

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње **Ане Ћупурдије**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства.

Одлуком број 888/13 од 12. 05. 2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње **Ане Ћупурдије** под насловом „**Аналитичка метода пројектовања високоефикасних појачавача снаге у класи J**“ (енглески: *A Closed-Form Design Method for High-Efficiency Class-J Power Amplifiers*).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидаткињи

1.1. Биографски подаци

Ана (Ћуро) Ћупурдија рођена је 9. новембра 1996. године у Суботици. Похађала је основну школу Стеван Немања у Стењевцу (Деспотовац) и Гимназију у Ћуприји. Обе школе завршила је као ђак генерације. У периоду од 2011. до 2015. године била је полазница курса астрономије у Научној станици Петница. Њен рад са Конференције у Петници представљен је у Галерији науке и технике САНУ 2014. године. Током основног и средњег школовања учествовала је на разним републичким такмичењима из математике и граматике.

Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписала је 2015. године, где је дипломирала 11. септембра 2019. године на Одсеку за електронику, са просеком оцена 9,06/10,0. Одбранила је дипломски рад под називом „Пројектовање подсклопова Доплеровог радара – микроталасног мешача и Вилкинсоновог делитеља снаге“, под менторством професора др Слободана Савића, са највишом оценом. Овај рад је награђен од стране друштва BAFA USA као најбољи дипломски рад написан на Електротехничком факултету у школској 2018/2019. години. Рад са истим насловом представила је на конференцији TELFOR 2019 и освојила награду професора др Илије Стојановића за најбољи рад представљен у студентској секцији конференције. Добитница је и престижне награде Михајло Пупин за 2020. годину, која се додељује у знак сећања на Михајла Пупина, за студентске радове који представљају допринос дисциплинама којима се овај научник бавио.

Мастер студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписала је 2019. године на Одсеку за микроталасну технику, где је дипломирала 11. септембра 2020. године са просечном оценом 10,0/10,0. Мастер рад под називом „Прототип FMCW радарског система и његова примена за одређивање удаљености објекта“ одбранила је под менторством професора др Слободана Савића са највишом оценом.

Докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписала је 2020. године на Одсеку за микроталасну технику, где је положила све испите са највишим оценама. Крајем 2021. године била је део тима Електротехничког факултета који је учествовао у студентском такмичењу Друштва за Антене и Простирање (AP-S) Института

Инжењера Електротехнике и Електронике (IEEE), који се пласирао у шест најбољих тимова у свету. У оквиру истраживања на докторским студијама, излагала је рад на конференцији IcETRAN 2022, где је освојила награду за најбољи рад младог аутора изложен у секцији Микроталасна техника, технологије и системи (МТИ/МТ).

Од 2020. до 2025. године радила је као инжењер електротехнике у Влатаком институту високих технологија у Београду, где је била ангажована на бројним истраживачким и комерцијалним мултидисциплинарним пројектима у областима савремених радарских и комуникационих система. Решења која је развила у оквиру своје групе активно се користе у више земаља широм света. Након тога, запослена је у компанији Semiwave у Београду, где се бави развојем аналогних, РФ и mmWave интегрисаних кола. Главна област интересовања су јој микроталасна пасивна и активна кола, појачавачи снаге и полупроводничке РФ компоненте.

Аутор је четири, а коаутор три научна рада објављена у часописима и на конференцијама. Главни је аутор техничког решења примењеног на међународном нивоу, и коаутор битно побољшаног техничког решења примењеног на међународном нивоу.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидаткиња Ана Ћупурдија уписала је докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на Смеру за микроталасну технику 2. новембра 2020. године. Током докторских академских студија испунила је све обавезе и положила све испите са оценом 10:

Назив испита или обавезе	Оцена	ЕСПБ бодови
Микроталасна електроника (19Д071МЕ)	10	9
Електромагнетска компатибилност и интегритет сигнала (19Д071ЕКИ)	10	9
Интегрисана кола за комуникационе и радарске системе (19Д041ИКР)	10	9
Увод у научни рад (19Д091УНР)	10	6
Електромагнетика (19Д071ЕМ)	10	9
Микроталасна техника (19Д071МТ)	10	9
Антене и простирање радиоталаса (19Д071АПР)	10	9
Студијско истраживачки рад I		24
Научно стручни рад		3
Студијско истраживачки рад II		24

Активности по предметима су следеће:

- **Микроталасна електроника:** Упознавање са полазном литературом из области микроталасних појачавача снаге (М. Илић, С. Савић, „Микроталасна електроника“), са посебним освртом на релевантну литературу из области појачавача снаге у класи J (S. C. Cripps, „RF Power Amplifiers for Wireless Communications“ и одабрани научни радови из области), консултације и истраживачки задатак. Задатак је обухватао проучавање теоријских основа класе J и параметара који утичу на ефикасност појачавача, анализу постојећих приступа пројектовању и параметризацији простора ефикасности, као и развој и испитивање алтернативне параметризације простора ефикасности за појачаваче снаге у класи J.

- **Електромагнетска компатибилност и интегритет сигнала:** Проучавање литературе (А. Ђорђевић, Д. Олћан, „Испитивање електромагнетске компатибилности“, Н. W. Johnson, М. Graham, „High-speed digital design – a handbook of black magic“), консултације и пројекат. Први део пројектног задатка био је моделовање и симулација неколико задатака из књиге А. Ђорђевић, Д. Олћан, „Испитивање електромагнетске компатибилности“. Други део пројектног задатка било је пројектовање, израда и мерења неколико појачавача за релевантне телекомуникационе опсеге (GPS L1 и L2, GSM 800, 900 и 1800 MHz, WiFi 2450 и 5000 MHz) коришћењем минималног броја дискретних компоненти.
- **Интегрисана кола за комуникационе и радарске системе:** Проучавање литературе (М. Skolnik, „Radar Handbook“, Д. Грујић, „Презентације са предавања и вежби из предмета Хардверско-софтверска обрада сигнала“) консултације и пројектни задатак. Пројектни задатак обухватао је системско моделовање и анализу радарског система заснованог на директном одбирању RF сигнала, са моделовањем предајног и пријемног ланца, директне дигиталне синтезе сигнала (DDS), FFT обраде и CORDIC алгорита. Анализиран је утицај броја бита DDS-а, броја итерација CORDIC алгорита и delta-sigma модулације на перформансе система, а све функционалности модела верификоване су кроз симулације и анализу добијених резултата.
- **Увод у научни рад:** Упознавање са релевантном литературом (З. В. Поповић „Како написати и објавити научно дело“), консултације и пројекат. Пројектни задатак био је форматирање научног рада по узору на пример дат у обрађеној литератури.
- **Електромагнетика:** Упознавање са релевантном литературом (Бранко Поповић „Електромагнетика“), консултације, неколико симулационих задатака и континуирана провера знања кроз усмена испитивања током семестра. У оквиру предмета проучавани су основни закони електромагнетике, електромагнетски таласи, простирање, као и примена теоријских концепата кроз аналитичке и симулационе задатке.
- **Микроталасна техника:** упознавање са релевантном литературом (А. Ђорђевић, Д. Тошић, „Микроталасна техника“, Д. М. Pozar “Microwave Engineering”), консултације и пројекат. Обрађен је комплетан опус предмета Микроталасна техника (13E073MT) са основних студија, укључујући предавања, вежбе, лабораторијске вежбе и писмени испит. Затим је одрађен пројектни задатак, који је обухватао дизајн и израду уређаја за мерење коефицијента стојећих таласа. Резултат пројекта обухваћен је у раду објављеном на конференцији IcETRAN 2022 под називом „Cost-Effective Standing Wave Ratio Meter“.
- **Антене и простирање радиоталаса:** Проучавање литературе (М. Драговић “Антене и простирање радио таласа”), консултације и писмено испитивање. Обрађен је комплетан опус предмета Антене и простирање (13E073AP) са основних студија, укључујући предавања, вежбе, лабораторијске вежбе и писмени испит.

Библиографија кандидаткиње:

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

[1] А. Ђ. Ћупурдија, Р. З. Петровић, О. З. Јаковљевић, В. Ј. Јанковић, С. В. Савић, and М. М. Илић, “SDR Platform Implementation of DoA Detection Algorithm for Wireless Security Applications,” in *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, Jul. 2022, pp. 1560–1561. doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886050.

- [2] A. Đ. Ćupurdija and S. V. Savić, "Cost-Effective Standing Wave Ratio Meter," in *Proceedings of 9th IcETRAN Conference 2022*, Novi Pazar, Serbia, Jun. 2022, pp. 463–468. [Online]. Available: https://www.etrans.rs/2022/zbornik/ICETRAN-22_radovi/053-MTI1.5.pdf
- [3] A. Đ. Ćupurdija and S. V. Savić, "C-Band FMCW Radar System and its Application in Distance-to-Object Estimation," in *2021 29th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Nov. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653340.
- [4] P. Petrović, B. Džolić, N. Lekić, N. Grbić, A. Ćupurdija, V. Orlić, and M. Erić, "Testing RFoF Link for Transmitting HF-OTHR Signal Between Transmitter and Receiver shelters," in *2020 28th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Nov. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/TELFOR51502.2020.9306559.
- [5] N. Grbić, P. Petrović, A. Ćupurdija, N. Lekić, and S. Savić, "The Influence of Different Realization of Ground Plane on a Characteristic of HFSWR Transmitter Monopole Array," in *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2020*, Belgrade, Serbia: Academic Mind, Sep. 2020, pp. 119–123. [Online]. Available: https://www.etrans.rs/2020/IcETRAN/Conference_Proceedings/

Рад у часопису националног значаја (M52)

- [1] P. Petrović, B. Džolić, N. Lekić, N. Grbić, A. Ćupurdija, V. Orlić, and M. Erić, "Testing RFoF link for transmitting HF-OTHR signal between transmitter and receiver shelters," *Telfor Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 13–18, 2021, doi: 10.5937/telfor2101013P.

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини (M63)

- [1] A. Đ. Ćupurdija, "Projektovanje podsklopova Doplerovog radara: mikrotalasnog mešača i Vilkinsonovog delitelja snage," *Zbornik 27. Telekomunikacionog foruma TELFOR 2019*, Beograd, Srbija, 2019, pp. 779–782.

Ново техничко решење примењено на међународном нивоу (M81)

- [1] A. Ćupurdija, L. Marković, N. Petrović, N. Luković, I. Beracka, V. Orlić, M. Perić, „HF prijemnik velikog dinamičkog opsega za pomorski nadzor“, Vlatacom d.o.o., 2025.

Битно побољшано техничко решење на међународном нивоу (M83)

- [1] P. Petrović, N. Grbić, A. Ćupurdija, B. Džolić, V. Orlić, N. Lekić, and M. Erić, „Unapređenje robusnosti prenosa predajnog signala radara za posmatranje izvan linije horizonta“, Vlatacom d.o.o., 2020.

Кандидаткиња је 22. маја 2026. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду јавно усмено бранила предложену тему докторске дисертације пред Комисијом у саставу:

1. др Милан Илић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
2. др Мирослав Перић, научни саветник, Влатаком институт високих технологија, Београд,
3. др Душан Грујић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

На јавној усменој одбрани предложене теме, Комисија је закључила да је кандидаткиња Ана Ћупурдија добила оцену задовољила и да испуњава потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

1.3. Оцена подобности кандидаткиње за рад на предложеној теми

На основу резултата које је кандидаткиња Ана Ћупурдија постигла у свом досадашњем стручном и научном раду, од којих бисмо издвојили следеће:

- сакупила је максималних сто једанаест (111) ЕСПБ полагањем испита на докторским студијама и обављањем научно истраживачких обавеза;
- јавно је одбранила тему докторске дисертације 22. маја 2026. године, пред Комисијом (др Милан Илић, др Мирослав Перић и др Душан Грујић) формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду на седници број 929 одржаној 12. маја 2026. године;
- публиковала је укупно девет радова, од којих је пет публиковано у саопштењима са међународних научних скупова штампаних у целини, један у часопису националног значаја, један у саопштењу са скупа националног значаја штампаног у целини, једно ново техничко решење примењено на међународном нивоу и једно битно побољшано техничко решење на међународном нивоу, што је квалификује за научни рад;
- остварила је практично искуство у области коју покрива предложена тема докторске дисертације;

можемо закључити да кандидаткиња **Ана Ћупурдија** у сваком погледу **испуњава** суштинске и формалне услове који је квалификују да приступи изради докторске дисертације са предложеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Са сталним развојем бежичних комуникација и система, као и система који раде у микроталасном опсегу, потреба за високоефикасним широкопојасним појачавачима снаге (енгл. *power amplifiers*, PAs), као и захтеви који се пред њих постављају, непрестано расту и постају све сложенији. Генерално, појачавачи снаге у класи J [1] могу да обезбеде високу ефикасност дрејна у широком опсегу учестаности [2], [3] што их чини веома атрактивним за истраживаче и РФ дизајнере у практичној примени. Висока ефикасност се постиже одговарајућом комплексном импедансом пријемника (оптерећења) на основној учестаности и строго реактивном импедансом пријемника на свим вишим хармоницима [4].

Након што је дату класу први пут Крипс представио [1], направљени су разни искораци и унапређења у теоријском разумевању, као и у практичним имплементацијама појачавача у класи J. Побољшање перформанси појачавача у класи J, узимајући у обзир нелинеарност излазне капацитивности, приказано је у [5], док се у [6] предлаже метод за пројектовање појачавача класе J велике снаге у техници полупроводника. У [7] је анализиран високоефикасан PA са произвољном импедансом пријемника на вишим хармоницима. Један дизајн-простор пројектовања појачавача снаге у класи B и J, користећи се променом референтне равни, представљен је у [8], а у [9] је испитан утицај нелинеарне капацитивности дрејн-сорс на рад појачавача. Међутим, већина ових приступа предлаже или поступак пројектовања појачавача за конкретан случај (фреквентни опсег, модел транзистора и томе слично), као рецимо у [10], или релативно сложене дизајн-просторе, засноване доминантно на математичком приступу где променљиве које се користе немају једноставну и јасну физичку интерпретацију, нити интуитивни значај и прагматичну вредност за дизајнере појачавача у класи J [11], [12]. Према тренутним сазнањима, предложена решења користе искључиво нумеричке прорачуне за одређивање ефикасности, почевши од првих радова у вези са појачавачима у класи J [1], па све до скорашњих радова из ове области [13], [14]. У отвореној литератури не постоји скуп аналитичких израза који описују ефикасност појачавача у класи J у затвореном облику и користећи се величинама које имају јасан физички смисао. Као последица, не постоје интуитивно јасни изрази за пројектовање појачавача у класи J. Такав приступ представљао би значајан напредак у оквиру теорије и

практике пројектовања високоефикасних појачавача у класи J, а то ће бити један од предмета истраживања у оквиру дисертације.

Осим наведене потребе за адекватним (аналитичким) описивањем рада појачавача у класи J, тачност пројектовања РФ појачавача снаге у великој мери зависи од адекватног моделовања активних компоненти, пошто се пасивне компоненте, као што су водови, отпорници, калемови и кондензатори, по правилу могу тачније моделовати. Већина произвођача активних компоненти уз своје производе испоручује и (нумеричке) моделе којима се, мање или више тачно, описује њихов рад, укључујући и нелинеарне ефекте. Међутим, из разлога заштите интелектуалне својине, већина произвођача те моделе испоручује као затворене, па се из њих не може видети унутрашња структура компоненти, као ни параметри који описују паразитне феномене. Приликом пројектовања високоефикасних појачавача у класи J, потребно је, између осталог, одредити комплексну импедансу којом је затворен транзистор у равни излазног струјног генератора, пре паразитне капацитивности између дрејна и сорса. У том смислу, између осталих паразитних параметара, потребно је познавати и паразитну капацитивност између дрејна и сорса, која се може одредити деембедовањем и екстракцијом из (нумеричког) модела транзистора или на основу резултата мерења. Постојеће методе деембедовања и екстракције паразитних параметара транзистора обично су засноване на мерењима s -параметара [15], [16], [17], врло често дају параметре који немају физички смисао (нпр. негативне капацитивности), а добијени резултати су по правилу врло осетљиви на најмање промене и непрецизности улазних параметара (мерења), што резултује системима једначина који су слабо условљени. То додатно компликује процес пројектовања појачавача у класи J, поготову у данашње време, када отворени модели транзистора најчешће нису јавно доступни. Једноставна процедура која би кроз процес деембединга и екстракције могла да одреди паразитне параметре транзистора, полазећи од затворених (нумеричких) модела које испоручује произвођач, представљала би значајно унапређење у овој области, а то ће бити један од праваца истраживања у оквиру дисертације.

Циљ истраживања ове докторске дисертације обухвата развој аналитичке и практично применљиве методе за пројектовање високоефикасних појачавача снаге класе J, као и развој прецизног и једноставног приступа за деембедовање и екстракцију паразита транзистора. Посебан фокус биће на формулисању методе пројектовања у затвореној форми која ће омогућити јасан увид у ефикасност појачавача. Посебно ће се разматрати високоефикасни појачавачи снаге у класи J који раде у микроталасном опсегу учестаности, а приказана метода искористиће се за конструкцију кривих константне ефикасности у Смитовом дијаграму. Финално, циљ је и израда прототипа високоефикасног појачавача снаге у класи J у микроталасном опсегу учестаности, а резултати мерења требало би да потврде раније постављене хипотезе и практично верификују валидност приказаног аналитичког алгорита пројектовања. Поред наведених, посебан значај за истраживање имају и радови [18], [19], [20], [21], [22], [23].

Значај овог истраживања огледа се у унапређењу постојећих метода пројектовања високоефикасних појачавача снаге у класи J и добијање алата који елиминише потребу за сложеним нумеричким методама, које могу бити врло захтевне, како са становишта рачунарских ресурса, тако и са становишта времена извршавања. Осим тога, очекује се да ће приказана метода моћи на релативно једноставан начин да се повеже са постојећим методама које приликом пројектовања имају другачије критеријуме, на пример постизање што веће излазне снаге појачавача „load-pull” методом. На тај начин олакшаће се вишекритеријумски дизајн појачавача. Побољшање метода деембедовања и екстракције паразитских параметара појачавача, као што је паразитна капацитивности дрејн-сорс, директно утиче на поузданост коначног дизајна и повећава вероватноћу да првоизрађени прототип задовољи све критеријуме дизајна, што је само по себи врло значајно. Очекивани резултати имају примену у широком спектру микроталасних система, укључујући савремене бежичне комуникационе системе и микроталасну електронику.

Релевантна литература из области истраживања

- [1] S. C. Cripps, *RF power amplifiers for wireless communications*, 2nd ed. in Artech House microwave library. Boston: Artech House, 2006.
- [2] P. Wright, J. Lees, P. J. Tasker, J. Benedikt, and S. C. Cripps, "An efficient, linear, broadband class-J-mode PA realised using RF waveform engineering," in *2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Jun. 2009, pp. 653–656. doi: 10.1109/MWSYM.2009.5165781.
- [3] F. You, C. Li, J. Peng, and S. He, "Design of Broadband High-Efficiency Power Amplifier Through Interpolations on Continuous Operation-Modes," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 10663–10671, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2890834.
- [4] S. C. Cripps, P. J. Tasker, A. L. Clarke, J. Lees, and J. Benedikt, "On the Continuity of High Efficiency Modes in Linear RF Power Amplifiers," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 19, no. 10, pp. 665–667, Oct. 2009, doi: 10.1109/LMWC.2009.2029754.
- [5] J. Moon, J. Kim, and B. Kim, "Investigation of a Class-J Power Amplifier With a Nonlinear C_{vrm} out for Optimized Operation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 11, pp. 2800–2811, Nov. 2010, doi: 10.1109/TMTT.2010.2077970.
- [6] A. Jain, P. R. Hannurkar, S. K. Pathak, D. K. Sharma, and A. K. Gupta, "Investigation of class J continuous mode for high-power solid-state RF amplifier," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, no. 8, pp. 686–692, 2013, doi: 10.1049/iet-map.2012.0649.
- [7] M. Roberg and Z. Popovic, "Analysis of High-Efficiency Power Amplifiers With Arbitrary Output Harmonic Terminations," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 8, pp. 2037–2048, Aug. 2011, doi: 10.1109/TMTT.2011.2144995.
- [8] S. Saxena, K. Rawat, and P. Roblin, "Continuous Class-B/J Power Amplifier Using a Nonlinear Embedding Technique," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 64, no. 7, pp. 837–841, Jul. 2017, doi: 10.1109/TCSII.2016.2633300.
- [9] Z. A. Mokhti, J. Lees, C. Cassan, A. Alt, and P. J. Tasker, "The Nonlinear Drain–Source Capacitance Effect on Continuous-Mode Class-B/J Power Amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 7, pp. 2741–2747, Jul. 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2918309.
- [10] M. C. L. Purisima and J. J. S. Marciano, "Design considerations for X-band Class J power amplifiers," in *2014 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA)*, Sep. 2014, pp. 13–18. doi: 10.1109/ISWTA.2014.6981171.
- [11] Y. M. A. Latha and K. Rawat, "Methodology to Design Multi-Octave Power Amplifier Using Extended Class B to Class J Continuous Mode," in *2021 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMARC)*, Dec. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/IMaRC49196.2021.9714641.
- [12] A. Alizadeh, S. Hassanzadehyamchi, A. Medi, and S. Kiaei, "An X-Band Class-J Power Amplifier With Active Load Modulation to Boost Drain Efficiency," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 67, no. 10, pp. 3364–3377, Oct. 2020, doi: 10.1109/TCSI.2020.2991184.
- [13] B. Bukvić and M. M. Ilić, "Simple Design of a Class-J Amplifier With Predetermined Efficiency," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 9, pp. 699–701, Sep. 2016, doi: 10.1109/LMWC.2016.2597228.
- [14] B. Bukvić and M. M. Ilić, "An octave bandwidth Class-J power amplifier with second harmonic termination control," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 162, p. 154564, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.aeue.2023.154564.
- [15] H. Fukui, "Determination of the basic device parameters of a GaAs MESFET," *The Bell System Technical Journal*, vol. 58, no. 3, pp. 771–797, Mar. 1979, doi: 10.1002/j.1538-7305.1979.tb02244.x.

- [16] G. Dambrine, A. Cappy, F. Heliodore, and E. Playez, "A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 36, no. 7, pp. 1151–1159, Jul. 1988, doi: 10.1109/22.3650.
- [17] M. Berroth and R. Bosch, "Broad-band determination of the FET small-signal equivalent circuit," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, no. 7, pp. 891–895, Jul. 1990, doi: 10.1109/22.55781.
- [18] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Wiley, 2012.
- [19] H. W. Bode, *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. D. Van Nostrand Company, Incorporated, 1945.
- [20] R. M. Fano, "Theoretical limitations on the broadband matching of arbitrary impedances," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 249, no. 1, pp. 57–83, Jan. 1950, doi: 10.1016/0016-0032(50)90006-8.
- [21] H. Fukui, "Channel current limitations in GaAs MESFETS," *Solid-State Electronics*, vol. 22, no. 5, pp. 507–515, May 1979, doi: 10.1016/0038-1101(79)90157-6.
- [22] S. C. Cripps, *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*. Artech House, 2002.
- [23] D. R. Barros, L. C. Nunes, P. M. Cabral, and J. C. Pedro, "Impact of the Input Baseband Terminations on the Efficiency of Wideband Power Amplifiers Under Concurrent Band Operation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 12, pp. 5127–5138, Dec. 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2951147.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе које ће бити усвојене у овој дисертацији су следеће.

- Могуће је формулисати метод пројектовања високоефикасног појачавача снаге у класи J у затвореном облику који омогућава директан аналитички увид у ефикасност појачавача и његове перформансе у функцији променљивих које имају јасну физичку интерпретацију, па самим тиме олакшавају процес пројектовања.
- Елементи који описују паразитне параметре транзистора, као што је капацитивност дрејн-сорс, могу се поуздано одредити применом одговарајућих метода деембедовања и екстракције полазећи од затворених модела транзистора које обично обезбеђује произвођач.
- Комбиновањем добијених метода могуће је значајно унапредити ефикасност и поузданост процеса дизајна појачавача снаге у класи J, поготову у случају када је висока ефикасност само један од пројектних захтева.

4. Научне методе истраживања

Методологија истраживања обухвата теоријску анализу, развој аналитичких метода, нумеричке симулације и експерименталну потврду предложених решења.

1. Анализа постојеће литературе из области високоефикасних појачавача снаге, са посебним освртом на класу J.

Ова фаза обухвата систематичан преглед релевантних научних радова и уџбеника који се баве теоријом и праксом пројектовања појачавача у класи J, као и сродних класа високоефикасних појачавача. Посебна пажња биће посвећена постојећим аналитичким моделима и нумеричким приступима, као и идентификацији њихових ограничења са становишта интуитивности, применљивости и захтева у погледу рачунарских ресурса.

2. Развој аналитичких метода у затвореном облику за одређивање ефикасности и добијање одговарајућих кривих у Смитовом дијаграму.

На основу усвојеног теоријског модела појачавача биће изведен комплетан скуп аналитичких израза који описују зависност ефикасности дрејна од нормализоване импедансе пријемника и кључних параметара транзистора. Добијени резултати биће искоришћени за

конструкцију кривих константне ефикасности у Смитовом дијаграму, чиме се формира интуитиван и практично применљив простор за пројектовање.

3. Формулација и имплементација метода за деембедовање и екстракцију паразита транзистора и капацитивности дрејн-сорс.

Биће развијен поступак који омогућава одређивање паразитских параметара транзистора и капацитивности дрејн-сорс, полазећи од доступних затворених (нумеричких) модела. Посебан акценат биће на формулацији метода који даје физички смислене резултате и који је робуснији у односу на методе засноване на мерењима s -параметара.

4. Спровођење рачунарских симулација ради потврде предложених метода.

Предложени аналитички модели и поступци биће верификовани коришћењем симулација, како на нивоу идеализованих теоријских модела, тако и применом реалистичних транзисторских модела који укључују паразитске елементе и додатне нелинеарне ефекте. Добијени резултати биће упоређени са аналитичким резултатима, у циљу провере конзистентности и тачности предложених приступа.

5. Израда и експериментална карактеризација прототипа појачавача снаге.

На основу предложених метода биће пројектован и реализован прототип високоефикасног појачавача снаге у класи J који ради у микроталасном опсегу учестаности. Спровешће се мерења кључних параметара, као што су ефикасност, појачање и излазна снага, а добијени резултати биће упоређени са аналитичким и резултатима симулација, као и са релевантним резултатима доступним у литератури, у циљу свеобухватне експерименталне валидације предложеног приступа.

5. Очекивани научни доприноси

У оквиру ове докторске дисертације очекује се више научних доприноса у области пројектовања високоефикасних појачавача снаге класе J.

Први и централни допринос односи се на развој новог аналитичког модела у затвореном облику који описује рад појачавача у класи J, при чему ће бити изведене формуле које повезују ефикасност појачавача са нормализованом импедансом пријемника, узимајући у обзир утицај капацитивности дрејн-сорс, амплитуде струје дрејна и напона поларизације. Овај приступ омогућава директан и јасан увид у рад појачавача и представља алтернативу постојећим нумеричким и итеративним методама, које су често мање интуитивне и теже применљиве у пракси, а по правилу захтевају и значајније рачунарске ресурсе.

Други значајан допринос је увођење новог, интуитивног и графички заснованог пројектног простора у Смитовом дијаграму, дефинисаног преко кривих константне ефикасности. Предложени пројектни простор, заснован на нормализованој импеданси пријемника, омогућава директну примену у инжењерској пракси и лако комбиновање са постојећим техникама, као што је „load-pull“ анализа, чиме се значајно унапређује процес дизајнирања појачавача, поготову у микроталасном опсегу.

Трећи допринос односи се на формулацију систематичне и практично применљиве процедуре пројектовања појачавача снаге класе J, која произилази из предложеног аналитичког модела и пројектног простора. Ова процедура омогућава избор оптималних радних услова уз уважавање ограничења реалних параметара транзистора, као што су максимални дозвољени напон напајања и максимална дозвољена струја, укључујући паразитне елементе и нелинеарне ефекте.

Даље, биће предложена и метода за деембедовање и екстракцију паразитских параметара транзистора, са посебним освртом на одређивање капацитивности дрејн-сорс. Овај допринос има за циљ побољшање тачности модела који се користе у процесу пројектовања високоефикасног појачавача у класи J, чиме се обезбеђује боље поклапање аналитичких, симулационих и експерименталних резултата и повећава вероватноћа да првоизрађени прототип задовољи све пројектне захтеве.

Финално, биће извршена експериментална верификација предложених метода кроз симулације, израду и мерење прототипа високоефикасног појачавача снаге, са циљем да се потврди њихова тачност, применљивост и предности у односу на постојеће приступе. Према доступним сазнањима, предложени скуп аналитичких израза и пројектних дијаграма представља новину у литератури и обезбеђује универзалан и директно применљив алат за пројектовање високоефикасних појачавача снаге у класи J.

6. План истраживања и структура рада

Почетак истраживања је додатна анализа постојећих теоријских и практичних метода за пројектовање појачавача снаге у класи J, са посебним освртом на постојеће аналитичке моделе и нумеричке технике. У наредној фази биће формулисан теоријски модел појачавача који укључује утицај кључних параметара транзистора, посебно капацитивности дрејн-сорс, амплитуде струје дрејна и напона поларизације. На основу тог модела биће изведен комплетан скуп аналитичких израза у затвореном облику који дефинишу зависности између ефикасности и импедансе пријемника. Затим ће бити конструисан простор за дизајнирање у Смитовом дијаграму у виду кривих константне ефикасности, а биће развијена и процедура пројектовања која омогућава његову директну примену у инжењерској пракси. Рад у Смитовом дијаграму посебно је одомаћен у микроталасној области, па се очекује да се приказана метода лако може комбиновати са процедурама дизајна појачавача по другачијим критеријумима.

Паралелно са тим, биће развијена метода за деембедовање паразита и екстракцију капацитивности дрејн-сорс транзистора на основу доступних затворених нумеричких модела, са циљем обезбеђивања што тачнијег модела транзистора за потребе пројектовања.

У следећој фази, предложене методе биће верификоване кроз симулације, како коришћењем идеалних теоријских модела, тако и применом реалистичних модела транзистора који укључују паразитске елементе и додатне нелинеарне ефекте (сатурацију, ефекат колена и сл.).

Финално, биће пројектован, реализован и измерен прототип високоефикасног појачавача снаге у класи J који ради у микроталасном опсегу учестаности. Резултати мерења биће упоређени са резултатима симулација, како би се проценила тачност предложеног приступа и идентификовала његова практична ограничења. На основу добијених резултата, биће формулисани закључци и препоруке за даљи развој аналитичких метода и њихову примену у пројектовању високоефикасних појачавача снаге у класи J.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидаткиње **Ане Ћупурдије**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

1. Кандидаткиња испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за израду докторске дисертације.

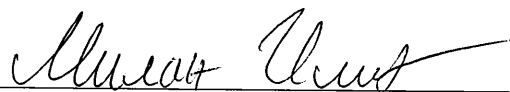
2. Предложена тема **„Аналитичка метода пројектовања високоефикасних појачавача снаге у класи J“** (енглески: *„A Closed-Form Design Method for High-Efficiency Class-J Power Amplifiers“*) је научно заснована, а резултати до којих ће се доћи израдом ове дисертације представљаће значајан и оригиналан допринос. Тема припада ужој научној области Електромагнетика, антене и микроталаси.

Докторска дисертација ће бити написана на **енглеском** језику.

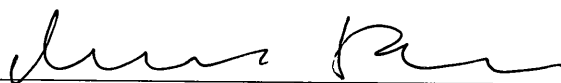
На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидаткињи **Ани Ћупурдији** одобри израду докторске дисертације под насловом **„Аналитичка метода пројектовања високоефикасних појачавача снаге у класи J“** (енглески: *„A Closed-Form Design Method for High-Efficiency Class-J Power Amplifiers“*), а за ментора предлаже **др Слободана Савића**, ванредног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У Београду 25. 05. 2026. године.

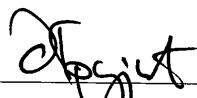
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Милан Илић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
(председник комисије)



др Мирослав Перић, научни саветник
Влатаком институт високих технологија д.о.о.



др Душан Грујић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет