

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Николе Петровића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства.

Одлуком бр. 2300/31 од 10.12.2024 године, именовани смо за чланове Комисије за оцену дисертације кандидата Николе Петровића под насловом

Систем за хардверску обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају
(енг. **System for Hardware Radar Signal Processing for Early Detection of Automotive Obstacles**)

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

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Никола Петровић уписао се на докторске студије 12.10.2017. године на Електротехничком факултету у Београду, студијски програм Електротехника и рачунарство, модул Електроника. На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма. Током студија положио је свих десет испита са просечном оценом 10,00 и одрадио све обавезе везане за студијски истраживачки рад предвиђене планом и програмом.

Тему докторске дисертације под насловом „Систем за хардверску обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају”, кандидат је пријавио Комисији за студије трећег степена на Електротехничком факултету у Београду, 27.04.2023. године

Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог за израду докторске дисертације на својој седници одржаној 09.05.2023. године и предлог комисије за оцену подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду именовало је комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (одлука број 717/28 од 16.05.2023.) у следећем саставу: др Иван Поповић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду, др Владимир Миловановић, ванредни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, др Саша Стојановић, доцент Електротехничког факултета у Београду, др Драгомир Ел Мезени, доцент Електротехничког факултета у Београду и др Владимир Петровић, доцент Електротехничког факултета у Београду. За ментора је предложен др Лазар Сарановац, редовни професор Електротехничког факултета у Београду.

Јавни усмени испит о подобности теме и кандидата одржан је на Електротехничком факултету у Београду дана 05.06.2023. године, а пред комисијом др Иван Поповић, ванредни професор Електротехничког факултета у Београду, др Владимир Миловановић, ванредни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, др Саша Стојановић, доцент Електротехничког факултета у Београду, др Драгомир Ел Мезени, доцент Електротехничког факултета у Београду и др Владимир Петровић, доцент Електротехничког факултета у Београду. Комисија је једногласно закључила да је кандидат Никола Петровић на јавној усменој одбрани предложене теме добио оцену „задовољно”. Заједно са предложеним ментором дисертације, др Лазаром Сарановцем, редовним професором Електротехничког факултета у Београду, комисија је поднела Извештај о оцени подобности теме и кандидата и научне заснованости теме.

Наставно-научно веће је усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације одлуком од 04.07.2023. године.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, на седници одржаној 11.09.2023. године, дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Систем за хардверску обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају” (одлука број 61206-3054/2-23 од 11.09.2023. године).

Кандидат је 28.11.2024. године предао урађену докторску дисертацију на преглед и оцену.

Комисија за студије трећег степена је на својој седници 03.12.2024. 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 на седници одржаној 10.12.2024. године именовало комисију за преглед и оцену докторске дисертације (одлука број 2300/31 од 10.12.2024. године) у следећем саставу: др Иван Поповић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду, др Саша Стојановић, ванредни професор Електротехничког факултета у Београду, др Владимир Миловановић, ванредни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација се бави пројектовањем система за хардверску обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају. Пројектовани су генератори хардверских инстанци за обраду радарских сигнала који укључују све потребне елементе за реализацију једнодимензионалне и дводимензионалне брзе Фуријеове трансформације као и блокова потребних за детекцију препрека. Представљен је и систем на чипу заснован на RISC-V процесору који садржи пројектоване хардверске акцелераторе за брзу детекцију препрека у аутомобилском саобраћају.

У ширем смислу, дисертација припада научној области Техничке науке – Електротехника и рачунарство, а у ужем смислу области Електронике, за коју је Електротехнички факултет у Београду матичан.

За ментора докторске дисертације одређен је др Лазар Сарановац, редовни професор на Електротехничком факултету у Београду, захваљујући радовима и значајнијим доприносима у области примењене електронике.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Никола Петровић је рођен 15.03.1993. године у Смедереву, Србија. Основну школу "Свети Сава" и Гимназију завршио је у Великој Плани, као носилац дипломе Вук Стефановић Караџић. Уписао је Електротехнички факултет у Београду 2012. године. Основне студије завршио је 2016. године на модулу за електронику, са просечном оценом 9,87. Мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, модул електроника, завршио је 2017. године са просечном оценом 10. Школске 2017/2018. уписао је докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул електроника. Тренутно је уписан у трећу годину студија са положених 10 од 10 испита и просечном оценом 10 и одобрена му је израда докторске дисертације на тему „Систем за хардверску обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају”, а за ментора је предложен професор др Лазар Сарановац, редовни професор Електротехничког факултета у Београду. На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

Од фебруара 2017. године је био запослен као сарадник у настави, а од фебруара 2018 године је запослен као асистент на Катедри за електронику Електротехничког факултета у Београду. Учесник је пројекта „Развој и моделовање енергетски ефикасних, адаптивних, вишесензорских и вишесензорских електронских система мале снаге” министарства просвете, науке и технолошког развоја. Школске 2018/2019. године учествовао је у „Erasmus+” размени наставног особља где је боравио недељу дана у Мадриду на „Universidad Politécnica de Madrid”. Награђен је наградом из Фонда проф. Мирка Милића за најбољи научно-стручни рад из области теорије електричних кола 2019. године. Држао је у Петници 2021. године предавање у вези пројектовања интегрисаних кола и система. У периоду од 2018. до 2024. године, са делом радног времена, био је запослен у компанији NOVELIC где је радио на иновационим и комерцијалним пројектима у области система за обраду радарских сигнала.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Систем за хардверску обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају” написана је на српском језику на укупно 134 стране са прилозима. Садржи 6 поглавља, 16 табела, 99 слика и листу од 120 референци.

Наслови појединачних поглавља дисертације су:

1. Увод
2. Теоријски преглед обраде података са фреквенцијски модулисаних непрекидно зрачећих радара
3. Преглед постојећих система за обраду радарских сигнала
4. Пројектовани систем
5. Експериментални резултати
6. Закључак

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дат је увод у проблеме који су решавани у дисертацији као и мотивација за рад на датој теми.

У другом поглављу је направљен теоријски преглед основних концепата фреквенцијски модулисаних непрекидно зрачећих радарских сензора. Дата су фундаментална ограничења ових система попут резолуција растојања и брзине, као и максималног растојања и релативне брзине коју радар може једнозначно одредити. Затим је приказан типични дводимензионални систем за брзу Фуријеову трансформацију и детекцију препрека и преглед најбитнијих операција потребних за процену удаљености, брзине, као и саму детекцију мета. Направљен је увод у брзу Фуријеову трансформацију и преглед проточних FFT архитектура, као и преглед најчешће коришћених прозорских функција за модификацију фреквенцијских карактеристика сигнала ради избегавања цурења спектра. На крају поглавља, дат је теоријски преглед CFAR детектора који се користе за адаптивно одређивање прага сметњи и детекцију мета.

Треће поглавље садржи преглед три система из научне литературе и два комерцијална система за обраду радарских сигнала најновије генерације. Ови системи су детаљно анализирани и уочене су њихове предности и мане. Уочено је да већина ових система не узима у обзир време потребно да радарски сензор пошаље податке ка систему за обраду сигнала већ претпостављају да радарски подаци стижу непрекидно, што је ретко када случај у реалним ситуацијама. Поред овога, донет је закључак да су постојећи системи или пројектовани за веома специфичну намену и нису флексибилни, или су пројектовани као микроконтролери са једнодимензионалним FFT хардверским акцелератором који им омогућава релативно велику флексибилност по цену већег кашњења система.

У четвртном поглављу предложен је систем за обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају, пројектован као генератор хардверских инстанци. Развијени хардверски генератор је пројектован тако да подржава генерисање система који се састоје од само једног ланца акцелератора, као и система који имају засебне ланце акцелератора за FFT обраду по удаљености и по брзини. У овом поглављу детаљно су описани сви модули који чине предложени систем, уз приказ њихових кашњења. Такође је спроведена аналитичка анализа кашњења система, са посебним нагласком на услове који морају бити испуњени како би се постигло минимално кашњење. На крају поглавља, приказан је пројектовани систем на чипу, који се састоји од RISC-V централне процесорске јединице, периферија потребних за комуникацију са персоналним рачунаром и предложеног система за обраду радарских сигнала.

У петом поглављу су представљени експериментални резултати. У првом делу поглавља описано је експериментално окружење коришћено за мерење кашњења ланца за FFT обраду по удаљености. На основу мерења показано је да се експериментални резултати слажу са резултатима добијеним у поступку теоријског разматрања. У другом делу поглавља, пројектовани систем на чипу је имплементиран на Digilent Nexys Video FPGA развојној плочи

за различita подешавања акцелератора за обраду радарских сигнала. Имплементиран је систем са акцелератором који садржи само један ланац за обраду сигнала, као и акцелератор са засебним ланцима за FFT обраду по удаљености и по брзини за различите дужине FFT-а. За имплементиране инстанце система приказани су резултати добијени обрадом радарских података.

Шесто поглавље садржи закључке дисертације као и даље правце истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Као једно од решења проблема великог броја незгода и несрећа на путевима, велики број произвођача аутомобила данас користи неки вид напредних система за помоћ у вожњи. Један од главних проблема са којима се сусрећу ови системи је обрада података са великог броја сензора у реалном времену. У ситуацијама када је препрека преблизу возилу, често није могуће покренути неки вид сложеног алгорита за обраду радарских сигнала у циљу детекције мете и добити резултат у кратком временском року. Самим тим, одлука о, рецимо, кочењу се мора донети на основу хардверске обраде сигнала што ближе самом радарском сензору. Такође, са развојем нових технологија често је потребно поново пројектовати постојећа решења за хардверску обраду сигнала како би се прилагодила све строжијим захтевима које намеће аутомобилска индустрија. Међутим, пројектовање нових или модификовање постојећих решења се не дешава тренутно и овај поступак подразумева значајне временске, људске и новчане ресурсе.

Оригиналност докторске дисертације се огледа у систематичном прегледу постојећих решења за хардверску обраду фреквенцијско модулисаних непрекидно зрачећих радарских сигнала. На основу постојећих решења и анализираних предности и мана изведени су системски захтеви које пројектовани систем мора да задовољи. Међутим, за разлику од постојећих решења, како би се смањило време поступка пројектовања и тестирања хардверског акцелератора и самим тим смањили трошкови, уместо једне инстанце система пројектован је генератор хардверских инстанци за прорачун брзе Фуријеове трансформације по удаљености и по брзини који на основу улазних параметара генерише инстанцу оптимизовану за жељену радарску апликацију. Са друге стране, систем је пројектован тако да се препрека детектује у што је могуће краћем року при чему је у обзир узето и време између суседних рампи фреквенцијско модулисаних непрекидно зрачећих радара као и време потребно да се одбирци једне рампе пошаљу са радарског сензора ка акцелератору што у постојећим решењима није случај. Предложени систем за хардверску обраду сигнала реализован је и тестиран на FPGA Nexys Video развојној платформи.

Резултати представљени у оквиру ове дисертације су актуелни имајући у виду велики број референци новијег датума које су коришћене за компаративну анализу, као и растући број индустријских решења у овој области.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Анализирана литература дата у списку референци је обимна и релевантна. Наведено је укупно 120 библиографских референци на које се кандидат позива, како приликом увођења теоријских појмова везаних за основе радара или обраде радарских сигнала, системске анализе операција потребних за хардверску обраду фреквенцијски модулисаних непрекидно зрачећих радарских сигнала, тако и приликом детаљних прегледа постојећих решења за хардверску обраду радарских сигнала. Приказана литература даје комплетну анализу тренутних достигнућа у областима које покрива тема дисертације. У оквиру наведене литературе изложени су и радови објављени у часописима као и на конференцијама на којима је кандидат Никола Петровић првопотписани аутор или коаутор.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације спроведена је по следећим фазама:

- Прикупљање и анализа постојећих техника и топологија за оптимизацију хардверских акцелератора за обраду радарских сигнала.
- Анализа предности и мана архитектура за брзо детектовање аутомобилских препрека.
- Дефинисање хардверског генератора за брзо детектовање аутомобилских препрека.
- Анализа кашњења и дефинисање ограничења пројектованог хардверског генератора.
- Квалитативно поређење постојећих референтних топологија и предложеног хардверског генератора.
- Верификација функционалности пројектованог хардверског генератора за брзо детектовање аутомобилских препрека у симулацији и на конкретној хардверској FPGA платформи.

Примењена методологија у потпуности одговара проблемима који су решавани у докторској дисертацији, као и стандардима научно-истраживачког рада, а у сагласности је са циљевима дефинисаним на почетку израде дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Хардверска обрада фреквенцијски модулисаних непрекидно зрачећих радарских сигнала је данас широко распрострањена, али и даље тражи оригинални приступ и оптимизацију архитектуре и перформанси система у зависности од конкретне примене. Како аутомобилска индустрија све више улаже у аутономну вожњу, потреба за брзом и ефикасном детекцијом радарских препрека је важнија него икад. У оквиру представљеног истраживања развијен је генератор хардверских инстанци за једнодимензионалну и дводимензионалну FFT обраду фреквенцијски модулисаних непрекидно зрачећих радарских сигнала. На овај начин, омогућено је ефикасно коришћење хардверских ресурса и смањење потребе за скупим и дуготрајним поступком поновног пројектовања хардвера. Овај вид пројектовања резултује скалабилним системом способним да одговори на све веће и разноврсније захтеве модерних радарских апликација. Аналитички резултати истраживања обухватају симулације и мерења кашњења пројектованог система као и интеграцију пројектованих хардверских генератора са RISC-V процесором.

Резултати добијени у току израде дисертације су објављени у часопису са SCIE листе као и на међународној конференцији што потврђује применљивост представљених резултата.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат, мастер инжењер електротехнике и рачунарства Никола Петровић, показао је све особине неопходне за самосталан научно-истраживачки рад. У прилогу томе сведочи да је до сада објавио 9 научно-стручних радова, од чега 3 публикована у међународним часописима са импакт фактором, где је на два рада првопотписани аутор.

Начин на који је написана докторска дисертација и научни доприноси који су у њој представљени потврђују спремност кандидата за самосталан научно-истраживачки рад, почевши од систематичног прегледа доступне литературе, преко уочавања недостатака и ограничења предложених методологија и постојећих решења, до развијања решења за унапређење уочених недостатака на пољу хардверске обраде радарских сигнала ради брзе детекције аутомобилских препрека. Научни рад кандидата одликује темељан и систематичан приступ решавања научних проблема.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени доприноси ове дисертације су следећи:

- Обављени су преглед, систематизација и анализа које обухватају најсавременије постојеће топологије система за хардверску обраду радарских сигнала са фокусом на примену у аутомобилској индустрији. Дата је детаљна анализа и преглед постојећих решења. На основу овог предлога, као и анализе постојећих решења, изведене су неопходне спецификације које пројектовани систем мора да задовољи и предложено је решење приказано у докторској дисертацији.
- Кашњење предложеног решења је оптимизовано на системском нивоу. Такође, за разлику од постојећих решења, предложено решење узима у обзир начин на који радарски сензор преноси податке ка акцелератору као и време између суседних рампи фреквенцијско модулисаних непрекидно зрачећих радара. Овај начин пројектовања доводи до реалних процена кашњења система као и смањења времена потребног за обраду података. Поред овога, како би се покрио што већи број различитих радарских сензора, уместо једне фиксне инстанце система за обраду радарских сигнала, развијен је генератор хардвера. Пројектовани хардверски генератор се може подесити тако да генерише систем за обраду сигнала за жељени радарски сензор. На овај начин, омогућено је ефикасно коришћење хардверских ресурса као и смањење потребе за скупим и дуготрајним поступком поновног пројектовања хардвера.
- Као експериментална верификација предложеног система и добијених резултата, направљена је експериментална поставка помоћу које је измерено кашњење пројектованог хардверског акцелератора за обраду радарских сигнала као и систем на чипу који садржи пројектовани хардверски акцелератор. И хардверски акцелератор и систем на чипу су имплементирани на Digilent Nexys Video FPGA платформи.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У оквиру ове дисертације детаљно су анализирани изазови са којима се суочавају савремени системи за хардверску обраду фреквенцијско модулисаних непрекидно зрачећих радарских сигнала за детекцију препрека у аутомобилском саобраћају. У дисертацији су представљени закључци и решења до којих се дошло у току истраживања као и резултати мерења који потврђују резултате добијене теоретским разматрањем и показују да пројектовани систем може остварити значајно мање кашњење у односу на постојећа решења.

Увидом у циљеве истраживања, полазне хипотезе и остварене резултате, Комисија констатује да је кандидат успешно одговорио на значајна питања из проблематике која је анализирана у дисертацији.

Приказани резултати су нови, оригинални и савремени, а доприноси дисертације се могу искористити како у даљим истраживањима, тако и у практичним индустријским системима.

4.3. Верификација научних доприноса

У оквиру истраживачког рада у области теме докторске дисертације кандидат Никола Петровић је објавио један рад као првопотписани аутор у часопису са SCIE листе и два рада на међународним конференцијама који су директној вези са темом докторске дисертације.

Категорија M22:

1. N. Petrović, M. Petrović, and V. Milovanović, "Radar Signal Processing Architecture for Early Detection of Automotive Obstacles", *Electronics*, vol. 12, no. 8, p. 1826, Apr. 2023, doi: 10.3390/electronics12081826. (IF 2022: 2.9)

Категорија M33:

1. N. Petrović, V. Milovanović, "A Flexible FPGA-Based Data Acquisition System with Integrated ADCs and 32-bit RISC-V Softcore", 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2019, pp. 426-430, Srebrno jezero, Serbia, Jun, 2019.

Категорија M34:

1. V. Milovanović, M. Petrović, V. Damnjanović, N. Petrović, D. Petković, A. Kondić, V. Mihajlović, D. Tasovac, "A Rocket Core with Radar Signal Processing Accelerators as Memory-Mapped I/O Devices", RISC-V Summit Europe, Munich, Germany, Jun, 2024.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Николе Петровића под насловом „Систем за хардверску обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају“ (енг. System for Hardware Radar Signal Processing for Early Detection of Automotive Obstacles) написана је на српском језику, у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду.

У оквиру докторске дисертације дати су: детаљна анализа постојећих решења, предлог и имплементација генератора хардверских инстанци за обраду радарских сигнала ради брзе детекције аутомобилских препрека, као и експериментална мерења која потврђују приказане теоријске резултате.

Најважније резултате проистекле из истраживања спроведеног у оквиру дисертације кандидат је публикувао у часопису са SCIE листе, као и на међународним конференцијама. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове, Комисија констатује да дисертација „Систем за хардверску обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају“ кандидата Николе Петровића садржи оригиналне научне доприносе.

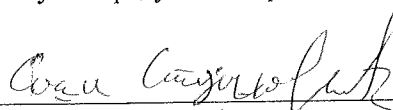
На основу претходног, Комисија констатује да је Никола Петровић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду да се докторска дисертација под називом „Систем за хардверску обраду радарских сигнала ради брзе детекције препрека у аутомобилском саобраћају“ 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.

У Београду, 23.01.2025. године

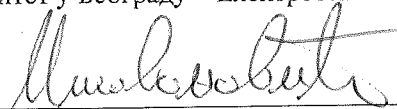
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Иван Поповић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Саша Стојановић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Владимир Миловановић, ванредни професор
Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука