

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Миленка Милићевића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације

"Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу",

односно

"Power amplifiers in class A with simultaneous conjugate and large signal power matching at the output port".

Одлуком бр. 5029/12-1 од 22.06.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Миленка Милићевића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под радним насловом "Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјуговано-комплексним и прилагођењем по снази на излазном приступу". Комисија је предложила да се радни наслов теме промени у "Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу".

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата и одржане јавне усмене одбране теме, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Миленко Милићевић је рођен 25.01.1987. године у Олову. Основну школу "Вук Стефановић Караџић" је завршио 2002. године у Власеници, а гимназију "Милорад Влачић" 2006. године такође у Власеници. Уписао је Електротехнички факултет у Београду 2006. године где је дипломирао 2010. године на модулу за електронику са просеком 9,89. Дипломски рад под називом "Развој real-time кернела и објеката кернела за платформу MSP430" је одбранио са оценом 10 под менторством доц. др Ивана Поповића. Године 2010. уписао је мастер студије, такође на Електротехничком факултету у Београду, на модулу Електроника. Једногодишњи мастер програм завршио је 2012. године са просечном оценом 10, а тема мастер рада је била "Пројектовање и оптимизација front-end дела WIMAX пријемника у умереној инверзији", под менторством доц. др Радивоја Ђурића.

Докторске студије је уписао 2012. године на Електротехничком факултету у Београду. Током студирања ментор за студијски истраживачки рад био му је доц. др Радивоје Ђурић. За менторе докторске дисертације предложени су доц. др Душан Грујић и проф. др Лазар Сарановац.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

На докторским студијама Миленко Милићевић је положио следеће предмете:

Назив предмета	оцена	ЕСПБ
1 Микроталасна електроника	10	9
2 Метод коначних елемената у електромагнетици	10	9
3 Наменске сензорске мреже	10	9
4 Одабрана поглавља из аналогне електронике	10	9
5 Увод у научни рад	10	6
6 Микроталасна техника	10	9
7 Електромагнетска компатибилност и интегритет сигнала	10	9
8 Дизајн интегрисаних РФ кола	10	9
9 Фазно синхронисане петље	10	9
10 Одабрана поглавља из енергетске електронике	10	9

и испунио остале обавезе дефинисане студијским програмом за прве две студијске године. Тренутно је трећа година докторских студија. Кандидат је успешно положио испит о подобности теме и кандидата 30.06.2018. године пред комисијом у саставу: др Радивоје Ђурић, доцент Електротехничког факултета у Београду, др Јелена Радић, доцент Факултета техничких наука у Новом Саду, др Милан Илић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду, и др Драган Олћан, ванредни професор Електротехничког факултета у Београду.

Област истраживања Миленка Милићевића обухвата пројектовање аналогних/RF интегрисаних кола као и интегрисаних кола у милиметарском таласном опсегу. За време докторских студија радио је у компанијама на пословима из области свог истраживања.

Досадашњи резултати кандидата приказани су кроз неколико публикација. У даљем тексту је наведен списак публикација на којима је Миленко Милићевић коаутор.

M21:

1. **M. Milićević**, B. Milinković, D. Grujić and L. Saranovac, *Power and Conjugately Matched High Band UWB Power Amplifier*, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2018, у штампи, DOI: 10.1109/TCSI.2018.2815612 .

M23:

1. **M. Milićević**, B. Milinković, Đ. Simić, D. Grujić and L. Saranovac, *Temperature and process compensated RF power detector*, Inf. MIDEA, vol. 46, no. 1, 2016, pp. 24–28.
2. B. Milinković, **M. Milićević**, Đ. Simić, G. Stojanović, R. Đurić, *Low-pass filter for UWB system with the circuit for compensation of process induced on-chip capacitor variation*, Inf. MIDEA, vol. 45, no. 4, 2015, pp. 266–276.

M33:

1. **M. Milićević**, B. Milinković, J. Radić, R. Đurić, *Digitally controlled attenuator*, Proceedings of 24th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, 22-23 November 2016, DOI: 10.1109/TELFOR.2016.7818759.
2. **M. Milićević**, B. Milinković, Đ. Simić, D. Grujić, R. Đurić, *Temperature and Process Compensated Broad Band CMOS RF Power Detector*, 37th International Conference of IMAPS-CPMT Poland, Kraków, 22-25 September 2013, pp. 1-7.

M63:

1. **M. Milićević**, M. Babić, R. Đurić, *Projektovanje jednostruko balansiranog CMOS miksera pretraživanjem prostora dizajna*, Zbornik radova INFOTEH-JAHORINA, Vol. 11, Mart 2012, pp. 41-45.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Дана 30.06.2018. године кандидат Миленко Милићевић је усмено бранио испит о подобности теме и кандидата пред комисијом у саставу: др Радивоје Ђурић, доцент Електротехничког факултета у Београду, др Јелена Радић, доцент Факултета техничких наука у Новом Саду, др Милан Илић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду, и др Драган Олћан, ванредни професор Електротехничког факултета у Београду. Комисија је предложила да се радни наслов теме "Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјуговано-комплексним и прилагођењем по снази на излазном приступу" промени у "Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу". Комисија је једногласно закључила да су кандидат и тема под насловом: "Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу" подобни за израду докторске дисертације на Електротехничком факултету у Београду. За менторе докторске дисертације предложени су др Душан Грујић, доцент Електротехничког факултета у Београду, и др Лазар Сарановац, редовни професор Електротехничког факултета у Београду.

Током писања овог Извештаја, Комисија је узела у обзир све наведене чињенице и резултате досадашњег рада кандидата Миленка Милићевића. Такође су са посебном пажњом размотрена искуства која је стекао, како кроз образовни, тако и кроз истраживачки процес. Кандидат поседује самосталност у истраживању и брзо и ефикасно усваја нова знања. До сада је кандидат положио све испите на докторским студијама са просечном оценом 10.

На основу наведених резултата кандидата, наша је процена да је кандидат Миленко Милићевић способан да успешно изради докторску дисертацију.

2. Предмет и циљ истраживања

Појачавачи снаге конвертују DC снагу у RF снагу. С обзиром на то да је излазна снага обично релативно велика, они у значајној мери учествују у укупној потрошњи комуникационог система. Такође, снага дисипације се претвара у топлоту. Топлота се одводи активним или пасивним хлађењем, што неминовно повећава габарите и цену система. Због свега наведеног, ефикасност је један од основних параметара готово сваког појачавача снаге. Постоји више топологија појачавача за ефикасно појачавање RF сигнала, укључујући појачаваче снаге у класи Б, Ц, Д, Е, Ф, као и њихове варијације

[1-6]. Наведене класе појачавача су нелинеарне, са релативно великим зрачењем ван спектралне маске, те нису погодни за примену у модерним широкопојасним комуникационим системима са спектрално ефикасним дигиталним модулацијама [7]. Уместо њих обично се користе појачавачи снаге у класи А са широким пропусним опсегом и линеарном преносном карактеристиком.

Појачавачи снаге се могу разложити на три саставна дела: улазну мрежу за прилагођење, активну компоненту и излазну мрежу за прилагођење. Мреже за прилагођење имају улогу да трансформишу импедансу генератора и потрошача тако да појачавачка (активна) компонента прими, а затим и преда што је могуће више снаге на улазном односно излазном приступу.

Појачавачи снаге у класи А могу се класификовати у две категорије: појачавачи за мали сигнал и појачавачи за велики сигнал. Главна разлика између њих је у прилагођењу на излазном приступу. Појачавачи за мали сигнал су конјуговано-комплексно прилагођени и обично имају велико појачање снаге, али малу максималну излазну снагу. Са друге стране, појачавачи за велики сигнал прилагођени су тако да у прозору дозвољених излазних напона и струја потрошачу предају максималну снагу. У поређењу са појачавачима за мали сигнал максимална излазна снага им је по правилу већа, али им је појачање снаге нешто мање. Потребно је направити јасну разлику између конјуговано-комплексног прилагођења по снази и прилагођења по снази при великим сигнаlima [8].

Радари и комуникациони системи често нису интегрисани на једном чипу, него се састоје од више међусобно повезаних модула. Примера ради, у апликацијама у којима је потребна велика излазна снага, појачавач снаге се пројектује у GaAs или некој другој технологији треће, четврте или пете генерације, док се остатак система пројектује у силицијуму. CMOS транзистори имају мали прободни напон и не могу обезбедити велику излазну снагу [9-12]. С друге стране, CMOS технологија је релативно јефтина и погодна за реализацију дигиталне логике, као и аналогних и RF компоненти мале снаге. У неким апликацијама користе се екстерни филтри са великим фактором добротe како би се елиминисало нежељено зрачење ван спектралне маске дефинисане стандардом. У оба наведена примера, екстерне компоненте пројектују се тако да раде са конјуговано-комплексним прилагођеним улазним приступом. Ако овај услов није испуњен, губици се повећавају, а фреквенцијски одзив одступа од жељеног. Идеални улазни генератор, са фиксном расположивом снагом, предаје мање снаге у односу на случај када је конјуговано-комплексно прилагођен на потрошач, па самим тим долази до смањења снаге и на излазном приступу.

Како би се избегли поменути недостаци, CMOS појачавач снаге пројектује се тако да буде конјуговано-комплексно прилагођен на излазном приступу. Да би се постигла релативно висока ефикасност, потребно је истовремено обезбедити и прилагођење по снази на излазном приступу. Стандардни појачавач снаге са заједничким сорсом није могуће истовремено конјуговано-комплексно прилагодити и прилагодити по снази за велике сигнале на излазном приступу [8]. Циљ ове дисертације је да се предложи нова топологија појачавача снаге која може превазићи поменуто ограничење, као и да се развије комплетна методологија пројектовања за дату топологију појачавача.

- [1] K. Yang, G. I. Haddad, and J. R. East, *High-efficiency class-A power amplifiers with a dual-bias-control scheme*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, Aug. 1999, pp. 1426-1432.

- [2] W. S. Kopp and S. D. Pritchett, *High efficiency power amplification for microwave and millimeter frequencies*, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest vol.3, June 1989, pp. 857–858.
- [3] F. H. Raab, *Class-F power amplifiers with maximally flat waveforms*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 45, Nov 1997, pp. 2007–2012.
- [4] T. Sowlati, C. A. T. Salama, J. Sitch, G. Rabjohn, and D. Smith, *Low voltage, high efficiency GaAs Class E power amplifiers for wireless transmitters*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 30, Oct 1995, pp. 1074–1080.
- [5] S. Nishiki and T. Nojima, *Harmonic Reaction Amplifier - A Novel High-Efficiency and High-Power Microwave Amplifier*, in 1987 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol. 2, May 1987, pp. 963–966.
- [6] B. Ingruber, W. Pritzl, D. Smely, M. Wachutka, and G. Magerl, *High efficiency harmonic-control amplifier*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, Jun 1998, pp. 857–862.
- [7] S. Voinigescu, *High-Frequency Integrated Circuits*. Cambridge University Press, 1 ed., May 2013.
- [8] C. S. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*. Artech House, 2 ed., May 2006.
- [9] L. E. Larson, *Silicon technology tradeoffs for radio-frequency/mixed-signal systems-on-a-chip*, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 50, pp. 683–699, March 2003.
- [10] E. Johnson, *Physical limitations on frequency and power parameters of transistors*, IRE International Convention Record, vol. 13, March 1965, pp. 27–34.
- [11] J.-S. Rieh, B. Jagannathan, D. Greenberg, G. Freeman, and S. Subbanna, *A doping concentration-dependent upper limit of the breakdown voltage–cutoff frequency product in Si bipolar transistors*, Solid-State Electronics, vol. 48, no. 2, February 2004, pp. 339 – 343.
- [12] H. Wong, *Drain breakdown in submicron MOSFETs: a review*, Microelectronics Reliability, vol. 40, no. 1, January 2000, pp. 3 – 15.

3. Полазне хипотезе

RF појачавач снаге је један од најважнијих елемената сваког комуникационог и радарског система. Истраживачи константно раде на побољшању његових перформанси, што доприноси бољој ефикасности, већем степену интеграције и мањој цени. За појачавач снаге у класи А познате су две методологије пројектовања које се заснивају на избору оптималног оптерећења транзистора како би се постигла (1) максимална излазна снага или (2) максимално појачање снаге [13-15]. У општем случају, та два оптерећења су различита, па самим тим појачавачки транзистор није могуће истовремено прилагодити по оба параметра. Ограничење се може превазићи увођењем додатног степена слободе, у овом случају повратне спреге [16]. Повратном спрегом је могуће подесити излазну импедансу транзистора прилагођеног по снази тако да се постигне истовремено и конјуговано-комплексно прилагођење и прилагођење по снази на излазном приступу. Пројектовање таквог појачавача је врло захтевно јер због утицаја повратне спреге није могуће применити стандардан приступ, где се одвојено пројектују улазно и излазно оптерећење. Међусобни утицај повратне спреге, улазног и излазног оптерећења не може бити занемарен и мора се пажљиво размотрити и уврстити у нову методологију пројектовања.

Пример пројектовања широкопојасног појачавача снаге, као полазну тачку, користи топологију појачавача са заједничким сорсом и дрејн-гејт повратном спрегом. Идеја је да се постигне истовремено конјуговано-комплексно прилагођење и прилагођење по снази за велике сигнале на излазном приступу.

- [13] M. Lajugie, F. Grossier, A. Silbermann, and Y. Bender, *Full Characterization of GaAs Power MESFET and Accurate Load-Pull Contours Prediction*, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, June 1986, pp. 339–342.
- [14] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. Wiley, 4 ed., Nov. 2011.
- [15] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*. Prentice Hall, 2 ed., Aug. 1996.
- [16] Zuo-Min Tsai, Kuo-Jung Sun, G. D. Vendelin, and Huei Wang, *A new feedback method for power amplifier with unilateralization and improved output return loss*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 4, June 2006, pp. 1590–1597.

4. Научне методе истраживања

У оквиру првог дела истраживања биће развијене аналитичке методе пројектовања појачавача снаге, базиране на поједностављеном моделу RF CMOS транзистора. Циљ је да се на основу резултата аналитичких метода формирају почетне вредности пројектних параметара. Наредни корак ће бити развој графичке методе оптимизације са укљученим паразитним елементима транзистора. Овом методом ће се фино подешавати пројектни параметри и припремити коло за завршне нумеричке симулације. Поред стандардних симулатора кола са концентрисаним параметрима, током пројектовања ће бити коришћени и електромагнетски симулатори за прорачун S-параметара и карактеризацију пасивних структура.

На крају, биће дефинисане нове метрике које ће омогућити поређење различитих топологија појачавача имплементираних у истом процесу, као и поређење различитих полупроводничких технологија, све у циљу да се за дате пројектне захтеве може лако и ефикасно одабрати оптимална топологија као и полупроводничка технологија.

5. Очекивани научни допринос

Главни очекивани научни допринос ове дисертације биће развој методологије пројектовања појачавача снаге са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу. Предложена теорија биће верификована на прототипу широкопојасног појачавача снаге у стандардном RF 130 nm CMOS процесу. Очекивани доприноси ове дисертације су следећи:

- Преглед, систематизација и анализа технолошких и тополошких ограничења појачавача снаге у класи A, као и преглед постојећих методологија пројектовања. Анализа кључних параметара конјуговано-комплексно прилагођених појачавача, као и појачавача прилагођених по снази при великим сигнаlima.
- Биће развијена аналитичка методологија пројектовања појачавача снаге са дрејн-гејт повратном спрегом.
- Биће развијена графичка методологија пројектовања појачавача снаге са дрејн-гејт повратном спрегом.
- Направиће се прототип широкопојасног појачавача снаге са дрејн-гејт повратном спрегом у стандардном RF 130 nm CMOS процесу.

6. План истраживања

Планирано је да се истраживање спроведе у три фазе:

- Прва фаза ће обухватити преглед литературе о интегрисаним појачавачима снаге у класи А, детаљну анализу појачавача конјуговано-комплексно прилагођеног на излазном приступу, као и анализу појачавача прилагођеног по снази при великим сигнаlima на излазном приступу. Циљ ове фазе је да се систематизује постојеће знање о конјуговано-комплексном прилагођењу и о прилагођењу по снази при великим сигнаlima, да се уоче предности, недостаци и ограничења различитих прилагођења, као и да се размотри могућност истовременог прилагођења по оба параметра.
- Друга фаза ће обухватити детаљну анализу топологије појачавача снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу. Идеја је да се у овој фази развије генерална методологија пројектовања појачавача снаге са дрејн-гејт повратном спрегом употребом аналитичког и графичког приступа.
- Трећа фаза ће обухватити проверу предложене теорије на примеру пројектовања широкопојасног појачавача снаге са побољшаним излазним прилагођењем. Пројектовани појачавач ће бити реализован у стандардном RF 130 nm CMOS процесу. Провера теоријских резултата ће бити спроведена поређењем резултата добијених симулацијом и мерењима.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, непосредног увида у научни рад и положеног испита о подобности теме и кандидата, Комисија је закључила да кандидат Миленко Милићевић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Електротехничког факултета у Београду за одобрење теме за израду докторске дисертације.

Комисија је предложила да се радни наслов теме "Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјуговано-комплексним и прилагођењем по снази на излазном приступу" промени у "Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу". Предложена тема докторске дисертације кандидата Миленка Милићевића "Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу" је у тренду са глобалним научним кретањима из области интегрисаних појачавача снаге, чији се резултати тренутно објављују у истакнутим међународним часописима. Предложена тема је посебно значајна и интересантна из угла практичне примене.

Кандидат Миленко Милићевић се током свог научноистраживачког и образовног рада бавио темама које спадају у најужу област дисертације. Комисија сматра да континуитет досадашњег научноистраживачког рада као и релевантност пројекта на којима је кандидат био ангажован несумњиво указују на чињеницу да је кандидат

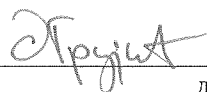
подобан за реализацију предвиђених циљева истраживања.

Научна област дисертације је Електротехника и рачунарство, а ужа научна област је Електроника. За менторе дисертације предлажу се др Душан Грујић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, и др Лазар Сарановац, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

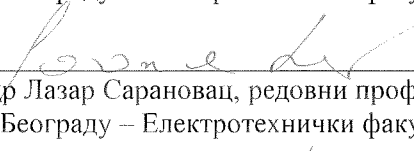
Имајући све претходно у виду, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Миленку Милићевићу одобри израду докторске дисертације "Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу" под менторством др Душана Грујића, доцента Електротехничког факултета у Београду, и др Лазара Сарановца, редовног професора Електротехничког факултета у Београду.

У Београду, 23.08.2018. године

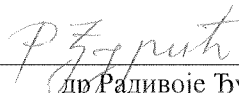
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Душан Грујић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



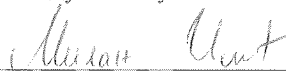
др Лазар Сарановац, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



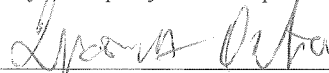
др Радивоје Турић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Јелена Радић, доцент
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука



др Милан Илић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Драган Олћан, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет