

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мастер инжењера електротехнике и рачунарства Миленка Милићевића.

Одлуком Наставно-научног већу Електротехничког факултета у Београду бр. 5029/12-3 од 22.03.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Миленка Милићевића под насловом

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

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Миленко Милићевић уписао је докторске студије у школској 2012/13. години на Електротехничком факултету у Београду, студијски програм Електротехника и рачунарство, модул Електроника.

Тему под насловом „Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу“ пријавио је 30.04.2018. године.

Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог за израду докторске дисертације 05.06.2018. године и предлог комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће именовало је комисију за оцену услова и прихватања теме докторске дисертације (одлука број 5029/12-1 од 22.06.2018. године) 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. За менторе су предложени др Душан Грујић, доцент Електротехничког факултета у Београду, и др Лазар Сарановац, редовни професор Електротехничког факултета у Београду.

Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације на Електротехничком факултету у Београду одржана је 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. Комисија је закључила да кандидат Миленко Милићевић на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације добио оцену „задовољно“. Комисија је заједно са предложеним менторима докторске дисертације поднела Извештај о оцени подобности теме и кандидата.

Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (одлука број 1955/6 од 14.09.2018. године).

Веће научних области техничких наука у Београду је на седници одржаној 24.09.2018. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу“ (одлука број 61206-4049/2-18 од 24.09.2018. године) и за менторе предложени су др Душан Грујић, доцент Електротехничког факултета у Београду и др Лазар Сарановац, редовни професор Електротехничког факултета у Београду.

Кандидат је 18.02.2019. године предао урађену докторску дисертацију на преглед и оцену.

Комисија за студије трећег степена је 05.03.2019. године потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће је 12.03.2019. године именовало комисију за преглед и оцену докторске дисертације (одлука број 5029/12-3 од 22.03.2019. године) у саставу: др Душан Грујић, доцент Електротехничког факултета у Београду, др Лазар Сарановац, редовни професор Електротехничког факултета у Београду, 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.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација се бави поступцима пројектовања појачавача снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу. У ширем смислу дисертација припада научној области Техничких наука-електротехнике, а у ужем смислу области Електронике. За менторе докторске дисертације одређени су др Душан Грујић, доцент Електротехничког факултета Универзитета у Београду, и др Лазар Сарановац, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, због својих значајних доприноса у области примењене електронике и пројектовања интегрисаних кола.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Миленко Милићевић је рођен 25.01.1987. године у Олову. Основну школу "Вук Стефановић Караџић" је завршио 2002. године у Власеници, а гимназију "Милорад Влацић" 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.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је написана на српском језику на 130 страна. Садржи 5 поглавља, 103 слике, 5 табела и листу од 117 референци. Наслови појединачних поглавља дисертације су:

1. Увод,
2. Преглед литературе и основних појмова за појачавач снаге у класи А,
3. Појачавач снаге са конјуговано-комплексним и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазом приступу,
4. Пример пројектовања појачавача снаге са дрејн-гејт повратном спрегом и
5. Закључак.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Мотив истраживања кандидата у области појачавача снаге, и њихова примена у индустријским и безбедносним системима, приказани су у првом поглављу. Приказане су различите технологије израде појачавача снаге, почев од цевних техника па до најсавременијих полупроводничких процеса. Такође, дат је сажет приказ преосталих поглавља дисертације.

Друго поглавље је посвећено основним појмовима о појачавачима снаге у класи А. Дате су дефиниције различитих типова прилагођења примењивих у савременим радарским и комуникационим системима. Разматране су мреже за прилагођење и њихова теоретска ограничења у широкопојасним системима. Изложен је поступак пројектовања појачавача конјуговано прилагођених на излазном приступу, као и појачавача прилагођених по снази при великим сигнаlima на излазном приступу.

У трећем поглављу обрађују се појачавачи са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу. Анализирана је топологија појачавача са отпорником у дрејну. Идентификован је главни недостатак (мала ефикасност) и предложено је побољшање у виду појачавача са дрејн-гејт повратном спрегом. Развијена су нове методологије пројектовања појачавача са дрејн-гејт повратом спрегом и истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу: аналитичка и геометријска.

У четвртном поглављу представљен је пример пројектовања појачавача снаге са дрејн-гејт повратном спрегом и истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу у стандардном RF CMOS процесу, применом нове методологије пројектовања.

Пето поглавље представља закључак, са прегледом најважнијих решења и резултата проистеклих из спроведеног истраживања.

## **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација кандидата Миленка Милићевића припада ужој научној области Електроника, а у још ужем смислу припада области пројектовања интегрисаних појачавача снаге. Појачавач снаге је један од најважнијих елемената сваког комуникационог и радарског система. Област пројектовања појачавача снаге је веома актуелна, и у престижним часописима се често објављују радови о интегрисаним појачавачима снаге се бољом ефикасношћу, 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. У општем случају, та два оптерећења су различита, те појачавачки транзистор није могуће истовремено прилагодити по оба критеријума. Ограничење се може превазићи увођењем додатног степена слободe, у овом случају повратне спреге. Повратном спрегом је могуће подесити излазну импедансу транзистора тако да се постигне истовремено и конјуговано прилагођење и прилагођење по снази при великим сигнаlima на излазном приступу. Пројектовање појачавача са повратном спрегом је врло захтевно због утицаја повратне спреге и није могуће применити приступ где се одвојено пројектују улазно и излазно коло за прилагођење. Међусобни утицај повратне

спреге, улазног и излазног оптерећења не може бити занемарен и мора се пажљиво размотрити и уврстити у нову методологију пројектовања.

Оригиналноост дисертације се огледа у новој методологији пројектовања појачавача снаге са дрејн-гејт повратном спрегом применом аналитичког и геометријског приступа. Показано је да је могуће остварити истовремено конјуговано прилагођење и прилагођење по снази при великим сигнаlima на излазном приступу уз побољшање ефикасности у односу на стандардно решење у виду додатног отпорника у дрејну.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература дата у списку референци садржи најважније радове из релевантних научних области. Кандидат је користио укупно 117 библиографских референци. Велики број радова је новијег датума, што поново указује на актуелност обрађене теме. У оквиру наведене литературе, изложен је и рад кандидата Миленка Милићевића објављен у часопису из категорије M21.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације спроведена је у три фазе:

- Прва фаза обухвата преглед литературе о интегрисаним појачавачима снаге у класи А, детаљна анализа појачавача конјуговано 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 конјугованом 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 обухвата детаљну анализу топологије појачавача снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу. У овој фази развијена је генерална методологија пројектовања појачавача снаге са дрејн-гејт повратном спрегом употребом аналитичког и графичког приступа.
- Трећа фаза обухвата проверу предложене теорије на примеру пројектовања широкопојасног појачавача снаге са побољшаним излазним прилагођењем. Пројектовани појачавач је реализован у стандардном RF 130 nm CMOS процесу. Провера теоријских резултата спроведена је поређењем резултата добијених симулацијом и мерењима.

Примењена методологија одговара стандардима научно-истраживачког рада и у сагласности је са циљевима дефинисаним на почетку израде докторске дисертације.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

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 прилагођени и обично имају велико појачање снаге, али малу максималну излазну снагу. 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 је

по правилу већа, али је појачање снаге нешто мање. У пракси се често захтева да појачавач буде прилагођен по оба критеријума.

Појачавач снаге са заједничким сорсом није могуће истовремено конјуговано прилагодити и прилагодити по снази за велике сигнале на излазном приступу. Ограничење се може превазићи увођењем додатног степена слободе у виду дрејн-гејт повратне спреге. Пошто повратна спрега повећава међусобни утицај улазне и излазне мреже за прилагођење, потребно је развити и нову методологију пројектовања којом се омогућава истовремено пројектовање обе мреже за прилагођење.

Предложене топологија и методологија пројектовања практично су примењиве при пројектовању појачавача снаге са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази на излазном приступу.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током израде докторске дисертације кандидат је показао способност да самостално проучи литературу из релевантне области, препозна отворена питања и адекватно одговори на нека од њих. Доприноси дисертације у области интегрисаних појачавача снаге су оригинални, савремени и потврђују способност кандидата да ефикасно приступи решавању инжењерских проблема.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

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

Остварени научни доприноси ове дисертације су следећи:

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

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у циљеве истраживања, постављене претпоставке и добијене резултате, може се констатовати да је кандидат успешно одговорио на сва релевантна питања из области која је анализирана у докторској дисертацији.

Наиме, описана метода пројектовања омогућава пројектовање појачавача снаге са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу применом аналитичког и графичког приступа. Методологија је посебно значајна и интересантна из угла практичне примене.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада кандидат Миленко Милићевић објавио је рад у међународном научном часопису са SCI листе, категорије M21 у коме је првопотписани аутор. Поред тога, објавио је неколико радова из области интегрисаних кола на домаћим и међународним конференцијама и часописима као први аутор или 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, vol. 65, no. 10, pp. 3138-3149, Oct. 2018., ISSN 1549-8328, IF 2.823, 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. MIDEM, vol. 46, no. 1, pp. 24–28, 2016, ISSN 0352-9045, IF 0.476.
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. MIDEM, vol. 45, no. 4, 2015, pp. 266–276, ISSN 0352-9045, IF 0.476.

##### 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.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Миленка Милићевића под насловом „Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу“ је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду.

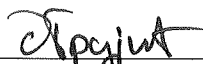
У дисертацији је развијена аналитичка метода пројектовања појачавача снаге, базирана на поједностављеном моделу RF CMOS транзистора. Циљ је да се на основу резултата аналитичке методе формирају почетне вредности пројектних параметара. У наредном кораку развијена је графичка метода оптимизације са укљученим паразитним елементима транзистора. Овом методом се фино подешавају пројектни параметри и коло се припрема за завршне нумеричке симулације. Поред симулатора кола са концентрисаним

параметрима, током пројектовања коришћени су и електромагнетски симулатори за прорачун S-параметара и карактеризацију пасивних структура. На крају, дефинисане су нове метрике које омогућавају поређење различитих топологија појачавача имплементираних у истом процесу, као и поређење различитих полупроводничких технологија, све у циљу да се за дате пројектне захтеве може одабрати оптимална топологија, као и полупроводничка технологија.

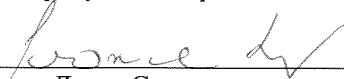
Део резултата проистеклих из истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације кандидат је публиковао у међународном часопису са SCI листе. Такође, објавио је неколико релевантних радова из области интегрисаних кола на међународним конференцијама и у међународним часописима са SCI листе. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија констатује да дисертација „Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу“ мастер инжењера Миланка Милићевића садржи оригинални научни допринос.

На основу претходног Комисија констатује да је Миленко Милићевић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду. Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да се докторска дисертација под називом „Појачавачи снаге у класи А са истовременим конјугованим прилагођењем и прилагођењем по снази при великим сигнаlima на излазном приступу“ прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду и да се одобри јавна усмена одбрана.

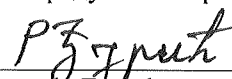
#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



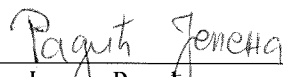
ментор др Душан Грујић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



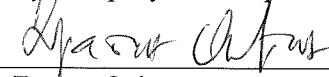
др Радивоје Бурић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



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



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

Београд, 24.04.2019.