

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Душана Грујића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5040/07-2, донетој на 768. седници одржаној 5.11.2013. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Душана Грујића под насловом

Методи пројектовања монолитних микроталасних интегрисаних кола предвиђених за рад са сигнаима учестаности око 60 GHz

односно под насловом на енглеском

Design of Monolithic Microwave Integrated Circuits for 60 GHz Band

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала, као и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Душан Грујић уписао се школске 2007/2008. године на докторске академске студије, студијски програм Електротехника и рачунарство, модул Електроника. Пријаву докторске дисертације под насловом „Методи пројектовања монолитних микроталасних интегрисаних кола предвиђених за рад са сигнаима учестаности око 60 GHz“ поднео је 22.5.2012. године. На седници Комисије за студије трећег степена Електротехничког факултета у Београду (у даљем тексту: ЕТФ) констатовано је да је Душан Грујић пријавио докторску дисертацију под наведеним насловом, и у складу са Правилником о докторским студијама, Наставно-научном већу је предложена Комисија за оцену услова и прихватање теме у саставу: др Лазар Сарановац, ванредни професор ЕТФ, др Јелена Поповић Божовић, доцент ЕТФ, др Мирјана Виденовић Мишић, доцент, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, и др Радивоје Ђурић, доцент ЕТФ. За ментора дисертације је предложен др Лазар Сарановац, ванредни професор, ЕТФ. На седници Наставно-научног већа ЕТФ одржаној 29.5.2012. године прихваћен је предлог Комисије за студије трећег степена и потврђена предложена Комисија за оцену услова и прихватање теме, као и предложени ментор. На основу извештаја Комисије и пратеће документације, предложена тема је прихваћена на седници Наставно-научног већа

одржаној 25.9.2012. године, а 22.10.2012. године прихваћена је и на Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду. Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 17.10.2013. године, а Наставно-научно веће је 5.11.2013. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: др Лазар Сарановац, ванредни професор ЕТФ, др Антоније Ђорђевић, редовни професор, ЕТФ, др Мирјана Виденовић Мишић, доцент, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, др Јелена Поповић Божовић, доцент ЕТФ, др Милан Илић, ванредни професор ЕТФ.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација се бави поступцима пројектовања монолитних микроталасних интегрисаних кола предвиђених за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz, који узимају у обзир технолошка ограничења и њихов утицај на перформансе. У ширем смислу дисертација припада научној области Техничких наука – електротехнике, а у ужем смислу области Електроника. За ментора докторске дисертације одређен је др Лазар Сарановац, ванредни професор Електротехничког факултета у Београду, због својих значајних доприноса у области примењене електронике.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Душан Грујић је рођен у Београду, Република Србија, 22.10.1981. године. Основну школу и гимназију је завршио у Пожаревцу. Школовање је наставио на Електротехничком факултету у Београду, на смеру за Електронику. Поред редовних обавеза на основним студијама, кандидат је био ангажован и на другим активностима на факултету и ван њега. У току школске 2003/04. године био је ангажован као студент демонстратор у Лабораторији за електронику. Учествовао је на пројекту студентске беспилотне летелице ЕМА UAV, где је развијао алгоритме и хардверску имплементацију QR декомпозиције матрице за примену у Калмановом филтру за фузију сензорских података навигационе јединице, који су резултовали дипломским радом. Током 2005. године радио је на изради дипломског рада на Universidad Politécnica de Madrid у оквиру Темпус пројекта. Дипломирао је 2006. године са просечном оценом 8,60 и дипломским радом на тему „FPGA имплементације QR декомпозиције матрице“. Током студија радио је као млађи и стручни сарадник, а касније и као руководиоца програма Примењене физике и електронике у Истраживачкој станици Петница у Ваљеву.

Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, смер Електроника, уписао је школске 2007/08. године са почетком студијске године у пролећном семестру. Редовно трајање студија му се завршава почетком пролећног семестра школске 2013/14. године. У току докторских студија са оценама 10 положио је следеће предмете: Одабрана поглавља из аналогне електронике, Одабрана поглавља из дигиталне обраде сигнала, Микроталасна електроника, Наменске сензорске мреже, Микроталасна техника, Одабрана поглавља из енергетске електронике, Пројектовање интегрисаних кола и система, Пројектовање наменских рачунарских система, Фазно синхронисане петље и Увод у научни рад. Такође је одрадио следеће обавезе: Студијски истраживачки рад I, Студијски истраживачки рад II и Научно стручни рад. На основу тога одобрена му је израда докторске тезе под насловом „Методи пројектовања монолитних микроталасних интегрисаних кола предвиђених за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz“.

Професионалну каријеру започео је у априлу 2007. године у фирми TES Electronic Solutions GmbH у Штутгарту, Немачка, а од 2008. до 2013. године у испостави у Београду. У оквиру свог ангажовања у TES-у радио је на развоју и пројектовању више од 15 аналогних и RF/микроталасних интегрисаних кола високих перформанси у CMOS и BiCMOS процесима, за употребу у комерцијалним и професионалним уређајима. Од

априла 2013. године ради у фирми novelIC, у којој је један од оснивача, на позицији техничког директора за аналогни и RF дизајн.

Паралелно са професионалном, кандидат је активан и у академској каријери у оквиру које је објавио по два рада у врхунским међународним часописима и међународним конференцијама, као и три рада на домаћим конференцијама. Учествовао је у изради дипломских и мастер радова рађених на Електротехничком факултету у Београду, Електронском факултету у Нишу и Факултету техничких наука у Новом Саду. Кандидат је био ангажован као екстерни рецензент међународне конференције XXVI IEEE International Conference on Computer Design – ICCD 2008, Lake Tahoe, California. Од 2011. године ангажован је као рецензент врхунских међународних часописа IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques и IEEE Microwave and Wireless Components Letters. Члан је међународног удружења инжењера електротехнике IEEE у својству пуноправног члана.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је написана на српском језику на 171 страни. Садржи 6 поглавља, 125 слика, 6 табела и листу од 143 референце. Наслови појединих поглавља дисертације су:

1. Увод,
2. Утицај технолошких ограничења на поступак пројектовања и перформансе,
3. Пројектовање појачавача снаге,
4. Пројектовање малошумног појачавача,
5. Пројектовање делитеља учестаности и
6. Закључак.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Мотив истраживања кандидата у области монолитних микроталасних интегрисаних кола (ММИК), и њихова комерцијална, индустријска, медицинска и безбедносна примена, приказани су у првом поглављу. Приказани су недостаци постојећих методологија пројектовања и значај утицаја технолошких ограничења на поступак пројектовања и оствариве перформансе. Такође је дат сажет приказ преосталих поглавља дисертације.

У другом поглављу је разматран утицај технолошких ограничења на поступак пројектовања и перформансе ММИК-а. Презентовани су квалитативни и квантитативни показатељи утицаја технолошких ограничења и смернице нове методологије пројектовања за контролисани утицај технолошких ограничења на перформансе.

Нова методологија, која узима у обзир технолошка ограничења и расподељеност параметара у интегрисаном колу, није подржана од стране постојећих софтверских алата. Стога је потребно користити комбинацију постојећих алата, симулатора електричних кола и електромагнетских симулатора, и спојити их у јединствени модел који тачно описује интегрисано коло на веома високим радним учестаностима. Радна учестаност интегрисаних кола приказаних у тези је око 60 GHz. Примена нове методологије је показана на примерима пројектовања појачавача снаге, малошумног појачавача и делитеља учестаности, који су саставни део сваког система за бежични пренос података.

У трећем поглављу приказан је поступак пројектовања два појачавача снаге за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz. У току пројектовања примењена је нова

методологија која узима у обзир технолошка ограничења. Приказан је метод партиционисања електромагнетског модела интегрисаног кола на глобално и локално повезивање, која распреже поступке пројектовања и оптимизације мрежа за прилагођење и локалног повезивања компонентни. Партиционисање електромагнетског модела значајно редукује потребне рачунарске ресурсе за симулацију, уз очување тачности модела и увида у компромисе које је могуће направити. Одлично слагање резултата симулације и мерења фабрикованих кола потврђује исправност нове методологије, као и значај утицаја локалног повезивања на перформансе. Приказан је пример коришћења пројектованог појачавача снаге у бежичном комуникационом систему у 60 GHz-ом опсегу учестаности, за пренос података брзином од 2 Gb/s.

Четврто поглавље је посвећено пројектовању малошумног појачавача за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz. Применом нове методологије идентификовани су механизми губитака, као што су губици стопице за повезивање изнад проводног супстрата и вртложне струје у металу за попуњу, који би значајно деградирани фактор шума. Постојеће методологије не би узимале у обзир поменуте механизме губитака, услед чега би фактор шума појачавача био значајно већи од очекиваног. Поступак пројектовања је прилагођен технолошким ограничењима и добијене су предвидиве перформансе. Приказани су резултати мерења фабрикованог малошумног појачавача и два примера примене у бежичним комуникационим системима у 60 GHz-ом опсегу учестаности, за пренос података брзином од 2 и 3.5 Gb/s.

У петом поглављу приказан је поступак пројектовања широкопојасног делитеља учестаности. Пројектовани делитељ учестаности се може користити у опсегу од 30 до 67 GHz, тако да је погодан за примене у хомодиним и хетеродиним комуникационим системима. Приказани су резултати мерења фабрикованог делитеља учестаности.

У последњем, шестом поглављу дата су закључна разматрања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Комуникациони системи за бежични пренос података су све већег капацитета, уз истовремено повећање броја корисника. Дугорочно решење за повећање капацитета и броја корисника се налази у преласку на више радне учестаности, од 30 до 300 GHz, који се назива и милиметарски опсег. За комерцијалне примене, од посебног интереса је опсег учестаности око 60 GHz, који је предвиђен за нелиценцирану употребу широм света. Пројектовање интегрисаних кола за рад у милиметарском опсегу је од значаја услед великог комерцијалног потенцијала. Скалирање технологија је омогућило интеграцију система који раде у милиметарском опсегу у стандардним процесима, али је истовремено увело и технолошка ограничења која могу у значајној мери деградирати перформансе система. Уобичајене методологије пројектовања, подржане у стандардним софтверским алатима, не узимају у обзир технолошка ограничења и њихов утицај.

Предмет истраживања дисертације је методологија пројектовања интегрисаних кола за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz, која узима у обзир технолошка ограничења и расподељеност параметара у интегрисаном колу. Недостатак подршке за пројектовање интегрисаних кола у оквиру стандардних софтверских алата превазиђен је комбинацијом постојећих алата. Утицај технолошких ограничења на перформансе кола представљен је квалитативно и квантитативно, а представљене су и модификације поступка пројектовања спроведене да би се добиле предвидиве перформансе. Валидност нове методологије је демонстрирана пројектовањем појачавача снаге, малошумног појачавача и широкопојасног делитеља учестаности, који су саставни део сваког комуникационог система.

Пројектовање интегрисаних кола за рад у милиметарском опсегу учестаности је предмет истраживања на престижним универзитетима и у фирмама. Актуелност теме се може видети и на основу броја објављених радова у врхунским међународним часописима на тему кола и система за рад у 60 GHz-ом опсегу учестаности. Методологија пројектовања интегрисаних кола за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz је у том смислу веома актуелна и савремена.

Оригиналношћу дисертације се огледа у новој методологији пројектовања, која узимањем у обзир технолошких ограничења и комбинацијом постојећих софтверских алата, пружа предвидиве перформансе. Узимањем у обзир технолошких ограничења идентификовани су сви механизми губитака, које стандардне методологије занемарују. Занемаривање губитака може резултовати неочекиваном деградацијом перформанси, односно непоузданим резултатима симулације. Показано је да се партиционисањем електромагнетског модела интегрисаног кола значајно редукују потребни рачунарски ресурси за симулацију, уз очување тачности модела. Одлично слагање резултата симулације и мерења фабрикованих тест чипова је потврда исправности нове методологије.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература дата у списку референци садржи најважније радове из релевантних научних области. Велики број радова је новијег датума, што опет указује на актуелност ове проблематике. На основу обима коришћене литературе може се закључити да је кандидат имао темељан увид у досадашње доприносе у овој и блиским научним областима. Језгро тезе и сви релевантни закључци до којих се у њој дошло, базирани су на научним радовима са рецензијом пре свега у реномираним и врхунским међународним часописима као што су *IEEE Journal of Solid State Circuits* и *IEEE Transactions on Microwave Technology and Techniques*. Део референци упућује и на радове на најзначајнијим међународним конференцијама где се радови из области којом се бави дисертација најчешће и публикују.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научни метод примењене у оквиру ове дисертације су дедукција, демонстрација и експериментална евалуација.

1. Извршена је идентификација релевантне литературе, прикупљање и обрада информација, као и дефинисање недостатака постојећих методологија пројектовања интегрисаних кола. Анализом технолошких ограничења савремених технологија производње интегрисаних кола, и њихових утицаја на перформансе, дефинисана је методологија пројектовања која резултује предвидивим перформансама кола у милиметарском опсегу.
2. Нова методологија пројектовања је примењена на пројектовање појачавача снаге и малощумног појачавача за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz, као и широкопојасног делитеља учестаности у 0.25 μm SiGe:C BiCMOS процесу произвођача ИП Microelectronics.
3. Пројектована кола су фабрикована и измерена микроталасним сондама на стопицама интегрисаних кола. Извршено је поређење очекиваних и измерених резултата. Одлично слагање очекиваних и резултата мерења су потврда исправности нове методологије.

Комисија констатује да коришћени методи у потпуности одговарају проблему и циљевима докторске дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Стандардне методологије пројектовања интегрисаних кола нису адекватне за милиметарски опсег, пошто не узимају у обзир технолошка ограничења и расподељеност параметара у чипу. Недостатак подршке у оквиру софтверских алата је такође захтевао развој нове методологије. Нова методологија је директно применљива на поступак пројектовања интегрисаних кола у милиметарском опсегу, пошто узима у обзир технолошка ограничења савремених технологија и тиме омогућава добру корелацију резултата симулације и мерења.

Развијена методологија пројектовања ММИК-а је примењена на пројектовање саставних делова бежичног комуникационог система у 60 GHz-ом опсегу учестаности. Пројектовани појачавачи снаге и малошумни појачавачи су коришћени у комуникационом линку за пренос података брзином од 2 Gb/s у 60 GHz-ом опсегу учестаности. Пројектовани малошумни појачавач је коришћен на Универзитету у Улму у оквиру комуникационог система за пренос података брзином од 3,5 Gb/s.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је показао способност за самостални научни рад, почевши од систематизације и критичког осврта на постојеће методе пројектовања интегрисаних кола, преко уочавања утицаја технолошких ограничења на поступак пројектовања и перформансе, развоја нове методологије пројектовања и практичне примене на пројектовање интегрисаних кола за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz, све до приказивања постигнутих резултата у научним радовима.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Ова дисертација представља први корак у методологији пројектовања ММИК-а за рад у милиметарском опсегу учестаности, у којем технолошка ограничења имају значајног утицаја на перформансе. Њен главни допринос се огледа у развоју нове методологије пројектовања, која узима у обзир технолошка ограничења, и која користи комбинацију постојећих софтверских алата за добијање предвидивих перформанси, односно добро слагање резултата симулације и мерења. Нова методологија представља правац будућег развоја софтверских алата, како би се комплетан поступак пројектовања могао спровести у оквиру истог окружења. Додатни научни допринос се огледа у примени нове методологије на пројектовање саставних делова комуникационог система, који су фабриковани и измерени. Пројектовани блокови су нашли примену у бежичним комуникационим линковима у 60 GHz-ом опсегу, за пренос података брзином од 2 Gb/s и 3.5 Gb/s.

Од три научна рада у вези са докторском дисертацијом, два су објављена у врхунском међународном часопису у области микроталасних интегрисаних кола, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, а један рад је презентован на међународној конференцији *Circuits and Systems for Communications*.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у постављене хипотезе, циљеве истраживања и добијене резултате, може се констатовати да је кандидат успешно одговорио на питања од значаја за решавање проблема дефинисаног предметом истраживања. Наиме, описана метода за пројектовање монолитних микроталасних интегрисаних кола омогућава пројектовање кола са

предвидивим перформансама, пошто узима у обзир сва технолошка ограничења и механизме губитака који проистичу из њих. Ови резултати имају значајну практичну вредност. Увидом у приложу литературу и радове кандидата у међународном часопису, може се закључити да овде приказани метод чини окосницу правца у пројектовању монолитних микроталасних интегрисаних кола, те стога има и значајну научну тежину.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је објавио више радова у вези са темом докторске дисертације, чији су резултати директно ушли у дисертацију или су тесно везани са истраживањем у њој.

Категорија M21:

1. **Grujić, D.**; Savić, M.; Bingöl, C.; Saranovac, L.; "60 GHz SiGe:C HBT Power Amplifier With 17.4 dBm Output Power and 16.3% PAE," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , vol.22, no.4, pp.194-196, April 2012.
2. **Grujić, D.**; Savić, M.; Popović-Božović, J.; "A Power Efficient Frequency Divider for 60 GHz Band," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , vol.21, no.3, pp.148-150, March 2011.

Категорија M33:

1. **Grujić, D.**; Savić, M.; Bingöl, C.; Saranovac, L.; "Wide-bandwidth 60 GHz differential LNA in SiGe:C technology," *Circuits and Systems for Communications (ECCSC), 2010 5th European Conference on* , pp.71-74, Belgrade, Serbia, 23-25 Nov. 2010.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Душана Грујића под насловом „Методи пројектовања монолитних микроталасних интегрисаних кола предвиђених за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz“ у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све битне елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду.

Кандидат Душан Грујић је у току свог образовања на Електротехничком факултету у Београду испунио све обавезе предвиђене Законом и правилима Електротехничког факултета у Београду за израду докторске дисертације. Резултате проистекле током рада на теми докторске дисертације објавио је у два рада у врхунском међународном часопису у области микроталасних интегрисаних кола и презентовао стручној јавности на међународној конференцији.

У дисертацији је дат предлог нове методологије пројектовања монолитних микроталасних интегрисаних кола за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz. Показано је да је новом методологијом, која узима у обзир сва технолошка ограничења, и комбинацијом постојећих софтверских алата, могуће спровести поступак пројектовања монолитног интегрисаног кола тако да се добију предвидиве перформансе и добро слагање резултата симулације и мерења. Такође је показано да се партиционисањем електромагнетског модела интегрисаног кола може очувати тачност симулације, уз значајну редукацију потребних рачунарских ресурса. Поред поменутог научног доприноса, у склопу дисертације су применом нове методологије пројектовани појачавач снаге и малошумни појачавач за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz, као и широкопојасни делитељ учестаности. Ова кола су фабрикована и измерена у циљу потврде исправности

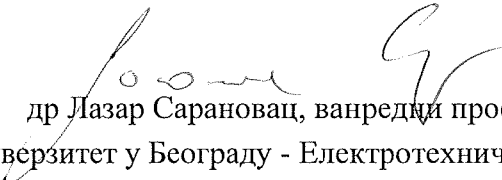
примењене методологије. Комисија констатује да докторска дисертација садржи оригиналан и актуелан научни допринос у домену пројектовања микроталасних интегрисаних кола. Приказани резултати могу имати значајну практичну улогу у развоју нових генерација комуникационих система у милиметарском опсегу.

Комисија сматра да докторска дисертација под насловом „Методи пројектовања монолитних микроталасних интегрисаних кола предвиђених за рад са сигнаlima учестаности око 60 GHz“, кандидата Душана Грујића, садржи оригиналне научне доприносе.

На основу претходног, Комисија констатује да је кандидат Душан Грујић, дипломирани инжењер електротехнике, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду. Са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да овај реферат прихвати, и у складу са законском процедуром, проследи Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

У Београду, 4.12.2013.


ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Лазар Сарановац, ванредни професор,

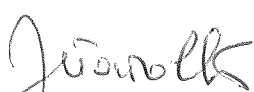
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет


др Антоније Ђорђевић, редовни професор

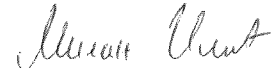
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет


др Мирјана Виденовић Мишић, доцент,

Универзитет у Новом Саду - Факултет техничких наука


др Јелена Поповић Божовић, доцент,

Универзитет у Београду - Електротехнички факултет


др Милан Илић, ванредни професор,

Универзитет у Београду - Електротехнички факултет