

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU  
ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA U BEOGRADU**

Na svojoj 763. sednici od 11.6.2013. god. Veće nas je imenovalo za članove Komisije za pregled i ocenu magistarskog rada Ivane Jokić, pod naslovom "**Primena MEMS komponenti u bežičnim telekomunikacionim sistemima i uticaj adsorpciono-desorpcionih procesa na performanse rezonantnih RF MEMS komponenti**". Nakon pregleda ovog rada imamo čast da Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta podnesemo sledeći

**IZVEŠTAJ**

**BIOGRAFSKI PODACI O KANDIDATU**

Ivana Jokić je rođena 30.7.1972. godine u Beogradu. Završila je Matematičku gimnaziju u Beogradu. Diplomirala je 2000. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na smeru Telekomunikacije, sa prosečnom ocenom 9.23 na studijama i ocenom 10 na diplomskom ispitu. Položila je sve ispite na poslediplomskim studijama na ETF-u u Beogradu, sa prosečnom ocenom 10.00.

Od 2001. godine radi kao istraživač u Institutu za hemiju, tehnologiju i metalurgiju Univerziteta u Beogradu, u Centru za mikroelektronske tehnologije. Bavi se istraživanjem i razvojem senzora i drugih naprava zasnovanih na mikro- i nanoelektromehaničkim sistemima (MEMS i NEMS), matematičkim modeliranjem i analizom mehanizama šuma kod MEMS i NEMS oscilatora i senzora, analizom dinamičkog ponašanja MEMS i NEMS komponenti, kao i karakterizacijom MEMS i NEMS struktura i komponenti. Autor je ili koautor 53 naučna rada objavljena u međunarodnim časopisima sa SCI liste ili u zbornicima međunarodnih i nacionalnih konferencija iz oblasti MEMS, NEMS, nanotehnologija i telekomunikacija, kao i 12 tehničkih rešenja.

**OSNOVNI PODACI O RADU**

Rad sadrži 149 stranica teksta sa 68 slika i 7 tabela. Rad je podeljen u pet glava, gde je poslednja glava zaključak. Na kraju rada su dati spisak korišćene literature i spisak skraćenica korišćenih u radu.

**ANALIZA RADA**

Razvoj bežičnih telekomunikacija podrazumeva uvođenje novih sistema, telekomunikacionih standarda i servisa. Od novih generacija mobilnih terminala se očekuje mogućnost korišćenja u većem broju frekvencijskih opsega (*multiband*) i prema većem broju standarda (*multistandard*), što dovodi do značajnog porasta složenosti radiofrekvencijskog (RF) dela primopredajnika, koji sadrži analogna kola i pasivne komponente. Smanjenje dimenzija mobilnih terminala, uz istovremeno uvođenje novih funkcija, postizano je zahvaljujući skaliranju tehnologija integrisanih kola, a RF komponente koje nisu monolitno integrisane postale su ograničavajući faktor dalje minijaturizacije. Takođe, pošto je dodavanje zasebnih RF primopredajnika za svaki novi opseg i standard postalo neodrživo, neophodno je uvođenje rekonfigurabilnosti sklopova. Istovremeno ispunjavanje specifikacija većeg broja standarda i dalje povećanje stepena integracije analognog RF dela veliki je izazov za tradicionalne mikroelektronske tehnologije. Ograničenja ovih tehnologija onemogućuju realizaciju potpuno integrisanih rekonfigurabilnih *multiband multistandard* primopredajnika na sadašnjem nivou razvoja.

Primena MEMS tehnologija za RF komponente i sklopove omogućuje prevazilaženje pomenutih ograničenja mikroelektronskih tehnologija, nudeći nove mogućnosti za realizaciju rekonfigurabilnih RF kola visokih performansi. Druga važna prednost je kompatibilnost sa postojećim poluprovodničkim tehnologijama. Zahvaljujući tome moguća je integracija RF MEMS komponenti sa aktivnim elektronskim sklopovima, čime se postiže nov nivo minijaturizacije RF primopredajnika uz ostvarenje visokih performansi. Od primene RF MEMS tehnologija se očekuje pojednostavljenje primopredajnika nove generacije *multiband multimode* mobilnih terminala, smanjenje potrošnje energije i cene.

Predmet ovog rada je sistematizacija dosadašnjih saznanja i rezultata ostvarenih u oblasti RF MEMS komponenti za bežične telekomunikacije, koja pruža uvid u mogućnosti RF MEMS tehnologija i ukazuje na istraživanja koja je potrebno sprovesti u cilju optimizacije parametara ovih komponenti prema zahtevima savremenih i budućih bežičnih sistema. Poseban značaj u tom smislu ima analiza mehanizama generisanja šuma kod RF MEMS komponenti i razvoj teorijskih modela karakterističnih šumova, što je takođe predmet ovog rada.

U Glavi 1 je dat prikaz MEMS tehnologija koje omogućuju izradu različitih komponenti i struktura od interesa za mnoge tehničke oblasti, uključujući i telekomunikacije.

U Glavi 2 su razmotrene mogućnosti i ograničenja danas vodeće CMOS tehnologije za realizaciju potpuno integrisanih primopredajnika savremenih mobilnih terminala. Dat je pregled postojećih rešenja za povećanje stepena integracije, koja obuhvataju različite arhitekture, načine integracije aktivnih i pasivnih komponenti, kao i načine integracije sklopova RF *front-end*-a kod *multiband multimode* terminala. Sagledane su prepreke koje na današnjem tehnološkom nivou ograničavaju stepen integracije RF analognog dela primopredajnika, a time i minijaturizaciju, pouzdanost, smanjenje cene i potrošnje energije. Kao jedan od glavnih problema identifikovan je porast broja RF filtera, dupleksera, preklopnika i kola za prilagođenje impedanse sklopova u svakoj sledećoj generaciji mobilnih terminala, koji prati porast broja frekvencijskih opsega i podržanih standarda. Ukazano je na potrebu za novim rešenjima na nivou arhitekture primopredajnika, tehnologija izrade i dizajna RF komponenti i sklopova.

Glava 3 sadrži pregled RF MEMS komponenti za primenu u bežičnim terminalima. Prikazani su dosadašnji rezultati i aktuelno stanje nauke i tehnike u toj oblasti. Za svaku vrstu komponenti (preklopnici, rezonatori, kalemovi i podesivi kondenzatori) data je klasifikacija, opisan je princip rada, navedene su vrednosti osnovnih parametara

potrebne za primenu u bežičnim primopredajnicima, tipične ostvarene vrednosti parametara, kao i prednosti i nedostaci u odnosu na konvencionalna rešenja. Takođe je ukazano na potrebna poboljšanja i pravce budućih istraživanja u cilju optimizacije parametara RF MEMS komponenti.

Za primenu RF MEMS komponenti u telekomunikacijama veliki značaj ima njihov šum. U Glavi 4 je dat pregled najznačajnijih mehanizama generisanja šuma, koji su karakteristični za MEMS i NEMS komponente i sisteme. Zatim je prikazana analiza adsorpciono-desorpcionog (AD) faznog šuma, koji može biti dominantan kod RF MEMS i NEMS rezonatora, a utiče na fazni šum lokalnih oscilatora, generatora takta, referenci učestanosti i drugih sklopova primopredajnika. Dato je izvođenje teorijskog modela faznog šuma prouzrokovanog stohastičkim AD procesom kada rezonator funkcioniše u atmosferi homogenog sastava, a zatim i u atmosferi proizvoljnog sastava. Prikazani su rezultati kvantitativne analize, dobijeni korišćenjem izvedenih teorijskih modela. Diskusija rezultata, data na kraju Glave 4, sadrži zaključke o zavisnosti AD faznog šuma od dimenzija rezonatora i radnih uslova, koji su osnova za razvoj metode za minimizaciju šuma RF MEMS i NEMS rezonatora.

Glava 5 je zaključak. U njemu je kandidat dao zbirni pregled osnovnih doprinosa i naveo mogućnosti daljeg istraživanja u ovoj oblasti.

## ZAKLJUČAK I PREDLOG

Magistarski rad Ivane Jokić sadrži detaljni pregled dosadašnjih rezultata i aktuelnog stanja razvoja RF MEMS tehnologija i komponenti za primenu u bežičnim telekomunikacijama. Kao glavne prednosti RF MEMS u odnosu na konvencionalne komponente navedene su mogućnosti za realizaciju rekonfigurabilnih RF kola visokih performansi i integracije sa CMOS kolima primopredajnika. Generalni trend smanjivanja dimenzija MEMS struktura praćen je porastom šuma komponenti, što zahteva detaljnu analizu. Nakon razmatranja mehanizama generisanja šuma karakterističnih za MEMS i NEMS, prikazano je teorijsko modelovanje šuma koji je posledica neizbežnih stohastičkih adsorpciono-desorpcionih procesa. Važan rezultat su izvedeni analitički izrazi za spektralnu gustinu snage AD faznog šuma. Na osnovu sprovedene kvantitativne analize zaključeno je da nivo AD faznog šuma raste sa porastom rezonantne učestanosti (a time i sa smanjenjem dimenzija) rezonatora. Primećeno je da ovaj šum ima malu vrednost pri pritiscima bliskim atmosferskom, ali da postaje značajan na nižim pritiscima, čije vrednosti odgovaraju tipičnim radnim pritiscima u atmosferi koja okružuje MEMS rezonator. Analiza je pokazala da sastav smeše gasova u okruženju rezonatora utiče na nivo faznog šuma.

Osnovni naučno-stručni doprinosi izloženi u ovom magistarskom radu su sledeći:

- Dat je vrlo detaljan pregled i sistematizacija dosadašnjih saznanja i rezultata u oblasti RF MEMS tehnologija, koji pored klasifikacije RF MEMS komponenti i opisa principa rada sadrži kritički osvrt na do sada ostvarene performanse ovih komponenti i sugestije za dalja poboljšanja. Smernice za buduća istraživanja odnose se, pre svega, na optimizaciju parametara RF MEMS komponenti prema zahtevima sadašnjih i budućih mobilnih sistema;
- Detaljnom pregledom RF MEMS tehnologije, koja je u svetu izuzetno aktuelna a do sada je retko bila istraživana u Srbiji, kao i njenih potencijala, stvara se osnova i daje podsticaj za razvoj ove nove i perspektivne istraživačke oblasti u domaćoj nauci;
- Izvedeni su teorijski modeli, od kojih je model AD šuma rezonatora u atmosferi proizvoljnog sastava originalni doprinos autora. Na osnovu rezultata sprovedenih istraživanja, značajno je unapređeno znanje o AD šumu kod MEMS/NEMS struktura, uključujući i RF komponente.

Smatramo da su dobijeni rezultati i izvedeni zaključci značajni. Oni ukazuju na potencijal RF MEMS tehnologija za realizaciju visokointegriranih *multiband multistandard* mobilnih terminala, ali i na istraživanja koja je potrebno sprovesti da bi se omogućila šira primena RF MEMS komponenti. Razvijeni teorijski modeli imaju praktični značaj, jer omogućuju procenu doprinosa faznog AD šuma ukupnom šumu RF MEMS/NEMS rezonatora, procenu njegovog uticaja na performanse na nivou celog sistema, zatim optimizaciju dizajna komponenti i radnih uslova u cilju minimizacije šuma, kao i razvoj novih metoda za minimizaciju šuma. Kandidat je u vezi sa ovom oblašću kao koautor objavio 5 radova u časopisima sa SCI liste (kategorije M21), od kojih je magistarskom radu tematski najbliži: Z. Djurić, I. Jokić, M. Frantlović, O. Jakšić, "Fluctuations of the number of particles and mass adsorbed on the sensor surface surrounded by a mixture of an arbitrary number of gases", *Sensors and Actuators B* 127 (2007) 625-631.

Na osnovu izloženog, članovi Komisije sa zadovoljstvom predlažu Nastavno-naučnom veću ETF u Beogradu da rad Ivane Jokić, pod naslovom "**Primena MEMS komponenti u bežičnim telekomunikacionim sistemima i uticaj adsorpciono-desorpcionih procesa na performanse rezonantnih RF MEMS komponenti**", prihvati kao magistarski rad i da kandidate odobri usmenu odbranu rada.

U Beogradu, 18.6.2013.

Članovi komisije,

Dr Miroslav L. Dukić, Red. profesor ETF,

Dr Predrag Ivaniš, Docent ETF,

Dr Dušan Nešić, Naučni saradnik (IHTM),

Dr Zoran Đurić, Naučni savetnik, red. član SANU