

PRIMENA BEŽIČNOG LC SENZORA ZA MERENJE KONCENTRACIJE VODE U GRAĐEVINSKIM MATERIJALIMA

APPLICATION OF A WIRELESS LC SENSOR FOR MEASURING WATER CONCENTRATION IN BUILDING MATERIALS

Mirjana Maksimović, *Elektrotehnički fakultet, Istočno Sarajevo, Republika Srpska*
Goran Radosavljević, Milan Radovanović, Goran Stojanović, *Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Srbija*

Sadržaj – U ovom radu je opisana primena bežičnog LC senzora za merenje koncentracije vode (ili vlažnosti) u građevinskim materijalima. Senzor je proizveden u LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) tehnologiji, i sastoji se od paralelne veze induktora i češljastog kondenzatora. Senzor se postavlja u test uzorak građevinskog materijala koji je uronjen u vodi, tako da se promena koncentracije vode u uzorku može meriti bežično (antenskim namotajem) praćenjem promene rezonantne frekvencije senzora. Za ispitivanje i testiranje su korišćeni glinena cigla i siporeks blok kao jedni od najčešće upotrebljivanih građevinskih materijala. 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.

Abstract – In this paper, the application of a wireless LC sensor for measuring the water concentration (or humidity) in building materials is described. The sensor has been fabricated in LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) technology, and consists of an inductor and an interdigitated capacitor connected in parallel. The sensor is embedded in the test sample of a building material which has been set in pool water, so that changes in the water concentration in the sample can be measured wirelessly (with an antenna coil) tracking changes in sensor resonant frequency. For analysis and testing a clay brick and aerated autoclaved concrete block were used as widely applied construction materials. Dielectric constant of water is much higher compared to the permittivity of test samples, and the increased water concentration (or dampness) in the samples decreases the sensor resonant frequency. Measurements were conducted using an RF Impedance Analyzer HP-4191A.

1. UVOD

U građevinskoj industriji postoji potreba da se prati veliki broj parametara kao što su uticaj vibracija, vlaga, zamor materijala, i drugih parametara, da bi se imao uvid u stanje objekata i drugih građevinskih struktura. Na taj način se obezbeđuje potpuna sanacija u pravo vreme, a pogotovo je to važno za objekte koji su osetljivi na uticaje životne sredine [1]-[3]. Vlaga je svuda – počevši od vazduha pa sve do građevinskih elemenata kao što su drvene grede, parket, beton, zidovi ili toplotna izolacija. U savremenom građevinarstvu neophodno je da vlažnost građevinskih elemenata i materijala bude poznata. U tu svrhu koriste se različiti merni uređaji i metode koji daju manje ili više tačne rezultate [4]. Postoji više načina merenja i opisivanja vlage ili vlažnosti što uglavnom zavisi od konkretne primene. Obzirom na raznovrsnu primenu senzora vlažnosti, postoji dosta široka lista tehničkih zahteva u pogledu njihovih performansi, kao što su: dobra osetljivost u što većem opsegu vlažnosti, brz odziv, dobra ponovljivost sa malim histerezisom, otpornost na kontaminante, izdržljivost i dugotrajnost, 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 [5].

Fokus ovog rada je na pronalaženju optimalnog dizajna senzora za merenje vlažnosti u najčešće korišćenim građevinskim materijalima. Simulacije rezonantnog LC senzora su izvršene u COMSOL softverskom paketu nakon čega se pristupilo i fabrikaciji senzora u LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) tehnologiji. Promena koncentracije vode u uzorku merena je bežično (antenskim namotajem) praćenjem promene rezonantne frekvencije senzora. Merenja su vršena pomoću instrumenata RF Impedance Analyzer HP-4191A.

2. METODE MERENJA VLAŽNOSTI

Kad je reč o metodama merenja vlažnosti, električni postupci merenja vlažnosti su merenje vlažnosti električnim otporom i kapacitivno merenje vlažnosti.

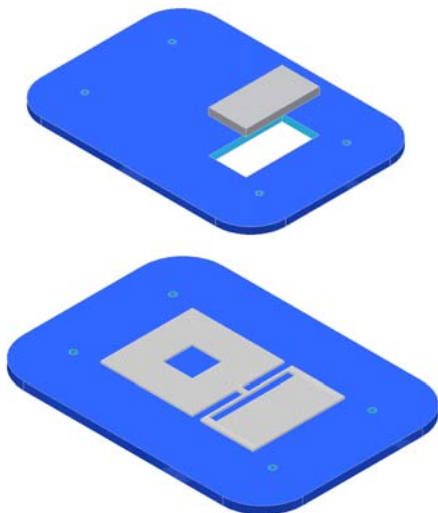
Merenje vlažnosti električnim otporom zasniva se na činjenici da svaki materijal ima određeni električni otpor, a sadržaj vode ima direktan uticaj na električni otpor materijala; više vode – manji otpor! Merenje vlažnosti električnim otporom vrši se iglama; dva merna detektora postavljaju se u građevinski element zabijanjem ili bušenjem te se meri električni otpor u funkciji od električne provodljivosti. Vlažni materijali imaju veću provodljivost, a električni otpor je niži. Merni uređaj indicira rezultate koji se već prema različitim građevinskim materijalima mogu preračunati u procenat vlažnosti. Merenje električnim otporom predstavlja

jednostavnu i brzu metodu za određivanje vlažnosti građevinskih elemenata.

Kod kapacitivnog merenja vlažnosti, vlažnost se posreduje elektromagnetnim talasima, bez kontaktnih elektroda. Merenje vlažnosti vrši se postavljanjem mernog držača odnosno senzora na ispitni medij. Ovde se govori zapravo o „dielektričnom“ postupku merenja sadržaja vode. Što je dielektrična konstanta viša, to je i vlažnost veća. Merenje se vrši na bazi visokofrekvencijskih talasa koje odašilje merni instrument. Pri tome se ustvari meri kapacitivnost kondenzatora koji predstavlja srce mernog seta. Ako se merenje realizuje rezonantnim putem onda je senzor zapravo LC kolo. Merna elektronika potom transformiše merne podatke u očitljive procentualne vrednosti. Greške u merenju javljaju se na neravnim površinama kada senzor ne naleže u potpunosti na materijal. Zbog toga je neophodno razviti senzor kod koga će induktivni deo senzora (L) i kapacitivni deo senzora (C) biti realizovani u jednom metalnom sloju. To zahteva onda inovativni dizajn induktorskog dela, kao što je predloženo u ovom radu, za razliku od klasičnog spiralnog tipa induktora koji se obično do sada koristio u literaturi [3] iako je za njegovu realizaciju neophodan još jedan sloj takozvani *overpass* ili *underpass*, što onda otežava dobro naleganje senzora na materijal i zahteva lemljenje još jedne žice (ili provodnog sloja).

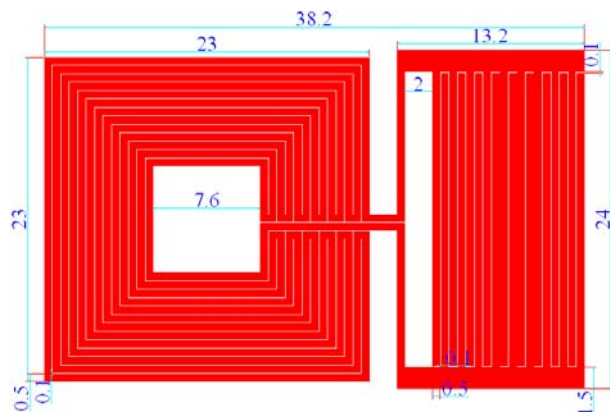
3. STRUKTURA SENZORA VLAŽNOSTI

Senzor se sastoji od dielektričnog sloja kao osnove, u sredini su realizovani induktor i češljasti kondenzator u jednom metalnom sloju a potom je cela struktura ponovo prekrivena još jednim dielektričnim slojem. Na tom sloju s gornje strane je napravljen otvor iznad elektroda kondenzatora (slika 1) da bi samo on bio izložen dejstvu vlage, što će onda menjati dielektričnu konstantu kondenzatora, odnosno njegovu ukupnu kapacitivnost, pa samim tim onda i rezonantnu učestanost LC senzora.



Sl. 1. 3D model LC senzora

Dizajn senzora predložen u ovom radu čini planarno rezonantno kolo koje se sastoji od kvadratnog induktora sa inovativnim dizajnom formiranja njegovih namotaja i interdigitetnog kondenzatora kao što je prikazano na slici 2. Prikazane dimenzije senzora, na slici 2, izražene su u milimetrima.



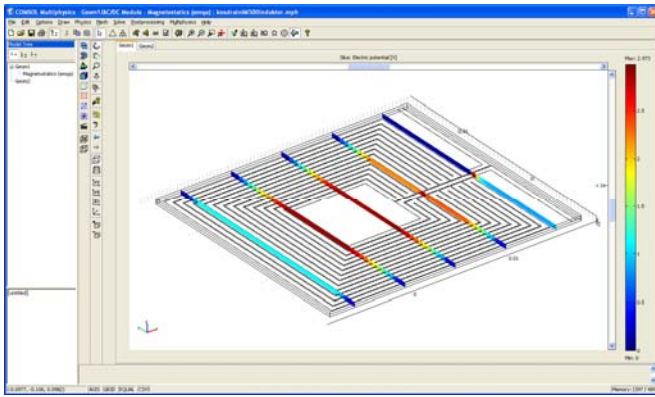
Sl. 2. Dimenzije LC strukture senzora vlažnosti

Elektrode interdigitetnog kondenzatora su izložene dejstvu vlage i kako se permitivnost menja tako se menja i rezonantna frekvencija senzora koja se bežično meri pomoću antenskog sistema. Pasivna priroda ovakvog LC senzora omogućava dugoročno praćenje parametara bez ograničenja kao što je npr. vek trajanja baterije. 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 je kapacitivnost interdigitetnog kondenzatora promenljiva u zavisnosti od koncentracije vlage.

4. MODELOVANJE U COMSOL MULTIPHYSICS SOFTVERSKOM PAKETU

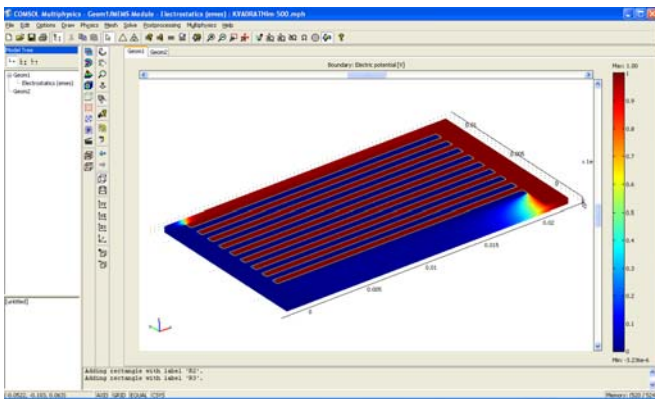
Za nalaženje senzora željenih specifikacija potrebno je fabrikovati veliki broj struktura i izvršiti njihovu karakterizaciju. Alternativni metod je korišćenje savremenih elektromagnetnih (EM) simulatora. Pored toga što je ovakav način ekonomičniji ujedno je i mnogo fleksibilniji iz razloga što se vrlo 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* [6] 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 mogu dobiti optimalni dizajni novih senzora i samim time izbeći pravljenje velikog broja test struktura, što svakako utiče na smanjenje cene novih senzora. Osnovna prednost predloženog dizajna senzora jeste činjenica da su i induktivni i kapacitivni deo senzora fabrikovani i međusobno spojeni samo u jednom metalnom sloju srebra kao i to što je pasivan, bežičan i pogodan za dugoročno merenje parametara od interesa ali je i jeftin (baš zato što je realizovan u minimalnom broju metalnih slojeva).

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 [7].



Sl. 3. Vrednost električnog potencijala duž induktora

Interdigitetni kondenzator se simulira korišćenjem MEMS modula. Kapacitivnost se izračunava takođe kroz pet prethodno navedenih koraka projektovanja i simulacije. Dobijene vrednosti simuliranih L i C , kao i rezonantna frekvencija senzora prikazane su u tabeli 1.



Sl. 4. Električni potencijal na površini interdigitetnog kondenzatora

Tabela 1. Vrednosti dobijene procesom simulacije

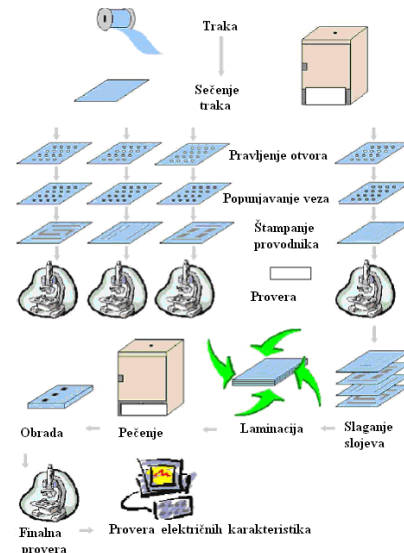
	Induktivnost L [nH]	Kapacitivnost C [pF]	Rezonantna frekvencija f_0 [MHz]
LTCC senzor	114	19,1	108

5. PROCES PROIZVODNJE SENZORA U LTCC TEHNOLOGIJI

Nakon pronalaska optimalnog dizajna izvršena je i proizvodnja predloženog dizajna senzora u LTCC tehnologiji koja se, zahvaljujući vrlo dobrim električnim i mehaničkim svojstvima, visokoj pouzdanosti i stabilnosti, kao i mogućnosti izrade trodimenzionalnih (3D) integrisanih mikrostruktura, koristi za proizvodnju senzora i aktuatora. 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 5. Kao što se može videti 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.

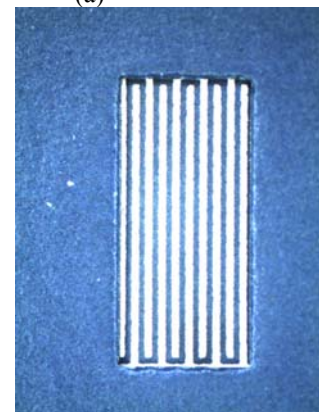


Sl. 5. Šematski izgled procesa izrade komponenta/kola u LTCC tehnologiji

Prolazeći kroz sve navedene faze procesa izrade komponenti u LTCC tehnologiji fabrikovana je struktura senzora vlažnosti prikazana na slici 6, dizajna predloženog i već ilustrovanog na slici 2.



(a)



(b)

Sl. 6. (a) Izgled senzora proizvedenog LTCC tehnologijom, (b) prikaz uvećanog dela interdigitetnog kondenzatora

U fabricaciji senzora korišćena je provodna pasta od srebra TC7303 koju odlikuje dobra provodnost, osetljivost na elektrohemijske promene kao i niska cena, dok se kao osnova koristio dielektrični materijal Heraeus CT700 [8].

6. MERENJE VLAŽNOSTI U GRAĐEVINSKIM MATERIJALIMA

Pošto je cilj ovog rada dizajn i fabricacija bežičnog rezonantnog senzora merenje će se vršiti beskontaktnim putem pomoću spregnutog antenskog namotaja. Promena koncentracije vode u uzorku se meri bežično 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 instrumenata RF Impedance Analyzer HP-4191A (slika 7). Za ispitivanje karakteristika i testiranje performansi senzora korišćeni su glinena cigla i siporeks blok kao jedni od najšire korišćenih građevinskih materijala.



Sl. 7. Postavka mernog seta (siporeks blok, senzor, antenski namotaj, instrument)

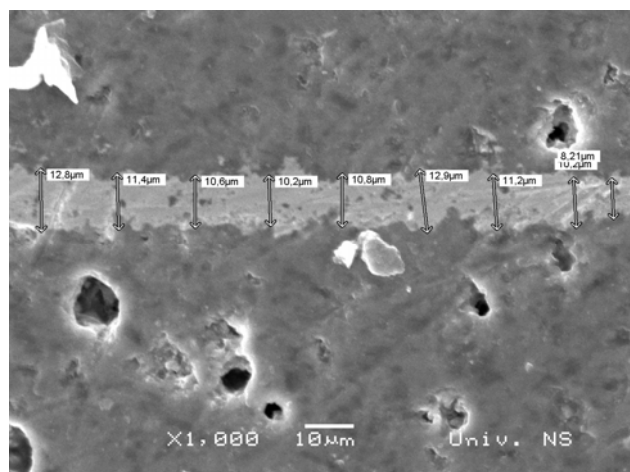
Dielektrična konstanta vode (oko 70 - 80) je znatno veća u poređenju sa dielektričnom konstantom test uzoraka (oko 5), pa povećanje koncentracije vode (odnosno vlage) u uzorcima uslovljava povećanje kapacitivnosti interdigitetnog kondenzatora, što povlači smanjenje rezonantne frekvencije senzora u skladu sa dobro poznatom jednačinom:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1)$$

gde je f_0 rezonantna frekvencija kola, a L i C induktivnost induktivnog i kapacitivnost kondenzatorskog dela senzora, respektivno. Test uzorci su potapani u vodu u dubinu približno 10 mm, i na taj način su upijali vlagu par dana dok ne uđu u zasićenje. Nakon toga je sledio proces sušenja i merenja težine uzoraka (vrlo preciznom vagom) kao i merenje rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora, u određenim vremenskim intervalima.

Na slici 8 prikazan je izgled poprečnog preseka LC senzora proizvedenog u LTCC tehnologiji. U sredini se može uočiti provodni sloj srebra (debljine oko 10 μm) u kome su

realizovani L i C deo senzora, a ispod i iznad se nalazi dielektrična traka debljine 300 μm .

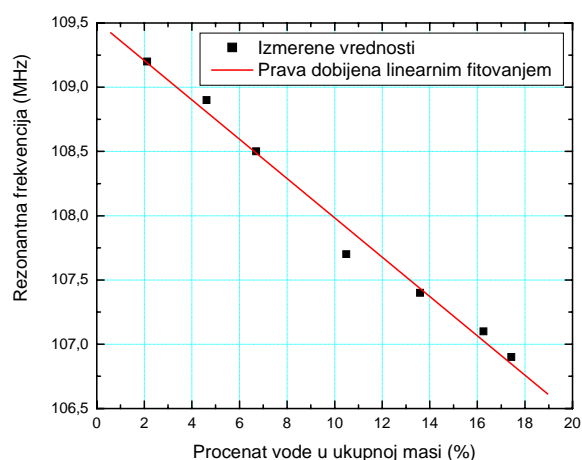


Sl. 8. SEM slika poprečnog preseka senzora

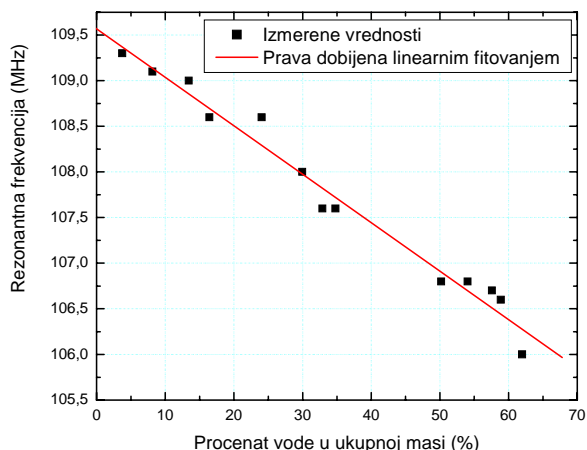
7. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 9 prikazana je zavisnost merene rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora u funkciji sadržaja vode u glinenoj cigli. 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).

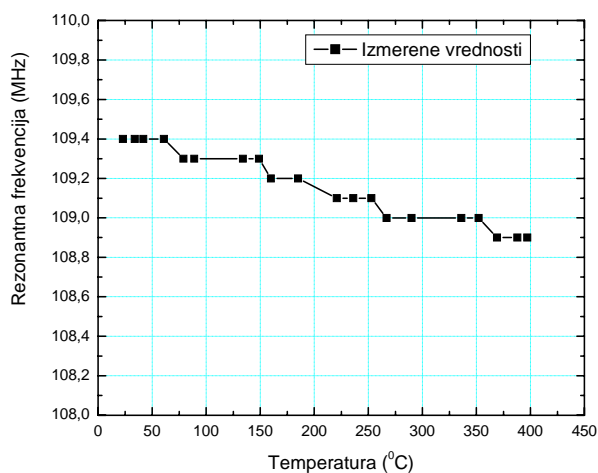
Zavisnost rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora od sadržaja vode u siporeks bloku je prikazana na slici 10. Sa slike se može uočiti da se rezonantna frekvencija menja u opsegu od 109,2 MHz (slika 7) do 106 MHz, a procenat koncentracije vode rasponu od 2 % do 62 %. Ukupna promena rezonantne frekvencije je 3,3 MHz, a promena koncentracije vode je ukupno 60%.



Sl. 9. Zavisnost rezonantne frekvencije senzora od koncentracije vode u glinenoj cigli



Sl. 10. Zavisnost rezonantne frekvencije senzora od koncentracije vode u siporeks bloku



Sl. 11. Zavisnost rezonantne frekvencije senzora od temperature

Siporeks blok ima znatno veću moć upijanja vlage za razliku od klasične glinene cigle, zahvaljujući svojoj poroznoj unutrašnjoj strukturi. Takođe je važno napomenuti da se eksperimentalno dobijena rezonantna frekvencija slaže sa simuliranom vrednošću koja je data u tabeli 1 (za senzor koji nije izložen dejstvu vlage).

Građevinski materijali su tako napravljeni da mogu da izdrže različite uticaje sredine i spoljašnjih uslova kojima su izloženi. Među ovim promenljivim parametrima svakako spada i temperatura na koju građevinski materijali treba da izdržavaju postojanost. Predstavljeni senzor u ovom radu takođe može da izdrži znatne promene temperature, zahvaljujući LTCC tehnološkom procesu u kome je realizovan. Zbog toga smo senzor izložili značajnim promenama temperature (u specijalno dizajniranoj peći), da bi utvrdili koliko se menja rezonantna učestanost samog senzora pri promeni temperature okoline. Zavisnost rezonantne frekvencije bežičnog LC senzora u funkciji

temperature okoline prikazana je na slici 11. Sa slike se može videti da se rezonantna frekvencija menja u opsegu od 109,4 MHz do 108,9 MHz, pri promeni temperature u opsegu od 25 °C do 400 °C. Dakle sa povećanjem temperature rezonantna frekvencija neznatno opada, i ukupna promena je oko 0,5 MHz odnosno 0,45 %. Može se zaključiti da je još jedna dobra strana predstavljenog senzora postojanost njegovih performansi sa promenom temperature okoline.

8. ZAKLJUČAK

Merenje i praćenje sadržaja vode je veoma važno za građevinske materijale i konstrukcije, jer veliki sadržaj vode može da ubrza njihovu degradaciju. U ovom radu je predstavljen, bežični, pasivni senzor za praćenje sadržaja vode, opisan je njegov inovativni dizajn, fabrikacija u LTCC tehnologiji, kao i eksperimentalni rezultati. Senzor se sastoji od paralelne veze induktor-interdigitetni kondenzator koji su izrađeni u jednom provodnom sloju srebra. Rezonantna frekvencija senzora je srazmerna sadržaju vode u građevinskim materijalima, i u ovom radu je pokazano da se predloženi bežični LC senzor može uspešno koristiti za praćenje sadržaja vode u materijalima kao što su glinena cigla i siporeks blok. Kontinualno 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.

LITERATURA

- [1] D. Inaudi, B. Glisic, S. Vurpillot, "Packaging interferometric sensor for civil structural monitoring" - 13th International Conference on Optical Fiber Sensors, Kyongju, Korea, 1999.
- [2] K. Soga, R. Cipolla, P. Bennett, A. Seshia, C. Middleton, I. Wassell, F. Stajano, N. Hoult, "Intelligent city - sensors for monitoring civil engineering infrastructure" - CambridgeSens, 28th October 2008.
- [3] 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 Sensors Journal*, vol. 8, no. 12, pp. 2053-2058, 2008.
- [4] www.gradimo.hr
- [5] M. Popović, "Senzori tečnosti i gasova", Viša elektrotehnička Škola, Beograd, 1999.
- [6] www.comsol.com
- [7] M. Maksimović, "Razvoj senzora i primjena bežičnih senzorskih mreža u savremenoj poljoprivredi i zaštiti životne sredine" – Magistarski rad, Istočno Sarajevo, 2009.
- [8] www.heraeus.com