na slici 6.2, a razlog tome je tehnološki proces fabrikacije gde se pečenje odvija na visokim temperaturama što uslovljava smanjivanje dimenzija projektovanog kola u određenom procentu.

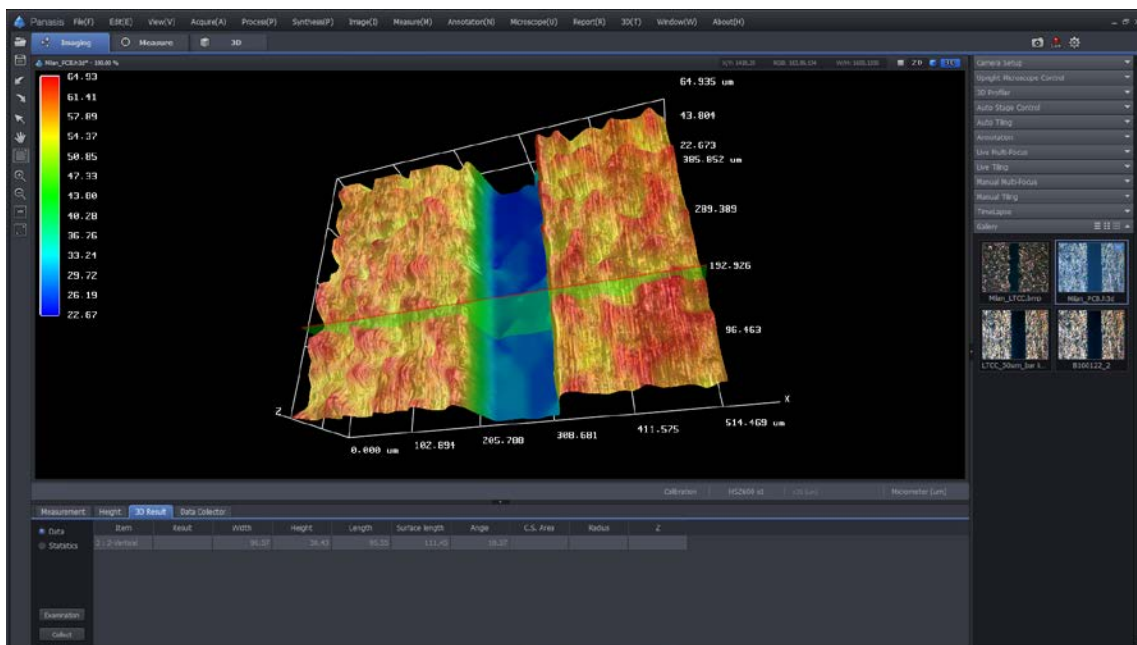


**Slika 6.7. a) SEM slika poprečnog preseka senzora; b) debljina provodnog sloja srebra**

Pored merenja pomoću SEM-a karakterizacija senzora izrađenih LTCC tehnologiji urađena je i na 3D profilometru Huvitz HRM 300, pri čemu su dobijeni jako slični rezultati kao i na SEM-u. Rezultati merenja 3D profila LTCC senzora prikazani su na slici 6.8. Na slici 6.9 prikazan je izgled softvera za merenje profila materijala korišćenjem 3D profilometra. Rezultati koji su dobijeni za debljinu srebra na supstratu kreću se od 7,99 μm.



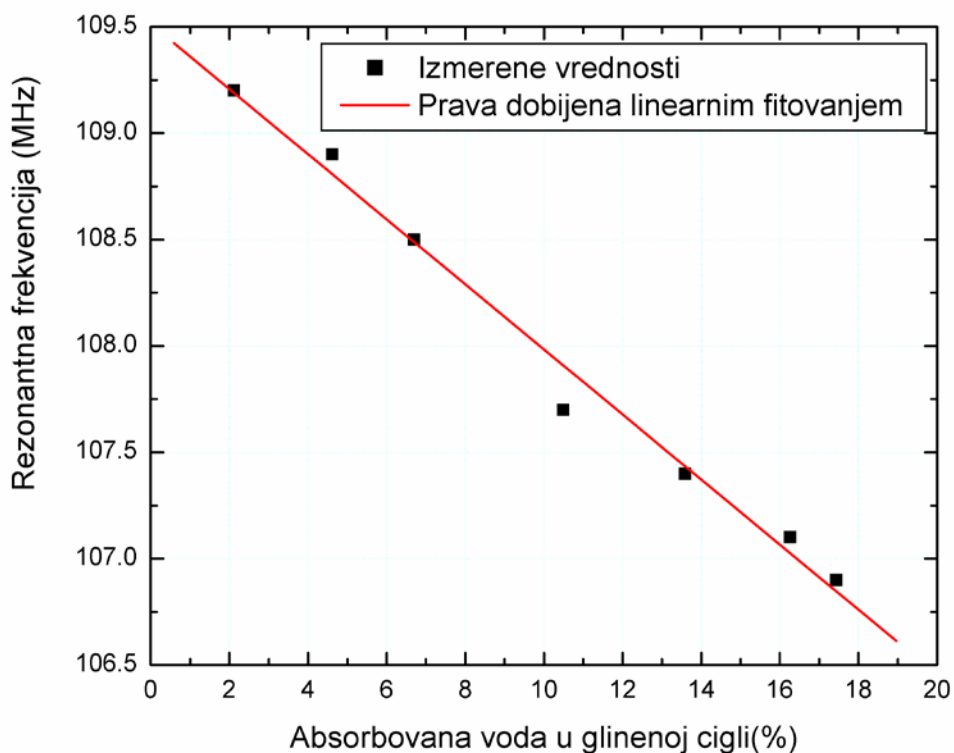
Slika 6.8. 3D profil senzora izrađenog LTCC tehnologiji



Slika 6.9. Izgled softvera za merenje 3D profila materijala pomoću uređaja Huvitz HRM 300

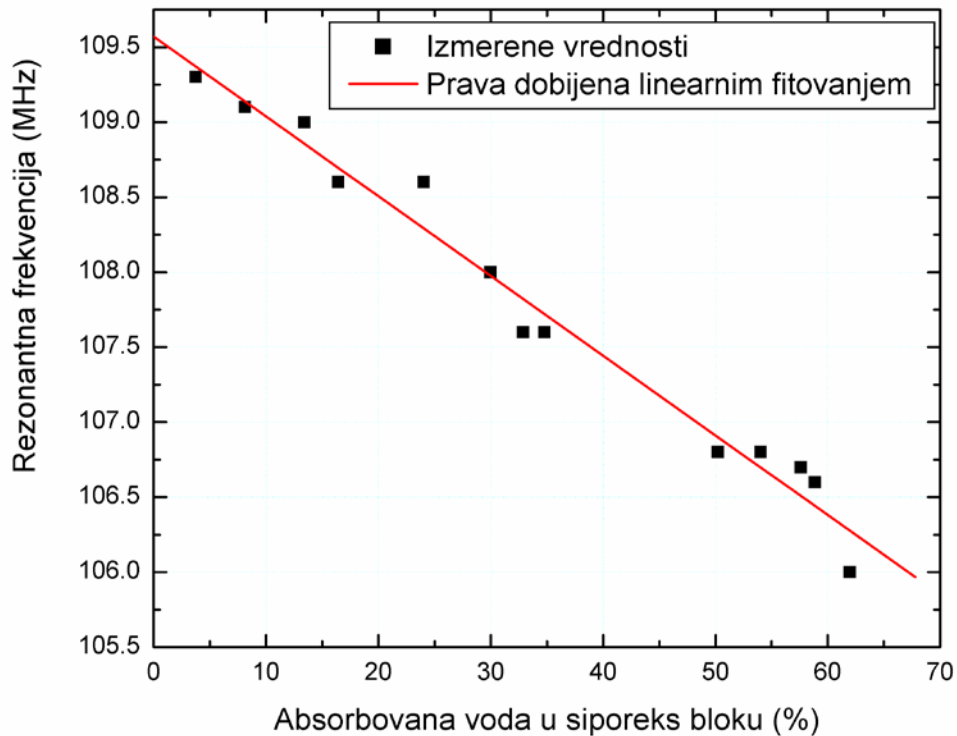
Na slici 6.10 prikazana je zavisnost rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora u funkciji sadržaja vode u opeci. Sa ovog grafika može se uočiti da se rezonantna frekvencija menja od 109,2 MHz do 106,9 MHz, a procenat vode u rasponu od 2 % do

17,5 %. Opseg promene rezonantne frekvencije je 2,3 MHz dok je promena koncentracije vode ukupno 15,5 %. Može se, takođe, videti da je odstupanje izmerenih vrednosti od idealne linearne zavisnosti veoma malo (na slici je crvenom linijom prikazana linearna fitovana vrednost).



**Slika 6.10. Zavisnost rezonantne frekvencije senzora od koncentracije vode u opeci**

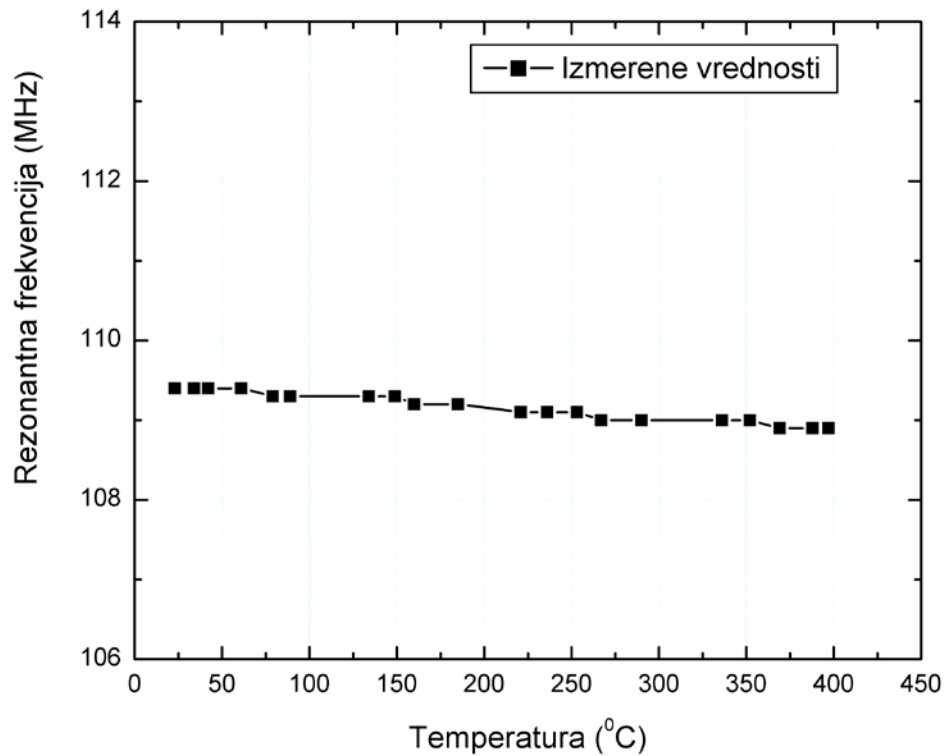
Zavisnost rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora od sadržaja vode u YTONG bloku je prikazana na slici 6.11. Sa slike se može videti da se rezonantna frekvencija menjala u opsegu od 109,3 MHz do 106 MHz, a procenat koncentracije vode u rasponu od 2 % do 62 %. Ukupna promena rezonantne frekvencije je 3,3 MHz, a promena koncentracije vode je ukupno 60 %. Na slici je crvenom linijom prikazana linearna fitovana vrednost. Iz jednačine za rezonantnu frekvenciju, očekivana je eksponencijalna promena frekvencije sa promenom kapacitivnosti ali iz razloga što smo mi posmatrali jedan mali segment od 100 % promene izabrali smo linearnu pravu.



**Slika 6.11. Zavisnost rezonantne frekvencije senzora od koncentracije vode u YTONG bloku**

Zavisnost rezonantnih frekvencija bežičnog LC senzora u funkciji temperature okoline prikazana je na slici 6.12. Sa slike se može videti da se rezonantna frekvencija menja u opsegu od 109,4 MHz do 108,9 MHz, dok je temperaturna promena u opsegu od 25 °C do 400 °C. Sa slike se može videti da sa povećanjem temperature rezonantna frekvencija opada, i ukupna promena je 0,5 MHz.

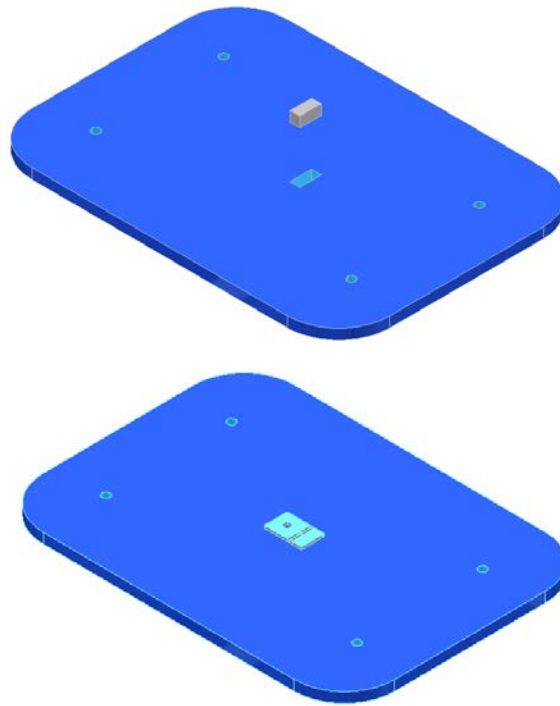
Na osnovu predstavljenih grafika može se zaključiti da se predloženi LC senzor može primeniti za monitoring vode u zidovima i podovima građevinskih objekata, koji se nalaze na lokacijama koje su pod veoma velikim uticajem vlage. Kontinuirano praćenje vlage u građevinskim materijalima i objektima omogućava efikasno upravljanje, pravovremenu sanaciju i održavanje objekata, kao što su crkve, mostovi i drugi veoma važni objekti u građevinarstvu.



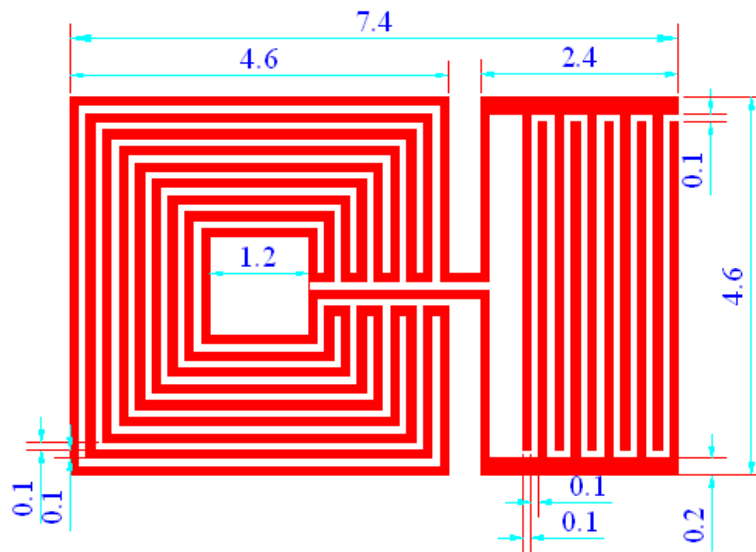
**Slika 6.12. Zavisnost rezonantne frekvencije senzora od temperature**

## ***6.2. Bežični LC senzor tipa #5 fabrikovan u LTCC tehnologiji***

U ovom delu opisan je LC senzor tipa #5 koji se, takođe, sastoji od paralelne veze induktora i inerdigitalnog kondenzatora. Dizajn senzora prikazan je na slici 6.13, dok su na slici 6.14. prikazane dimenzije senzora.



**Slika 6.13. Dizajn LC senzora tipa #5 fabrikovanog u LTCC tehnologiji**

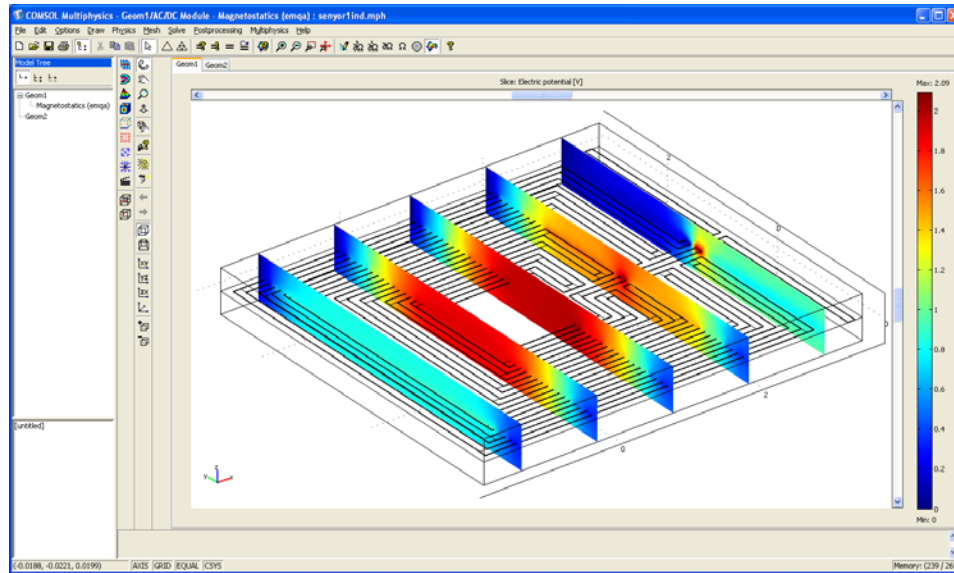


**Slika 6.14. Dimenzije LC senzora tipa #5 u mm**

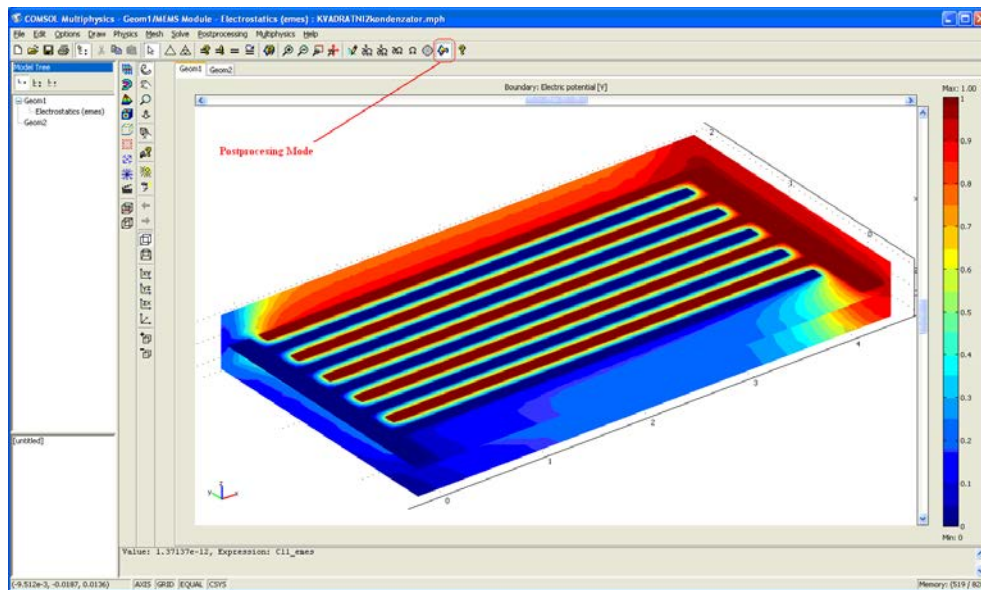
Na slikama 6.15. i 6.16. prikazani su električni potencijali induktivnog i kapacitivnog dela senzora. Razlika ovog senzora u odnosu na senzor tipa #4 koji je opisan u prvom delu poglavlja su dimenzije koje su 5 puta manje. Iz toga se može zaključiti da će



i rezonantna frekvencija ovog senzora biti značajno veća, što se može videti iz tabele 6.2. Rezonantna frekvencija ovog tipa senzora je po proračunu simulacija 590 MHz što je izuzetno velika vrednost, pa iz tog razloga za ovaj senzor nije urađena karakterizacija.



**Slika 6.15.** Električni potencijal induktivnog dela LC senzora tipa #5



**Slika 6.16.** Električni potencijal kapacitivnog dela LC senzora tipa #5



**Tabela 6.2. Vrednosti induktivnosti i kapacitivnosti za LC senzor tipa #5 dobijene procesom simulacije**

	Induktivnost $L$ [nH]	Kapacitivnost $C$ [pF]	Rezonantna frekvencija $f_{res}$ [GHz]
Senzor	21,2	3,8	0,59

Na osnovu svih rezultata za senzore koji su opisani u ovom poglavlju, a izrađeni su u LTCC tehnologiji može se zaključiti da se ovi senzori mogu koristiti za merenje vlage u građevinskim materijalima i mogu da podnesu značajno teže uslove od senzora koji su izrađeni na PCB-u. Međutim, nedostatak senzora izrađenih u LTCC tehnologiji je što su veoma kruti i sa njima se mora rukovati jako pažljivo, što ograničava upotrebu ovih senzora u građevinskoj industriji.



## Prenosivi elektronski uređaj za merenje koncentracije vlage

LCR metri su uređaji veoma često korišćeni u merenju električne impedanse pri karakterizaciji pasivnih elektronskih komponenti, materijala i senzora (kapacitivnih, induktivnih i otporničkih) ali i u mnogim drugim primenama kao što su analiza građevinskih materijala, izloženost materijala koroziji i sl.

Na tržištu postoji širok opseg cena i performansi komercijalnih LCR metara ili analizatora impedanse, pri čemu su najčešće korišćeni MS5308 u ponudi kompanije Mastech, Agilent E4980A/AL, BK Precision 879B, IET Labs 7600 serija i sl. Ovi uređaji se odlikuju odličnim performansama (visoka tačnost, širok frekvencijski i merni opseg, mogućnost upravljanja preko računara) ali obično i velikim dimenzijama i visokom cenom. Pored toga, često je neophodno obezbediti mrežno napajanje (220 VAC) za ove uređaje čime se njihova primena ograničava na laboratorijski prostor. Samim tim, primena ovih uređaja pri karakterizaciji materijala i senzora u laboratoriji je opravdana i česta s očiglednim problemom koji se javlja kada je potrebno dati senzor postaviti u realno testno okruženje gde često nije dostupno mrežno napajanje. Kod tzv. prenosivih LCR uređaja koristi se baterijsko napajanje pa je moguće raditi merenja na terenu.

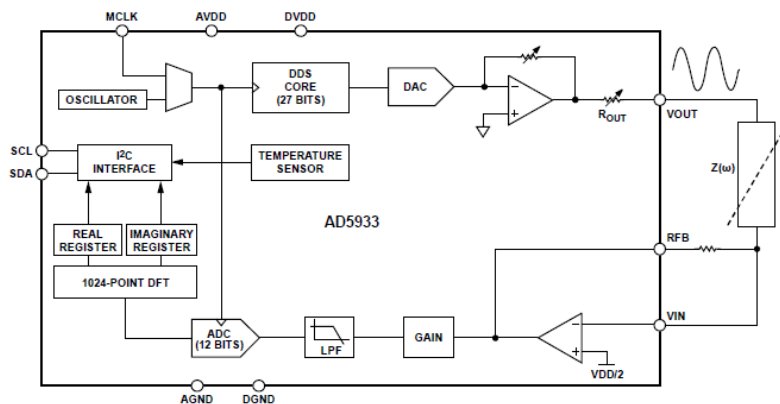
Međutim, u oba slučaja javlja se problem konverzije vrednosti izmerenu fizičku veličinu (temperatura, vlažnost, pH nivo i sl.) u električnu impedansu tj. potrebno je na osnovu određene funkcije prenosa senzora i izmerene impedanse prikazati vrednost merenog paramtera.

Iz ovih razloga, dugi niz godina i decenija unazad, dizajn i realizacija prenosivih, programabilnih i jeftinih LCR metara je veliki izazov za inženjere i elektroničare. Razvijene su mnogobrojne tehnike različite složenosti i tačnosti ali razvoj integrisanog kola AD5933 od strane kompanije Analog Devices je doneo pravu revoluciju u ovom polju jer dati čip predstavlja kompletno rešenje za merenje impedanse, pri čemu je potreban jako mali broj dodatnih komponenti.

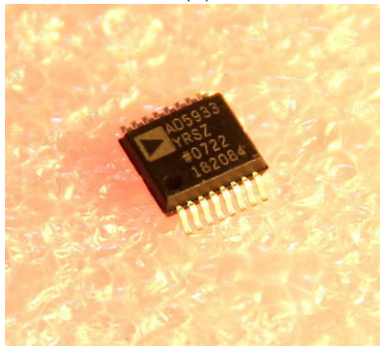
U nastavku, opisan je dizajn i realizacija sistema za merenje impedanse koji je zasnovan na integrisanom kolu AD5933 uz kratak pregled osnovnih karakteristika ovog čipa. Opisan je postupak kalibracije i prikazani su rezultati samog merenja impedanse

pasivnih RLC komponenti. Izvršeno je poređenje sa rezultatima merenja sa komercijalnim analizatorom impedanse HP4194A na osnovu čega je analizirana tačnost uređaja. Na kraju je izvršena karakterizacija LC senzora vlažnosti i predložen je autonomni sistem za merenje vlažnosti u građevinskim materijalima.

Unutrašnja struktura integrisanog kola AD5933 prikazana je na Slici 7.1. (a). U čipu je implementiran izvor signala (27-bitni *Direct Digital Synthesizer*) kao i 12-bitni AD konvertor koji ima mogućnost do 1 Mcps (Mega semplova po sekundi). Frekvencija izlaznog signala (napon) se može menjati u opsegu od 1 do 100 kHz, dok amplituda može uzimati vrednosti od 200, 400, 1000 i 2000 mV. Mogućnost frekvencijskog prebrisavanja (*frequency sweep*) je moguća u maksimalno 511 koraka uz rezoluciju od 0,1 Hz. Uređaj dolazi u standardnom 16-pinskom SSOP kućištu, kao što je prikazano na Slici 7.1.(b).



(a)



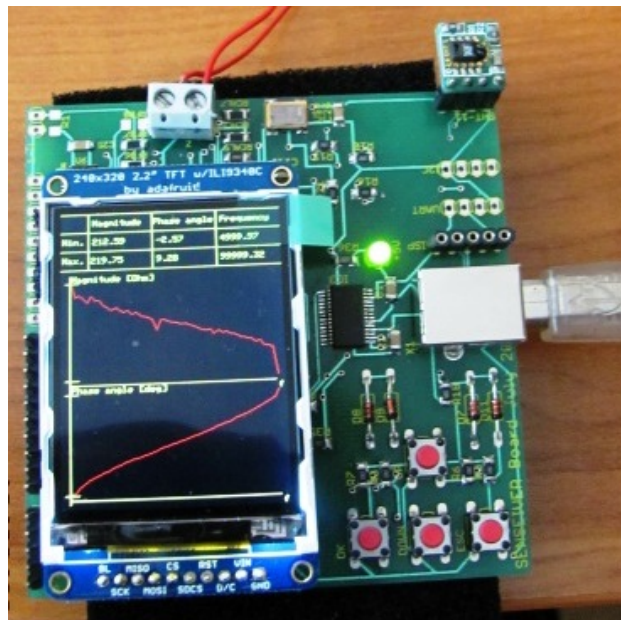
(b)

**Slika 7.1. (a) Unutrašnja struktura integrisanog kola AD5933 (b) Čip AD5933**

Za pravilan rad uređaja neophodno je izvršiti kalibraciju uređaja pre samog merenja. Kalibracija se vrši isključivo otpornikom poznate otpornosti i u tom koraku uređaj primenom signala poznate amplitude i frekvencije beleži odziv na osnovu kog

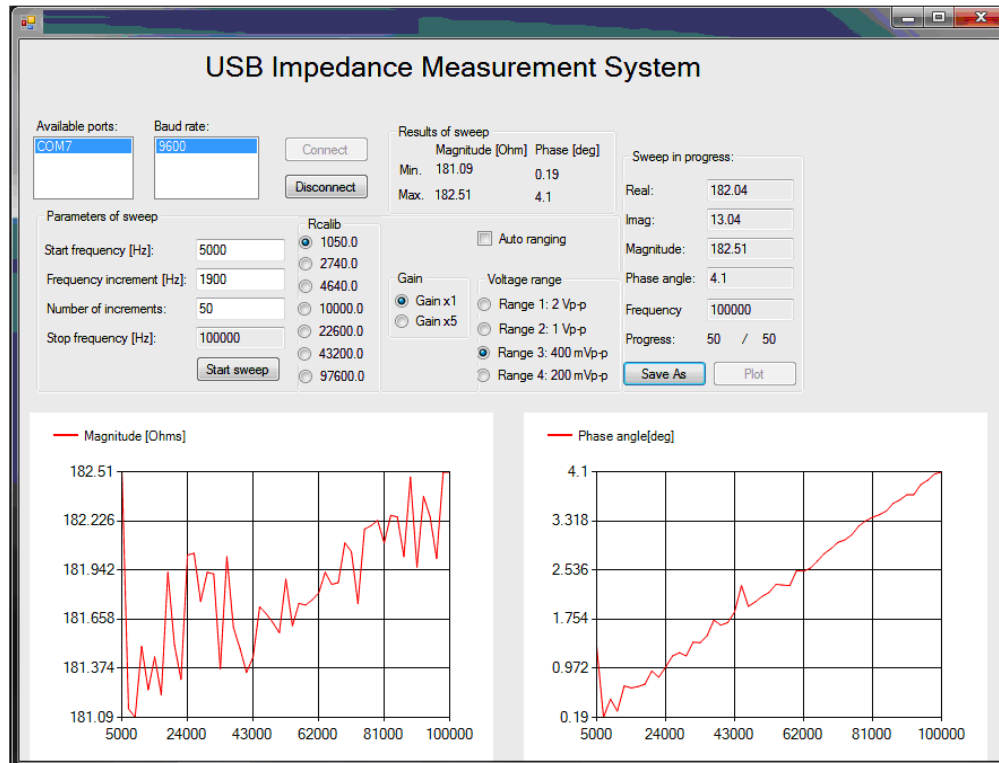
može kasnije proceniti vrednost nepoznate otpornosti. Kalibracija se može izvršiti u samo jednoj tački ali veći broj tačaka povećava tačnost ali istovremeno i usporava sam postupak merenja. Za samu kalibraciju poželjno je koristiti otpornike visoke klase tačnosti (0,1 %) uz malu frekvencijsku zavisnost nominalne vrednosti otpornosti u merenom opsegu.

Sistem za merenje impedanse razvijen u ovoj disertaciji je prikazan na slici 7.2. Rad uređaja kontroliše ATmega128 mikrokontroler koji upravlja radom perifernih komponenti kao i čipom AD5933. Uređaj može biti baterijski napajan ili preko USB kabela, a postoje i portovi za povezivanje dodatnih modula.



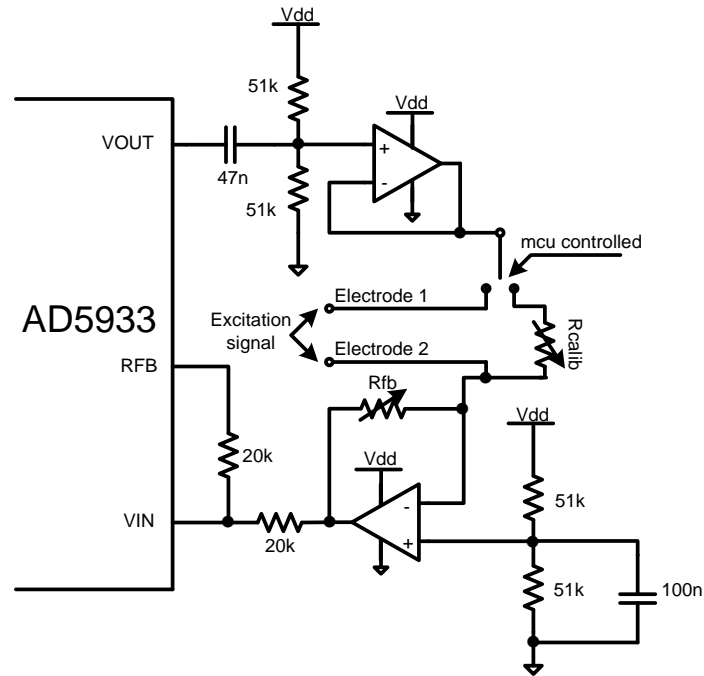
**Slika 7.2. Sistem za merenje impedanse**

Prikaz rezultata i upravljanje uređajem je moguće lokalno preko displeja u boji i ugrađene tastature ali i preko računara. Za tu svrhu je realizovana Windows aplikacija prikazana na slici 7.3. Kao što se može videti, korisnik ima mogućnost definisanja parametara frekvencijskog prebrisavanja, izbor amplitude izlaznog signala, kao i čuvanje rezultata u CSV formatu na lokalnom disku.



**Slika 7.3. Windows aplikacija za upravljanje uređajem preko računara**

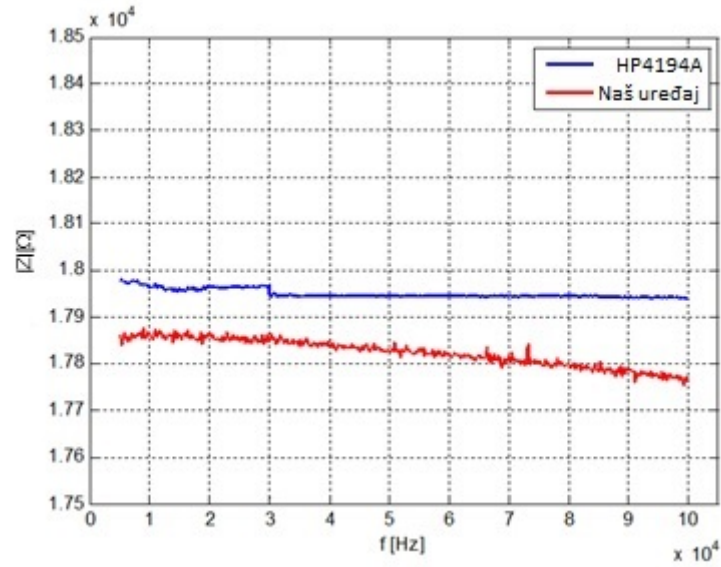
Da bi se postigla veća tačnost merene impedanse, u datoj realizaciji, AD5933 je proširen sa kolom za kondicioniranje signala u okviru koje se nalaze otporničke mreže za kalibraciju i podešavanje pojačanja povratne sprege. Dodatno kolo je implementirano na takav način da uređaj meri impedansu u 2-elektrodnom modu. Blok šema kola za kondicioniranje signala i njegovo povezivanje sa čipom AD5933 prikazana je na slici 7.4.



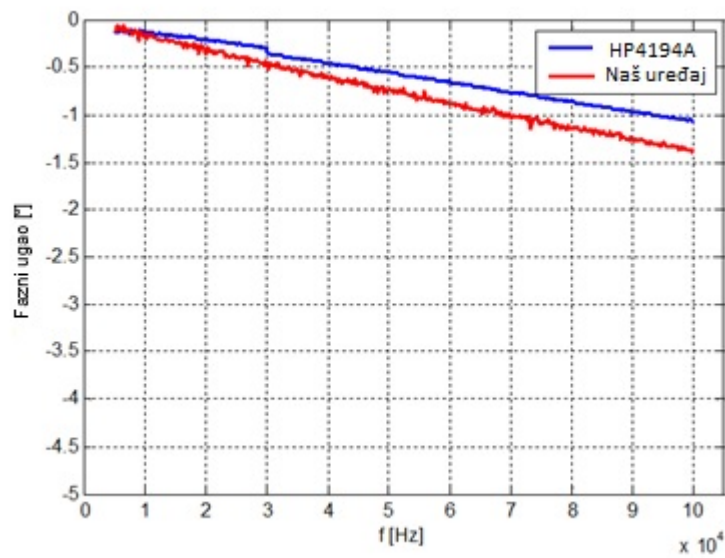
**Slika 7.4. Blok šema kola za kondicioniranje signala i njegovo povezivanje sa čipom**

### ***7.1. Merenje impedanse pasivnih RLC elemenata***

U ovom delu su prikazani rezultati karakterizacije otpornika nominalne vrednosti otpornosti  $17,8 \text{ k}\Omega \pm 1 \%$  (slika 7.5), kondenzatora nominalne kapacitivnosti  $1 \text{ nF} \pm 1 \%$  (slika 7.6) i induktora nominalne induktivnosti  $10 \text{ mH} \pm 5 \%$  (slika 7.7) u frekvenzijskom opsegu 5-100 kHz. Dobijeni rezultati (moduo i faza kompleksne impedanse) su upoređeni sa rezultatima dobijenim analizatorom impedanse HP4194A.

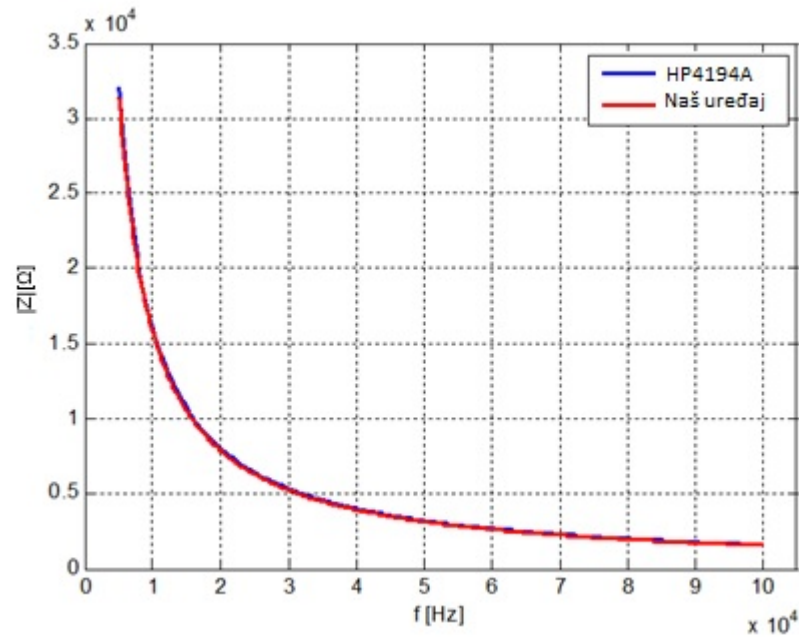


(a)

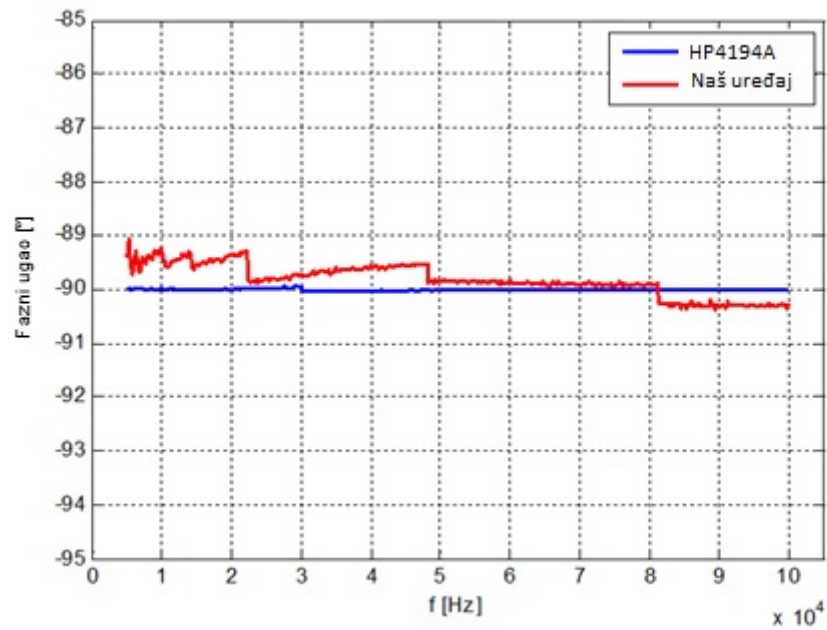


(b)

Slika 7.5. Poređenje izmerenih vrednosti za (a) moduo impedanse i (b) fazni ugao otpornika



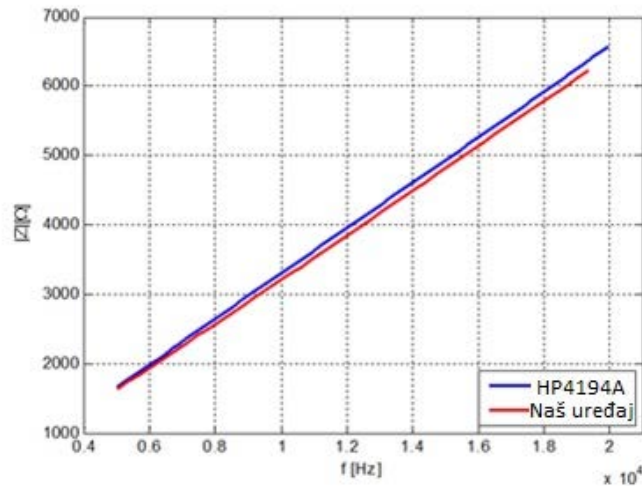
(a)



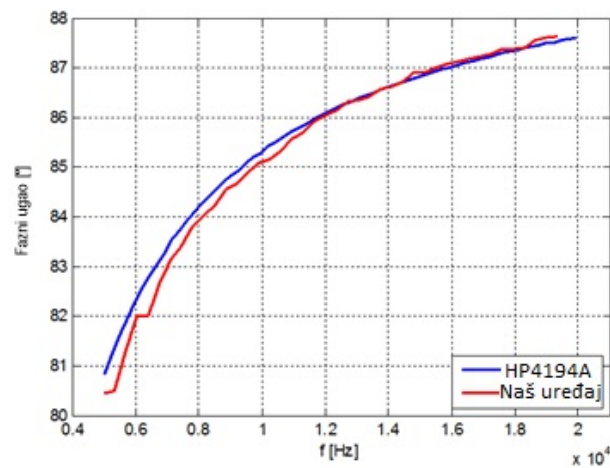
(b)

Slika 7.6. Poređenje izmerenih vrednosti za (a) moduo impedanse i (b) fazni ugao kondenzatora





(a)



(b)

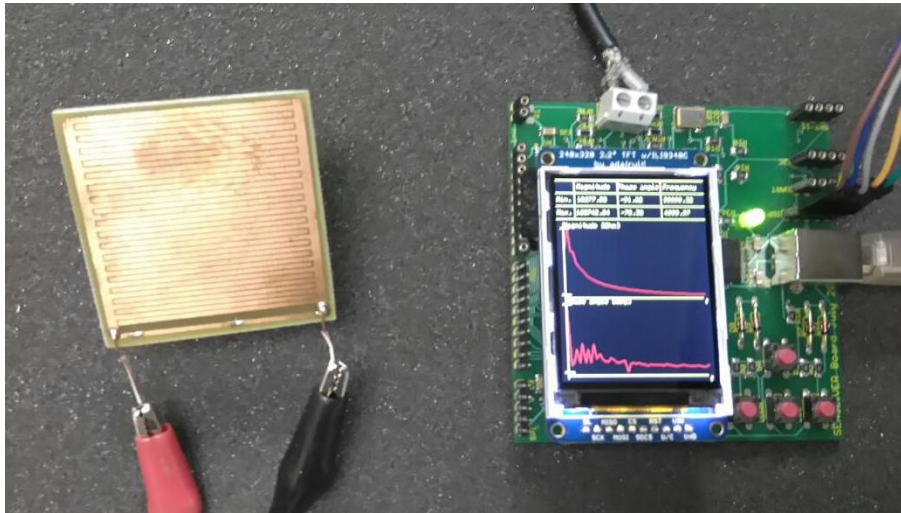
**Slika 7.7. Poređenje izmerenih vrednosti za (a) moduo impedanse i (b) fazni ugao induktora**

Kao što se može videti na Slici 7.6, prilikom merenja impedanse čisto induktivnog prijemnika, opseg frekvencija je ograničen na 5-20 kHz jer je zbog jako izražene nelinearnosti u povratnoj sprezi i ograničenja korišćenih operacionih pojačavača da se optereće čisto induktivnim potrošačem, dolazilo do većih grešaka u merenju.

Na osnovu dobijenih rezultata, izvršena je analiza tačnosti razvijenog uređaja na osnovu kog je utvrđeno da je, u datom testu, maksimalna greška pri merenju modula impedanse bila ispod 2 % i 1,4 stepeni za merenje faze.

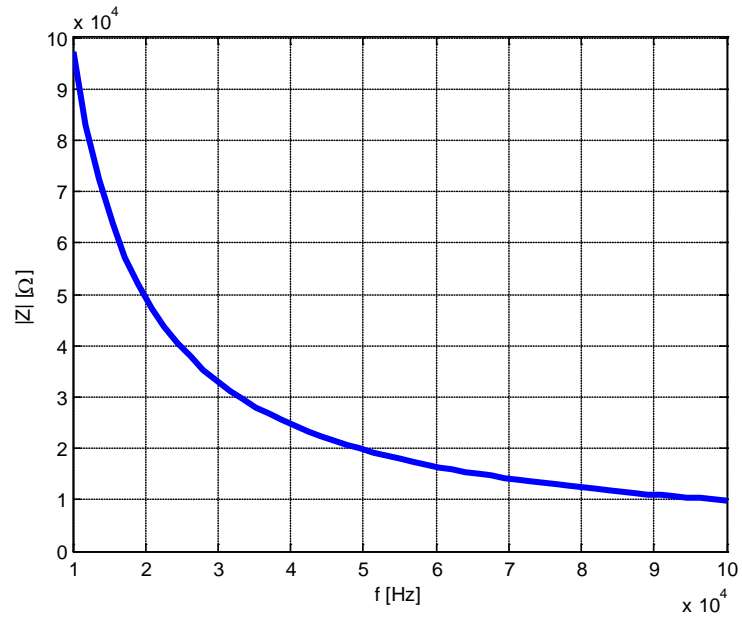
## 7.2. Karakterizacija LC senzora vlažnosti

Na osnovu dobijenih rezultata u prethodnom delu i analizirane tačnosti razvijenog uređaja, utvrđeno je da se isti može koristiti u karakterizaciji LC senzora vlažnosti. Na slici 7.8 prikazana je testna postavka za ovo merenje.

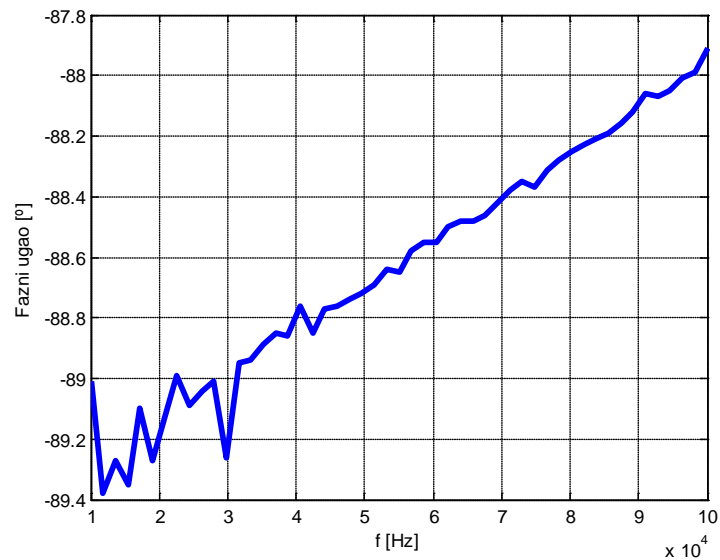


**Slika 7.8. Karakterizacija LC senzora vlažnosti pomoću prenosivog (*handheld*) uređaja**

Dobijeni rezultati za moduo impedanse i fazni ugao analiziranog senzora prikazani su na slici 7.9. Pored ovih merenja urađeno je i merenje vlažnosti koje je prikazano na slici 7.10, gde je korišćen LC senzor izrađen na PCB-u.



(a)



(b)

**Slika 7.9. Merenje (a) modula impedanse i (b) fazni ugao LC senzora**

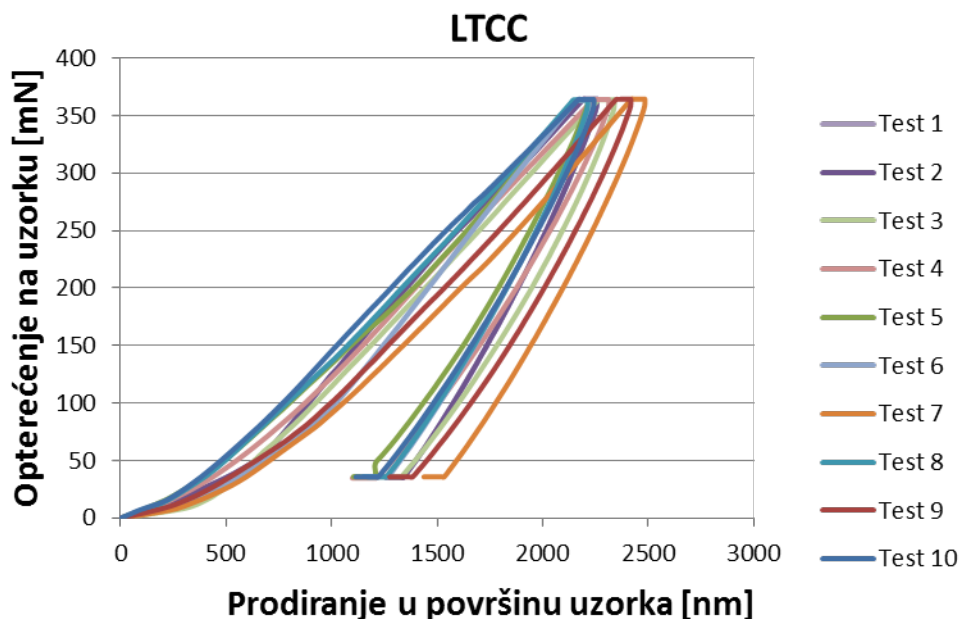


Slika 7.10. Merenje vlage pomoću prenosivog (*handheld*) uređaja i LC senzora

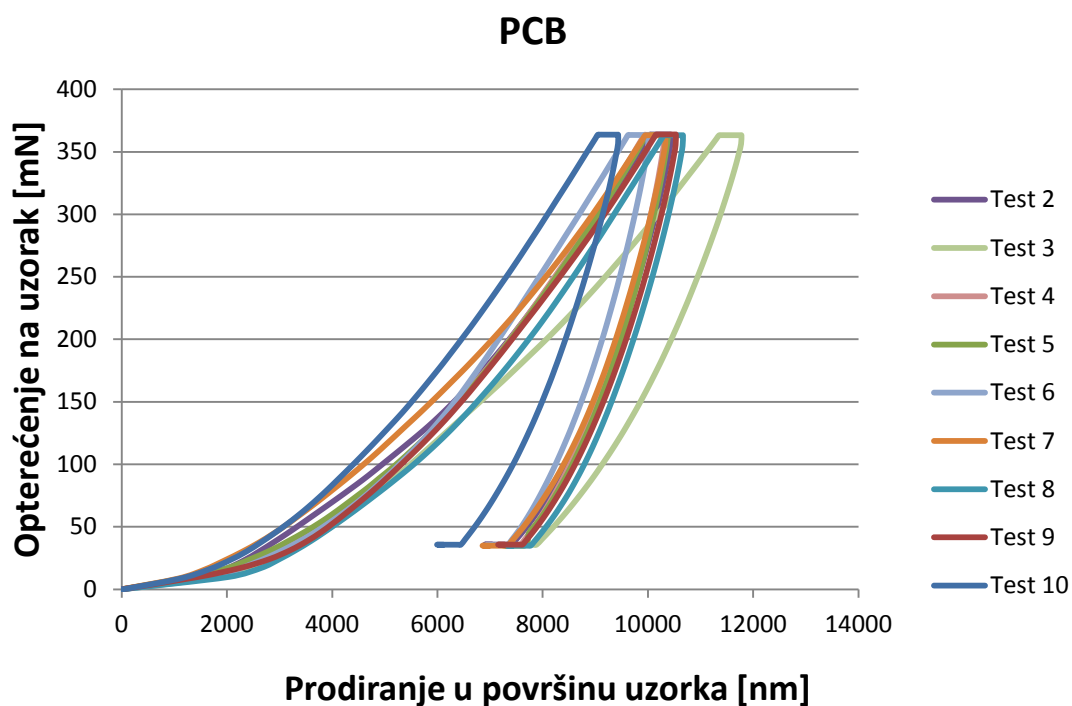
## 8

## Diskusija rezultata

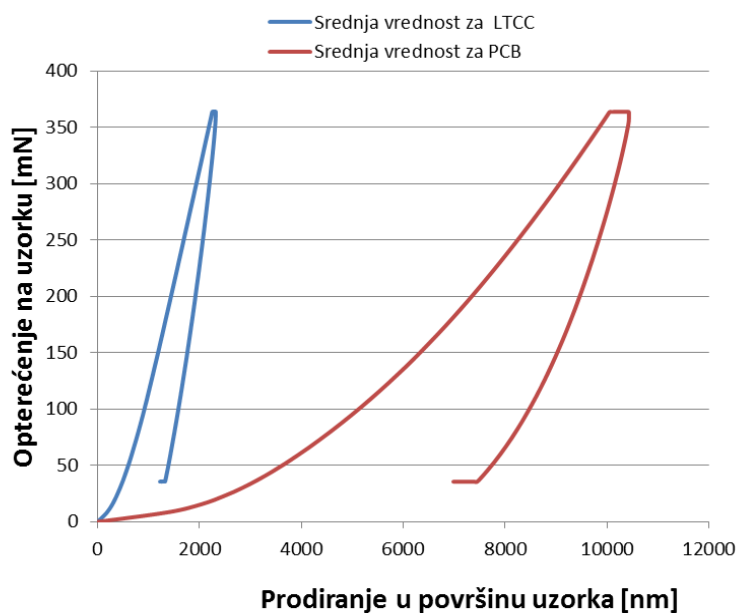
Pored analize senzora na SEM-u i na 3D optičkom profilometru u ovoj disertaciji urađena je i mehanička karakterizacija senzora korišćenjem nanoindentera Agilent G200 [78]. Na slici 8.1 predstavljen je grafik testiranja LTCC podloge na kojoj su izrađeni senzori tipa #4 i tipa #5, gde se može videti da je rađeno 10 merenja a srednja vrednost prikazana je na slici 8.3. Takođe je izvršena i karakterizacija PCB podloge na kojoj su izrađeni senzori tipa #1, tipa #2 i tipa #3 i rezultati su prikazani na slici 8.2. Na slici 8.3 na istom grafiku su prikazane srednje vrednosti merenja za LTCC i za PCB, na osnovu čega se može zaključiti da je prodiranje pri identičnom opterećenju od 370 mN u LTCC podlogu oko 2000 nm, a u PCB podlogu oko 10000 nm. Na osnovu ovoga se može zaključiti da je keramička podloga korišćena za izradu LTCC senzora tipa #4 i tipa #5 čvršća 5 puta u odnosu na PCB podlogu.



Slika 8.1. Testiranje LTCC podloge na nanoindenteru Agilent G200

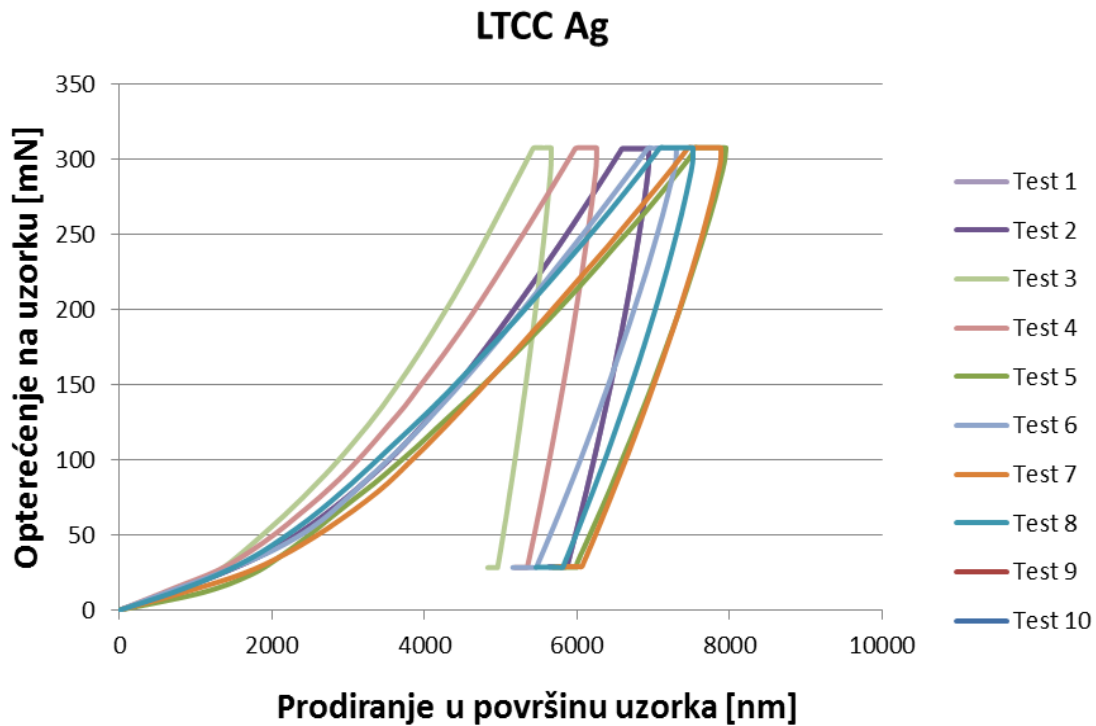


**Slika 8.2. Testiranje PCB podloge na nanoindenteru Agilent G200**

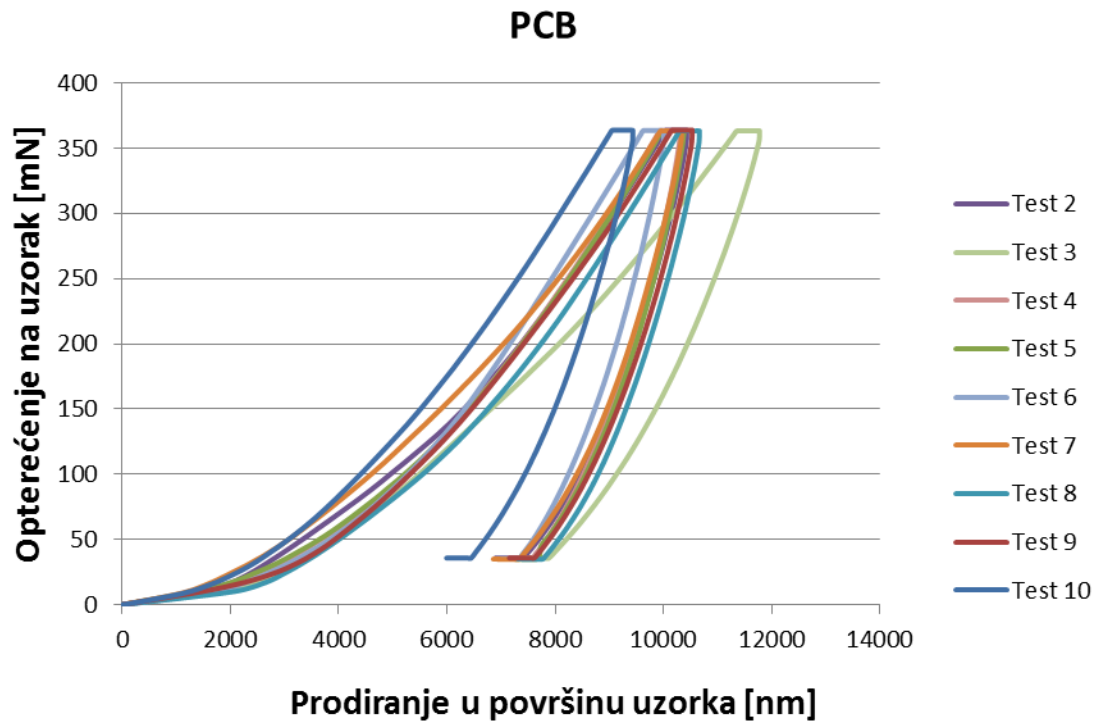


**Slika 8.3. Srednje vrednosti merenja podloga LTCC i PCB na nanoindenteru Agilent G200**

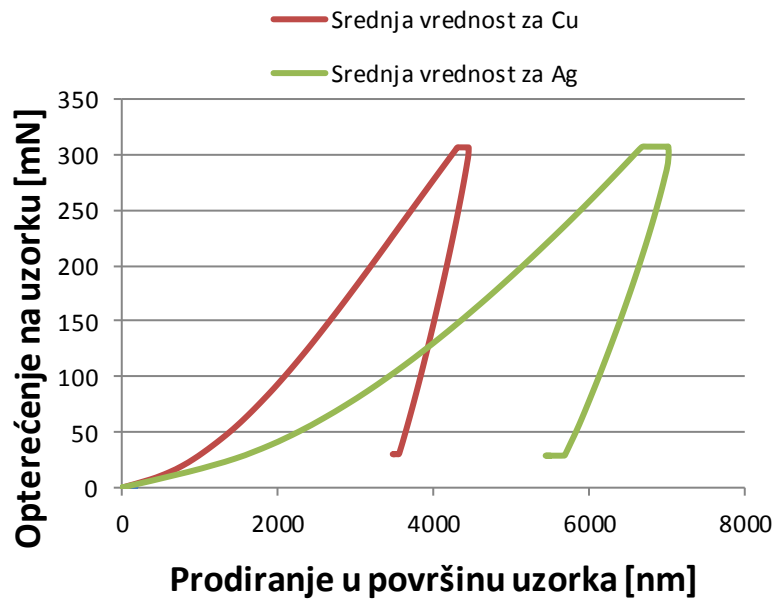
Takođe je izvršena i mehanička karakterizacija provodnih segmenata od srebra (Ag) koje je korišćeno kao provodnik za senzore izrađene u LTCC tehnologiji i bakra (Cu) koji je standardan provodnik na PCB-u. Na slikama 8.4 i 8.5 prikazani su rezultati testiranja za Ag i Cu respektivno. Na slici 8.6 prikazane su srednje vrednosti merenja za Ag i Cu, sa kojih se može zaključiti da je pri istoj sili opterećenja od 310 mN prodiranje u srebro približno 7000 nm, dok je prodiranje u bakar oko 4000 nm.



Slika 8.4. Testiranje provodnih segmenata od srebra (LTCC) na nanoindenteru



Slika 8.5. Testiranje provodnih segmenata od bakra (PCB) na nanoindenteru



Slika 8.6. Srednje vrednosti merenja provodnih segmenata od srebra (LTCC) i bakra (PCB) na nanoindenteru Agilent G200



U tabeli 8.1 prikazane su vrednosti Jungovog modula i čvrstoće za podloge senzora izrađenih u LTCC tehnologiji i senzore izrađene na PCB. Pored toga su prikazane i vrednosti za Ag i Cu.

**Tabela 8.1. Vrednosti Jungovog modula i čvrstoće za podloge LTCC, PCB i provodne segmente Ag i Cu**

Tip materijala	Jungov Moduo [GPa]	Čvrstoća [GPa]
Heraeus CT700 - LTCC	38,118	3,454
FR4 - PCB	3,997	0,176
Ag - LTCC	9,331	0,319
Cu - PCB	18,51	0,837

U ovoj disertaciji opisano je 5 tipova pasivnih LC senzora različitog dizajna i dimenzija od čega je urađena karakterizacija za 4 tipa senzora. U tabeli 8.2 data je osetljivost senzora za dva različita građevinska materijala koji su korišćeni u eksperimentima, opeku i siporeks blok. U tabile je data i aktivna površina senzora, odnosno površina interdigitalnog kondenzatora koja je bila u kontaktu sa uzorkom.

**Tabela 8.2. Aktivna površina senzora i osetljivost za dva tipa građevinskih materijala**

Tip senzora	Aktivna površina senzora (mm <sup>2</sup> )	Osetljivost senzora u opeci	Osetljivost senzora u siporeks bloku
Senzor tipa #1 (PCB)	655,36	0,1324 MHz/1 %	0,0538 MHz/1 %
Senzor tipa #2 (PCB)	303,6	0,1125 MHz/1 %	0,0568 MHz/1 %
Senzor tipa #3 (dvoslojni PCB)	529	0,0529 MHz/1 %	0,0397 MHz/1 %
Senzor tipa #4 (LTCC)	338,56	0,1483 MHz/1 %	0,055 MHz/1 %

Iz ove tabele možemo zaključiti da najbolju osetljivost na promenu koncentracije vlage u opeci ima senzor tipa #4 koji je izrađen u LTCC tehnologiji. Razlog za to je najmanji razmak između prstiju interdigitalnog kondenzatora 0,08 mm dok je za senzore tipa #2 i tipa #3 razmak 0,1 mm a kod senzora tipa #1 je najveći razmak i on iznosi čak 0,2 mm. Osetljivost senzora tipa #1, tipa #2 i tipa #3 u siporeks bloku je skoro ista a razlog tome je ćelijasta struktura siporeks bloka koji je u stanju da upije veliku količinu vlage.

Sa druge strane senzor tipa #3 koji je izrađen na PCB-u u dvoslojnoj štampi i pored najveće aktivne površine senzora ima više od 2 puta lošiju osetljivost u opeci od ostala 3 senzora a razlog za to leži u dvostrukoj štampi i parazitnim kapacitivnostima koje se javljaju između induktora i kondenzatora.

Mehaničke karakteristike senzora izrađenih na PCB-u i na LTCC-u predstavljene su u 6. poglavlju. Na uređaju Nanoindenter G200 urađena je mehanička karakterizacija i podloge i provodnih segmenata. Na osnovu tih rezultata može se zaključiti da podloga na kojoj su urađeni senzori izrađeni u LTCC tehnologiji ima veću čvrstoću ali je veoma krta pa se sa tim sensorima mora pažljivo rukovati. Mehaničke karakteristike provodnih segmenata od srebra (Ag) i bakra (Cu) su takođe urađene, i može se zaključiti da bakar koji se koristi u PCB-u ima gotova dva puta veću elastičnost i čvrstoću od srebra.

U sedmom poglavlju predstavljen je prenosivi uređaj koji se može koristiti za merenje vlažnosti pomoću LC senzora. Ovaj uređaj se može uspešno koristiti za merenja van laboratorije, zbog svojih malih dimenzija i jednostavne upotrebe ali je potrebno da se senzor i uređaj kalibrišu za merenja različitih materijala kao što je to urađeno i na komercijalnom uređaju Testo 606-2.

# 9

## Zaključak

Metoda koja je opisana u ovoj disertaciji za merenje vlage u građevinskim materijalima može biti nedestruktivna u slučajevima kada se meri vlaga na površini materijala ili u slučaju kada se senzori ugrađuju u objekat prilikom izgradnje. U slučaju kada se neki od ovih senzora koristi za merenje vlage u zidu ili podu građevinskog objekta, metoda je destruktivna jer postoji potreba da se izbuši rupa i da se senzor postavi na određenu dubinu.

U ovoj disertaciji opisano je pet LC senzora od kojih su prva 3 tipa senzora izrađena na PCB-u dok su poslednja 2 tipa senzora izrađena u LTCC tehnologiji. Pored razlike u proizvodnom procesu prednost senzora izrađenih u LTCC tehnologiji je što mogu da podnesu mnogo veće temperaturne promene pa se zbog toga mogu koristiti i u mnogim drugim aplikacijama, a takođe moguće je u toku procesa proizvodnje zaštititi induktor od vlage postavljanjem 3. sloja. Pored navedenih prednosti, velika mana senzora izrađenih u LTCC tehnologiji je to što su veoma krta pa prilikom rukovanja sa njima treba biti veoma pažljiv. Sa druge strane senzori izrađeni na PCB-u su veoma robusni i izdržljivi što je veoma bitno za praktične primene u građevinskoj industriji.

Mogući izvori greške merenja su: korozija provodnih linija od bakra na interdigitalnom kondenzatoru tokom dugog perioda izlaganja vlazi (prevencija ovog efekta može se postići nanošenjem tankog sloja zaštitnog laka), varijacije temperature i donekle prisustvo metalnih komponenti u blizini mesta merenja. Takođe analiziran je i uticaj slane vode na rezultate merenja, ali prilikom sušenja uočeno je taloženje soli na senzor i u građevinskom materijalu. Mali histerezis je primećen između rezultata dobijenih iz dva ciklusa, tokom apsorpcije slane vode iz bazena i tokom procesa sušenja. Razlog za ovaj fenomen je taj što je so u čvrstom obliku (tokom ciklusa sušenja opeke) nema provodne karakteristike, dok je rastvor soli i vode natrijum hlorid (u ovom eksperimentu) i zapravo je elektrolit.

Pored toga, opisana tehnika se može koristiti za praćenje promena koncentracije vlage u građevinskim materijalima ili relativnog sadržaja vlage i može biti korisna za

mnoge primene, na primer, praćenje sušenja zgrade posle poplava. Međutim, neke aplikacije mogu takođe zahtevati apsolutno merenje vlažnosti. Predstavljena metoda može da se primeni za ova merenja, takođe. Za proveru rezultata korišćen je komercijalni uređaj Testo 606-2. Ovaj instrument meri apsolutnu vlažnost drveta i građevinskih materijala nedestruktivnom metodom i sadrži karakteristične krive za najčešće korišćene građevinske materijale kao što su cementne košuljice, YTONG blok, opeka, beton i različite vrste drveta.

Na osnovu rezultata koji su predstavljeni u ovom radu objavljeno je 9 naučnih radova od čega 3 rada u časopisima sa SCI liste (M21), zatim 4 rada na međunarodnim skupovima (M33) i 2 rada na skupovima nacionalnog značaja (M63). Spisak radova po kategorijama nalazi se u nastavku.

### **M21 – Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu**

1. **M. Radovanović**, B. Mojić-Lante, K. Cvejic, V.V. Srdić, G. Stojanović, “A Wireless LC Sensor Coated with  $Ba_{0.9}Bi_{0.066}TiO_3$  for Measuring Temperature”, *Sensors*, (IF: 2.245), vol. 15, 11454-11464, ISSN 1414-8220, 2015, doi:[10.3390/s150511454](https://doi.org/10.3390/s150511454).
2. M. Maksimović, G. Stojanović, **M. Radovanović**, M. Malešev, V. Radonjanin, G. Radosavljević, W. Smetana, “Application of a LTCC sensor for measuring moisture content of building materials”, *Construction and Building Materials* (IF: 1.834), vol. 26, no. 1, pp. 327-333, 2012, ISSN: 0950-0618, doi:[10.1016/j.conbuildmat.2011.06.029](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.029).
3. G. Stojanović, **M. Radovanović**, M. Malešev, V. Radonjanin, “Monitoring of Water Content in Building Materials Using a Wireless Passive Sensor”, *Sensors* (IF: 1.774), vol. 10, no. 5, pp. 4270-4280, 2010, ISSN 1424-8220, doi:[10.3390/s100504270](https://doi.org/10.3390/s100504270).

### **M33 – Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini**

1. **M. Radovanović**, G. Stojanović, “Performances Comparison of Wireless Passive Sensors for Measuring Moisture in Construction Materials”, 48<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics, Devices and Materials, 19-21 September. 2012, Otočec, Slovenia.
2. **M. Radovanović**, G. Stojanović, N. Blaž, “Computer as a tool for controlling measurement of water content in building materials”, EUROCON, Lisabon 2011, no. 314, str. 1-4, ISBN: 978-1-4244-7485-1.
3. **M. Radovanović**, M. Malešev, V. Radonjanin, G. Stojanović, “Innovative design of a cheap wireless sensor for monitoring water content in construction

- materials”, *Junior Scientist Conference 2010*, Viena, Austria, 7-9 April 2010, pp. 191-192, ISBN: 978-3-200-01797-9.
4. M. Maksimović, G. Stojanović, G. Radosavljević, **M. Radovanović**, “Design and fabrication of a wireless, passive sensor for environmental monitoring”, *International Workshop on ICT and Sensing Technologies in Agriculture, Forestry and Environment “BioSense09”*, Novi Sad, 2009.

### **M63 – Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini**

1. M. Maksimović, G. Radosavljević, **M. Radovanović**, G. Stojanović, “Primena bežičnog LC senzora za merenje koncentracije vode u građevinskim materijalima”, IX INFOTEH, Jahorina, vol. 9, no. E-V-5, pp. 714-718, 2010.
2. **M. Radovanović**, G. Stojanović, M. Malešev, V. Radonjanin, “Novi dizajn bežičnog LC senzora za praćenje sadržaja vlage u građevinskim materijalima”, 54. ETRAN, Donji Milanovac, 2010.

# 10

## Literatura

- [1] M. Popović, “*Senzori tečnosti i gasova*“, Viša elektrotehnička Škola, Beograd, 1999.
- [2] M. Maksimović, “*Razvoj senzora i primjena bežičnih senzorskih mreža u savremenoj poljoprivredi i zaštiti životne sredine*“, Magistarski rad, Istočno Sarajevo, 2009.
- [3] N. Wang, N. Zhang, M. Wang, “*Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective*“, Computers and electronics in agriculture, 2007, vol. 50, pp. 1-14.
- [4] A. Modi, N. Koratkar, E. Lass, B. Wei, P.M. Ajayan, “*Miniaturized gas ionizator sensors using carbon nanotubes*“, Letters to nature, 2003, vol. 424, pp. 171-174.
- [5] L.O. Nilsson, “*Hygroscopic moisture in concrete - drying, measurements & related material properties*“, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1980.
- [6] L.E. Nevander, B. Elmarsson “*Fukthandbok: praktik och teori (Moisture handbook: practice and theory, in Swedish)*“, Svensk byggtjänst, Solna, Sverige, 1994.
- [7] A. Oliver, “*Dampness in buildings. Second edition revised by James Douglas and J. Stewart Stirling*“, Blackwell Science Ltd., Oxford, UK, 1997.
- [8] S. Akita, H. Sasaki, K. Watanabe, A. Seki, “*A humidity sensor based on a heterocore optical fiber*“, Sens. Actuators B: Chem. 2010, vol. 147, pp. 385–391.
- [9] X. Lv, Y. Li, P. Li, M. Yang, “*A resistive-type humidity sensor based on crosslinked polyelectrolyte prepared by UV irradiation*“, Sens. Actuators B: Chem. 2009, vol. 135, pp. 581–586.
- [10] K.A.A. Makinwa, “*Smart temperature sensors in standard CMOS*“, Proc. Eng. 2010, vol. 5, pp. 930–939.
- [11] P. Pacher, A. Lex, S. Eder, G. Trimmel, C. Slugovc, E.J.W. List, “*A novel concept for humidity compensated sub-ppm ammonia detection*“, Sens. Actuators B: Chem., 2010, vol. 145, pp. 181–184.

- [12] T. Nagai, S. Tamura, N. Imanaka, “*Solid electrolyte type ammonia gas sensor based on trivalent aluminum ion conducting solids*”, Sens. Actuators B: Chem., 2010, vol. 147, pp. 735–740.
- [13] J.W. Jeong, Y.D. Lee, Y.M. Kim, Y.W. Park, J.H. Choi, T.H. Park, et al., “*The response characteristics of a gas sensor based on poly-3-hexylthiophene thin-film transistors*”, Sens. Actuators B: Chem., 2010, vol. 146, pp. 40–45.
- [14] M. Ammam, B. Keita, L. Nadjo, J. Fransaer, “*pH sensor based on the crown heteropolyanion K<sub>28</sub>Li<sub>5</sub>H<sub>7</sub>P<sub>8</sub>W<sub>48</sub>O<sub>184</sub>•92H<sub>2</sub>O immobilized using a layer by layer assembly process*”, Sens. Actuators B: Chem., 2009, vol. 142, pp. 347–354.
- [15] A. Oprea, N. Bârsan, U. Weimar, M.-L. Bauersfeld, D. Ebling, J. Wöllenstein, “*Capacitive humidity sensors on flexible RFID labels*”, Sens. Actuators B: Chem., 2008, vol. 132, pp. 404–410.
- [16] T.S. López, “*RFID and sensor integration standards: state and future prospects*”, Comp. Stand. Interfaces, 2011, vol. 33, pp. 207–213.
- [17] X.Wang, O. Larsson, D. Platt, S. Nordlinder, I. Engquist, M. Berggren, X. Crispin, “*An all-printed wireless humidity sensor label*”, Sensors and Actuators B: Chemical, 2012, no of 6 pages, doi:10.1016/j.snb.2012.03.009.
- [18] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro and I. Robla, “*A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends*”, Sensors, 2009, vol. 9, no. 6, pp. 4728-4750, doi:10.3390/s90604728
- [19] G. Stojanovic, M. Radovanovic, M. Malesev, V. Radonjanin, “*Monitoring of Water Content in Building Materials Using a Wireless Passive Sensor*”, Sensors, 2010, vol. 10, No. 5, 2010, pp. 4270-4280, doi:10.3390/s100504270.
- [20] C. A. Grimes, D. Kouzoudis, K. G. Ong and R. Crump, “*Thin-Film Magnetoelastic Micro Sensors for Remote Query Biomedical Monitoring*”, Biomedical Microdevices, 2000, vol. 2, No. 1, 2000, pp. 51-60, doi:10.1023/A:1009907316867.
- [21] L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, C. C. W. Ruppel, W.-E. Bulst and F. Seifert, “*SAW Devices as Wireless Passive Sensors*”, Proceedings of Ultrasonics Symposium, San Antonio, 3-6 November 1996, pp. 363-637.

- [22] C. A. Grimes, C. S. Mungle, K. Zeng, M. K. Jain, W. R. Dreschel, M. Paulose and K. G. Ong, “*Wireless Magnetoelastic Resonance Sensors: A Critical Review*”, *Sensors*, 2002, vol. 2, no. 7, pp. 294-313. doi:10.3390/s20700294.
- [23] J. C. Butler, A. J. Vigliotti, F. W. Verdi and S. M. Walsh, “*Wireless, Passive Resonant Circuit, Inductively Coupled, Inductive Strain Sensor*”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 102, No. 1-2, 2002, pp. 61-66. doi:10.1016/S0924-4247(02)00342-4.
- [24] K. G. Ong, C. A. Grimes, C. L. Robbins and R. S. Singh, “*Design and Application of a Wireless, Passive, Resonant Circuit Environmental Monitoring Sensor*,” *Sensors and Actuators A*, Vol. 93, No. 1, 2001, pp. 33-43. doi:10.1016/S0924-4247(01)00624-0.
- [25] E. L. Tan, W.N. Ng, R. Shao, B. D. Pereles, K. G. Ong, “*A Wireless, Passive Sensor for Quantifying Packaged Food Quality*”, *Sensors*, vol. 7, 2007, pp. 1747-1756.
- [26] K. G. Ong, J. S. Bitler, C. A. Grimes, L. G. Puckett, L. G. Bachas, “*Remote Query Resonant-Circuit Sensors for Monitoring of Bacteria Growth: Application to Food Quality Control*”, *Sensors*, vol. 2, 2002, pp. 219-232.
- [27] D. A. Sanz, E. A. Unigarro, J. F. Osman, F. S. Quijano, “*Low cost wireless passive microsensors for the detection of hazardous compounds in water systems for control and monitoring*”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 178, 2013, pp. 26-33.
- [28] K.G. Ong, J. Wang, R.S. Singh, L.G. Bachas, C.A. Grimes, “*Monitoring of bacteria growth using a wireless, remote query resonant-circuit sensor: application to environmental sensing*”, *Biosensors & Bioelectronics*, vol. 16, 2001, pp.-305-312.
- [29] K.G. Ong, C.A. Grimes, “*A Resonant printed-circuit sensor for remote query monitoring of environmental parameters*”, *Smart Materials Structure*, vol. 9, 2000, pp. 421-428.
- [30] M. Yvanoff, “*LC Sensor for biological tissue characterization*”, PhD thesis, Rochester Institute of Technology, 2008.



- [31] A.S.G. Reddy, A. Eshkeiti, B.B. Narakathu, M. Rebros, E. Rebrosova, M. Joyce, M.Z. Atashbar, “*Fully printed wireless LC sensor for heavy metal detection*”, IMCS 2012 – The 14th International Meeting on Chemical Sensors, pp. 1191-1194.
- [32] J. Xiong, C. Li, P. Jia, X. Chen, W. Zhang, J. Liu, C. Xue, Q. Tan, “*An insertable passive LC pressure sensor based on an alumina ceramic for In Situ pressure sensing in high-temperature environments*”, *Sensors*, vol. 15, pp. 21844-21856, doi:10.3390/s150921844.
- [33] A.J. DeRouin, B.D. Pereles, T.M. Sansom, P. Zang, K.G. Ong, “*A wireless inductive-capacitive resonant circuit*”, *Journal of Sensor Technology*, vol. 3, 2013, pp. 63-69.
- [34] H. Glaser, “*Graphical method for investigation of diffusional processes*”, *Kaltetechnik* 1959; 11(10): pp. 345–349.
- [35] UK Climate Impacts Programme, “*Climate change scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Briefing Report*”, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich, 2002.
- [36] H.M. Graves, M.C. Phillipson, “*Potential implications of climate change in the built environment*”, Foundation for the Built Environment, London, 2000.
- [37] [http://a2iprojekt.hr/mjerenje\\_vlage.htm](http://a2iprojekt.hr/mjerenje_vlage.htm)
- [38] A.E. Knowler, “*On the measurement of the electrical resistance of porous materials*”, *Proc Phys Soc* 1927; 40, pp.37–40.
- [39] G. Andrae, “*The measurement of moisture in concrete*”, *Materialprufung* 1973; 15(3), pp. 95–97.
- [40] W.C. Heerens, “*Application of capacitance techniques in sensor design*”, *J Phys E Sci Instrum* 1986; 19: pp. 897–907.
- [41] L.K. Baxter, “*Capacitive sensors: design and application*”, Piscataway, NJ, USA, IEEE Press, 1997.
- [42] M.J. Dill, “*A review of testing for moisture in building elements*”, Construction Industry Research and Information Association, London, 2000.
- [43] <http://www.industrijska-merenja.rs/instrumenti/meraci/merac-vlage-materijala-pce-pmi-1.html>

- [44] <http://www.industrijska-merenja.rs/instrumenti/meraci/merac-vlage-betona-pce-wp-21.html>
- [45] <http://www.pce-grupa.rs/vlagomeri/vlaga-materijala/merac-vlage-sr-7825ps-detalji.html>
- [46] A.J. Newman, “*The independent core method – a new technique for the determination of moisture content*”. Building Science 1974, vol. 9, pp. 309–313.
- [47] <http://thelaststraw.org/building-monitoring-straw-bale-buildings-part-1/>
- [48] A. Watson, “*Measurement and control of moisture content by microwave absorption*”, Build Int 1970; 3(3): 47–50.
- [49] G. Eidmann, R. Savelsberg, P. Blumler, B. Blumich, “*The NMR mouse, a mobile universal surface explorer*”, Journal of Magnetic Resonance Series A, 1996, vol. 122, pp. 104–109.
- [50] S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, O. Adan, H. Brocken, R. Cerny, Z. Pavlik, A.T. Ellis, C. Hall, K. Kumaran, L. Pel, R. Plagge, “*A comparison of different techniques to quantify moisture content profiles in porous building materials*”, Journal of Thermal Env & Bldg Sci 2004, vol. 27, no. 4, pp. 261–276.
- [51] R.J Gummerson, C. Hall, W.D. Hoff, R. Hawkes, G.N. Holland, W.S. Moore, “*Unsaturated water flow within porous materials observed by NMR imaging*”, Nature 1979, vol. 281 no. 5726, pp. 56–57.
- [52] S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, “*Moisture transfer properties and materials characterization*”, Final Report of WP1, HAMSTAD Project, Document KUL2003-h18, K.U. Leuven, Belgium, 2003.
- [53] J.A. Chudek, G. Hunter, M.R. Jones, S.N. Scrimgeour, P.C. Hewlett, A.B. Kudryavtsev, “*Aluminium-27 solid state NMR spectroscopic studies of chloride binding in portland cement and blends*”, Journal of Materials Science, 2000, vol. 35, no. 17, pp. 4275–4288.
- [54] L. Pel, K. Kopinga, E.E. Kaasschieter, “*Saline absorption in calcium silicate brick observed by NMR scanning*”, Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, vol. 33, pp. 1380–1385.
- [55] J. Sun, M. Campbell, D. Bailly, N. Poffa, G.H. Galbraith, R.C. McLean, C. Sanders, G.G. Nielsen, “*Imaging techniques for structures using X- and  $\gamma$ - photons*”,

- Proceedings of Sensors and their Applications XII, The Institute of Physics, Limerick, 2003.
- [56] D. Bailly, M. Campbell, N. Poffa, J. Sun, G.H. Galbraith, R.C. McLean, C. Sanders, G.G. Nielsen, “*Moisture transport studies in building materials*”, Proceedings of Sensors and their Applications XII, The Institute of Physics, Limerick, 2003.
- [57] R. Wormald, A.L. Britch, “*Methods of measuring moisture content applicable to building materials*”, Building Science, 1969, vol. 3, pp. 135–145.
- [58] H. Justnes, K. Bryhn-Ingebrigtsen, G.O. Rosvold, “*Neutron radiography: an excellent method of measuring water penetration and moisture distribution in cementitious materials*”, Advances in Cement Research, 1994, vol. 6, no. 22, pp. 67–72.
- [59] J.M. Tarara, J.M. Ham, “*Evaluation of dualprobe heat-capacity sensors for measuring soil water content in the laboratory and in the field*”, Agronomy Journal, 1997, vol. 89, pp. 535–542.
- [60] G.S. Campbell, C. Calissendorff, J.H. Williams, “*Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method*”, Soil Sci Soc Am J, 1991, vol. 55, pp. 291–293.
- [61] G.J. Kluitenberg, J.M. Ham, K.L. Bristow, “*Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity*”, Soil Sci Soc Am J, 1993, vol. 57, pp. 1444–1451.
- [62] M.K. Kumaran, “*Material Properties*” – Final Report, Volume 3. IEA Annex 24, KU Leuven, Belgium, 1996.
- [63] M. Davies, M. Tirovic, Z. Ye, P.H. Baker, “*A low cost, accurate instrument to measure the moisture content of building envelopes in-situ: a modelling study*”, Building Serv Eng Res Technol, 2004, vol. 25, no. 4, pp. 295–304.
- [64] R. Plagge, “*Bestimmung von Materialfeuchte un Salzgehalt in kapillar poro“ sen Materialien mit TDR*”, Kolloquium mit Workshop Innovative.Feuchtemessung und Praxis, Karlsruhe, 3–4 July, 2003.
- [65] I.L. Freeston, “*From four-point probe to impedance imaging*”, Engineering Science and Education Journal, 1997, vol. 6, no. 6, pp. 245–254.

- [66] J.L. Davidson, L.S. Ruffino, D.R. Stephenson, R. Mann, B.D. Grieve, T.A. York ,  
“*Three dimensional electrical impedance tomography applied to a metal-walled  
filtration test platform*”, Meas Sci & Tech, 2004, vol. 15, pp. 2263–2274.
- [67] A. McNaughtan, R.O. Ansell, M. Gallagher, “*The use of microelectrode sensors  
in the investigation and modelling of sensing electrodes in industrial electrical  
impedance tomographic applications*”, Proceedings of Sensors and their Applications  
XII, The Institute of Physics, Limerick, 2003.
- [68] B.S. Leonard, “*Fundamentals of electrical engineering*”, Oxford University Press,  
Inc, USA, second edition, 1996.
- [69] D. M. Pozar, “*Microwave engineering*”, John Wiley & Sons, Inc, USA, second  
edition, 1998.
- [70] J. W. Nilsson and S. A. Riedel, “*Electric circuits*”, Addison-Wesley, USA, fourth  
edition, 1993.
- [71] J. Ong, Z. You; J. Mills-Beale, E. Lim Tan; B. Pereles; K.G. Ong, “*A wireless,  
passive embedded sensor for real-time monitoring of water content in civil  
engineering materials*”, IEEE Sensor. J. 2008, vol. 8, no. 12, 2053-2058
- [72] <http://www.bioimager.com/>
- [73] BS EN 771-1 Specification for masonry units Part 1: Clay masonry units.
- [74] BS EN 771-4 Specification for masonry units. Autoclaved aerated concrete  
masonry units.
- [75] [www.testo.org](http://www.testo.org)
- [76] <http://www.elektronb.co.rs>
- [77] E.L. Tan, W.N. Ng, R. Shao, B.D. Pereles, K.G. Ong, “*A wireless, passive, sensor  
for quantifying packaged food quality*”, Sensors, 2007, vol. 7, pp. 1747-1756.
- [78] <http://www.agilent.com/home>