

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Срђана Марјановића.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5047/09-3 од 5.10.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Срђана Марјановића под насловом

### **Монте Карло симулација транспорта позитрона у реалним системима испуњеним гасом.**

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 Срђан Марјановић уписао је докторске академске студије 2009. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду, као и додатно продужење за годину дана на основу Одлуке бр. 24-06/21-2009/5047 од 18.10.2016. године.

Тему за израду докторске дисертације под радним насловом „Монте Карло симулација транспорта позитрона у реалним системима испуњеним гасом“ пријавио је 07.05.2015. године. Комисија за студије III степена на седници одржаној 15.05.2015. године разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије за оцену подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање. Наставно-научно веће је, на седници одржаној 23.06.2015. године, именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5047/09-1 од 30.06.2015. године) у саставу:

- др Јован Радуновић, редовни професор  
Електротехничког факултета, Универзитета у Београду,
- др Саша Дујко, виши научни сарадник Института за физику, Универзитета у Београду,
- др Милан Меркле, редовни професор  
Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

За ментора су предложени академик Зоран Љ. Петровић, научни саветник Института за физику, Универзитета у Београду и др Јован Цветић, редовни професор Електротехничког факултета, Универзитета у Београду. Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације одржана је 30.06.2015. на Електротехничком факултету, пред комисијом, а у одсуству ментора. Кандидат је одговорио на сва питања комисије и добио оцену „задовољно“. Комисија за оцену подобности теме и кандидата је поднела извештај који је Комисија за студије III степена размотрила и упутила Наставно-научном већу на усвајање. Наставно-научно веће је на својој седници одржаној 10.07.2015. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5047/09-2). Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Срђана Марјановића под насловом „Монте Карло симулација транспорта позитрона у реалним системима испуњеним гасом“ (Одлука бр. 61206-44/2-15 од 19.10.2015. године).

Кандидат је 01.09.2016. године предао дисертацију на преглед и оцену. На седници одржаној 06.09.2016. године, Комисија за студије III степена потврдила је испуњеност свих потребних услова и Наставно-научном већу упутила предлог за именовање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. Наставно-научно веће је именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 5047/09-3 од 5.10.2016. године), у саставу:

- др Зоран Љ. Петровић, научни саветник, Институт за физику у Београду
- др Јован Цветић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,
- др Бранко Колунџија, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду
- др Братислав Иричанин, доцент, Електротехнички факултет у Београду

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација кандидата припада научној области електротехнике и ужој научној области физике транспорта наелектрисаних честица у гасовима за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Такође, дисертација припада и другим областима, попут физике позитрона и атомске и молекуларне физике.

Дисертација је урађена под руководством академика Зорана Љ. Петровића, научног саветника Института за физику Универзитета у Београду и др Јована Цветића, редовног професора Електротехничког факултета, Универзитета у Београду.

Академик Зоран Љ. Петровић је руководилац Центра за неравнотежне процесе Института за физику у Београду, Центра изврности Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Зоран Љ. Петровић је један од водећих светских истраживача у оквиру физике електричних гасних пражњења и физике неравнотежног транспорта наелектрисаних честица у гасовима. У досадашњем раду, објавио је преко 250 публикација у часописима са SCI листе, одржао је преко 100 предавања по позиву на међународним конференцијама и аутор је једне од најзначајнијих монографија у својој области истраживања, *Plasma Electronics: Applications in Microelectronic Device Fabrication*. Био је ментор и руководилац у великом броју докторских дисертација (око 20) и магистарских теза (преко 15) које су одбрањене на Електротехничком факултету и Физичком факултету Универзитета у Београду. Ангажован је као предавач на докторским студијама Електротехничког и Физичког факултета Универзитета у Београду, а био је гостујући професор на Кеио Универзитету у Јокохами у Јапану. Добитник је великог броја домаћих и интернационалних награда и признања за научни рад и технолошка достигнућа. Редовни је члан Српске академије наука и уметности и Академије инжењерских наука Србије.

Др Јован М. Цветић је редовни професор Електротехничког факултета у Београду и шеф Катедре са Микроелектронику и техничку физику у истој установи. Јован М. Цветић је један од водећих светских истраживача у оквиру физике електричних гасних пражњења посебно у области атмосферских пражњења у тропосфери. Објавио је преко 80 научних радова и преко 20 публикација са SCI листе, одржао је више предавања по позиву на међународним конференцијама. Коаутор је три уџбеника и збирке задатака из општег курса физике. Руководио је са више тржишних пројеката, а руководилац је пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја под називом „Електродинамика атмосфере у урбаним срединама Србије“. Био је ментор и руководилац у две докторске дисертације и више магистарских теза.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Срђан Марјановић рођен је 21.09.1985. у Београду, где је завршио основну школу и гимназију. Електротехнички факултет у Београду – смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника, на Одсеку за физичку електронику, уписао је 2004. године. Дипломирао је 2008. године са просечном оценом 9.40 са темом „Израчено ЕМ поље (LEMP) према GTCS моделу атмосферског пражњења облак-Земља“ под менторством проф. др Јована Цветића.

Последипломске мастер студије уписао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника и завршио их 2009. Године са просечном оценом 10. Мастер рад на тему „Термализација позитронијума у хелијуму је одбранио 2009. Године под менторством проф. Др Зорана Љ. Петровића. Докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду – смер Наноелектроника и фотоника уписује 2009. године.

Срђан Марјановић је у радном односу од 01.10.2008. године у Институту за физику у Београду, у Лабораторији за гасну електронику Института за физику у Београду под руководством проф. др Зорана Љ. Петровића. Од 2010. године је у звању истраживач сарадник.

Коаутор је дванаест научних радова објављених у међународним часописима као и већем броју радова на научним конференцијама. Одржао је и два уводна предавања на значајним међународним конференцијама а био је и коаутор на већем броју уводних предавања.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација је обликована према Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14.12.2011. године. Састоји се од насловне стране на српском и енглеском језику, стране са подацима о ментору и члановима комисије, резимеа на српском и енглеском језику, садржаја, текста рада подељеног у поглавља, списка коришћене литературе, додатка и стране са биографијом аутора. Дисертација обухвата 225 страна са 79 слика, 6 табела и 184 библиографске референце. Текст дисертације обликован је кроз следећа поглавља:

1. Увод
2. Метода – Монте Карло симулација
3. Подаци о сударним пресецима
4. Моделовање Сурко трапа
5. Оптимизација Сурко трапа

6. Компресија снопа позитрона ротирајућим електричним пољем
7. Транспорт позитрона у биолошкој средини
8. Закључак

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу дат је историјски осврт на развој физике позитрона, описани су фундаментални процеси анихилације, као и везано стање позитрона у виду позитронијума. Посебан акценат стављен је на прекретнице које су омогућиле значајне помаке у истраживању позитрона попут открића модерираних снопова нискоенергијских позитрона, а затим и позитронских трапова. Описане су тренутно актуелне примене позитрона у области фундаментане физике, испитивања материјала и у медицини. На крају поглавља дат је кратак преглед садржаја дисертације.

Друго поглавље посвећено је опису Монте Карло технике транспорта наелектрисаних честица у гасовима. Разматран је појам „роја“ честица и начин на који се он моделује у Монте Карло рачунарским симулацијама. Детаљан опис Монте Карло кода коришћеног у изради дисертације је дат кроз потпоглавља која описују процедуре за одређивање тренутка и типа судара наелектрисане честице и атома/молекула позадинског гаса, укључивање термалних ефеката, решавање расејања честице и неконзервативних судара. На крају поглавља описане су процедуре и тест прорачуни за верификацију рачунарског кода.

У трећем поглављу описани су сетови сударних података за интеракцију позитрона са молекулима од интереса који су коришћени у овој дисертацији. Анализирани молекули подразумевају азот, угљеник-тетрафлуорид и молекул воде. За сваки од усвојених пресека дат је оригиналан извор из литературе.

Четврто поглавље је посвећено моделовању позитронског (Сурко) трапа. Најпре је детаљно описан рад постојећих трапова који се редовно користе у експериментима а затим представљен модел који је коришћен у оквиру дисертације за анализу рада трапа. Представљени су резултати генеричког модела трапа који је искоришћен да се идентификују појединачни процеси који утичу на перформансе уређаја. Детаљно је анализирана и описана еволуција најпре енергијске а затим и просторне расподеле позитрона у трапу. У наредним потпоглављима су оптимизовани појединачни параметри трапа за усвојену геометрију електрода и то најпре притисак азота у првом степену трапа, а затим и електрични потенцијал на електродама. Анализирани су резултати симулације оптимизованог трапа који су показали значајно боље перформансе од првобитно анализираних генеричког модела, али и указали на ограничења стандардног дизајна трапа. Приказани су и резултати симулације двостепеног позитронског трапа који заобилази нека од ограничења у ефикасности траповања на рачун просторне резолуције излазног снопа.

У петом поглављу дат је предлог новог дизајна позитронског трапа који уместо стандардно коришћеног азота за позадински гас користи угљеник-тетрафлуорид у првом и другом степену. Приказани су резултати рачунарских симулација, у којима је анализиран утицај појединачних параметара на рад трапа, који показују да предложени модел обећава значајно боље перформансе. Такође су анализирани и различити модели диференцијалног пресека за интеракцију позитрона са угљеник-тетрафлуоридом и њихов утицај на ефикасност траповања. Описан је експериментални покушај да се постојећи стандардан позитронски (Сурко) трап прилагоди за траповање помоћу угљеник-тетрафлуорида. Урађен је низ мерења са једним пролазом снопа кроз трап, која су упоређена са симулацијом и дала добро слагање.

Шесто поглавље посвећено је симулацији компресије снопа позитрона у трапу ротирајућим електричним пољем. Најпре је описано идеално електрично и магнетско поље потребно да би се остварио ефекат компресије, а затим и приказан начин прорачуна трајекторије у

диполном ротирајућем електричном пољу у акумулационом степену трапа. Анализирани су резултати симулација који демонстрирају постојање ефекта компресије као последице комплексне трајекторије позитрона и интеракције позитрона са честицама гаса. Размотрен је допринос појединачних сударних процеса, као и различитих параметара поља и састава гаса брзини компресије облака позитрона.

Поглавље седам је посвећено транспорту позитрона у биолошкој средини. Најпре је представљена теорија која се тренутно користи за моделовање утицаја позитронског (и другог) зрачења. Затим су приказане разлике у транспорту електрона (који се тренутно користе и при опису позитронског зрачења) и позитрона у води, које настају услед различитих сударних особина на нижим енергијама. Демонстрирана је неопходност квалитетнијих сударних података за позитроне са молекулом воде, указано на потребу за експериментима са позитронским ројевима, и предложене величине које би биле погодне за експериментално разматрање. Затим је формиран и образложен модел органског ткива и анализирани су трајекторије позитрона и секундарних електрона у таквом моделу. Коначно, анализирана је корелација стандардних дозиметријских величина, попут профила депоноване енергије или учесталости јонизационих догађаја са појединачним, стохастичким догађајима оштећења биолошког материјала.

Последње, осмо, поглавље у форми закључка сумира најзначајније резултате дисертације. У оквиру сваког од разматраних система, експлицитно је наведено тренутно стање у оквиру одговарајуће области и конкретан научни допринос који је последица рада приказаног у овој дисертацији.

Након списка коришћене литературе, у оквиру додатка дата су три одељка. У првом су приказани резултати тест прорачуна којим је валидиран коришћен рачунарски код у различитим моделима. У другом су дабеларно дати подаци о сударним пресецима позитрона са молекулима од интереса за ову дисертацију. У трећем је дат пример рачунарског Монте Карло кода коришћеног за симулацију рада позитронског трапа, са релевантним улазним датотекама.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Тема докторске дисертације свакако припада савременим областима истраживања и кроз примарно теоријски приступ разматраним системима нуди јединствен увид у њихов рад, ограничења и начине на које се могу оптимизовати или побољшати.

Позитронски трапови су данас примарно оруђе у највећем броју експеримената са позитронима, почев од непресушне области мерења, увек неопходних, нових и прецизнијих сударних пресека за интеракцију позитрона са атомима и молекулима, преко карактеризације и испитивања особина материјала, па до експеримената на самој граници науке попут формирања Бозе-Ајнштајн кондензата позитронијума, стварања атома и молекула антиводоника у оквиру ALPHA експеримента или мерења утицаја гравитације на антиматерију у оквиру GBAR експеримента у CERN-у. Сваки од ових експеримената захтева што већи број хладних позитрона у трапу и у том смислу ефикаснији трапови и хладнији позитрони су врло пожељни, поготово када се узме у обзир цена и радни век позитронских извора. Иако је први позитронски Сурко трап конструисан пре више од двадесет година, његов дизајн и принцип рада се није битније мењао, а побољшање перформанси се догађало постепено кроз ситне помаке и емпиријске покушаје. Анализа рада трапа урађена у овој дисертацији представља прво и тренутно једино теоријско разматрање рада трапа са детаљном квантитативном анализом остварених перформанси. Уколико предложена измена принципа траповања у пракси оправда теоријска очекивања приказана у дисертацији то би

предстаљало изузетан напредак и омогућило нове, квалитетније и понегде јефтиније експерименте у комплетном пољу позитронске физике. До сада је феноменолошки опис трапова био базиран на моноенергијским сноповима што је свакако неадекватно и не може да опише позни развој роја позитрона и предвиди времена термализације. Истовремено треба напоменути да је покренута линија истраживања од стране оригиналног конструктора позитронског трапа, Клифорда Сурка на тему моделовања термализације по узору на наше симулације. Он и његови сарадници су урадили Монте Карло симулацију, пошто су наши резултати већ публиковани а они детаљно упознати и са тим и са другим постигнутим резултатима. У тој симулацији је претпостављена Максвел Болцманова функција расподеле позитрона што води у велике грешке у просторно временским расподелама.

Као једна од битних компоненти многих модерних позитронских трапова, компресија роја позитрона ротирајућим електричним пољем је ефекат који је опажен али не и у потпуности схваћен. Постоје случајеви реализованих трапова, који по својој конструкцији поседују све елементе за примену ове технике за компресију, али у којима, у пракси, компресија није успешно остварена а постоје и они у којима јесте. У оваквим случајевима је важно добро познавати које особине система су кључне за остваривање ефекта. Такође, једина претходна и од нас независна теоријска анализа овог проблема користила је једноставну флуидну једначину са вискозним чланом као комплетним описом ефеката судара. Ова дисертација не пати од апроксимација тог типа, а представљена анализа демонстрира порекло ефекта компресије на нивоу трајекторије појединачне честице и судара позитрона са молекулима позадинског гаса.

Савремена радиолошка и дозиметријска пракса приликом ПЕТ дијагностике своје нормативе базира на теоријским прорачунима који су поистовећивали електрон са позитроном, односно користили електронске податке за опис интеракције позитрона са ткивима. Недавна мерења позитронских пресека за интеракцију са молекулом воде, као и упоредне анализе транспорта позитрона и електрона у воденој пари, показала су да оваква апроксимација није валидна поготово на ниским енергијама. Такође, показано је да и нискоенергијски електрони могу довести до различитих оштећења молекула ДНК кроз процес дисоцијативног захвата. У том смислу потребна је ревизија дозиметријских норматива, која би са једне стране своје прорачуне базирала на адекватним подацима, а са друге стране узела у обзир и стохастичку природу процеса оштећења молекула ДНК. Поменути проблеми су разматрани у овој дисертацији.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература коришћена у дисертацији је наведена кроз више од 100 референци. Цитирани су актуелни радови из угледних међународних часописа, саопштења са конференција, прегледни радови и докторске дисертације. Наведени списак литературе указује да је кандидат прегледао и цитирао референтне изворе из области физике позитрона, позитронских трапова, транспортне теорије ројева наелектрисаних честица у гасовима и радијативног оштећења ткива, који су релевантни за тему дисертације. У дисертацији су такође цитирани и радови самог кандидата.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Дисертација се бави нумеричким симулацијама транспорта позитрона у гасу, у различитим системима и у ту сврху коришћена је Монте Карло техника за опис транспорта наелектрисаних честица у гасовима. Монте Карло симулација јесте један од начина да се имплицитно реши Болцманова једначина и опише понашање роја позитрона (или електрона) у гасу, у различитим условима електромагнетског поља. Истовремено Монте

Карло симулација представља нумерички експеримент у који се могу директно укључити гранични услови. Иако је Монте Карло мање ефикасна, или временски захтевнија, нумеричка метода од конкурентних метода решавања Болцманове једначине, као што су *two-term*, или *multi-term* моментне методе, Монте Карло техника је у стању да опише рој у нехидродинамичким условима који се јављају у системима описаним у дисертацији. Нехидродинамичност у описаним системима је последица неконзервативности процеса формирања позитронијума али и ограничене геометрије система и процеса на границама као и нехомогености и нестационарности електричног поља у случају компресије ротирајућим пољем. Имплементација компликоване геометрије и граничних услова у моментним методама је врло захтевна и ту Монте Карло техника захваљујући својој флексибилности има значајну предност.

Други аспект примењивости одабране методе односи се на адекватност примене методе ројева, односно апроксимације ансамбла позитрона (електрона) појмом роја наелектрисаних честица. У сва три анализирана система концентрација наелектрисаних честица је далеко испод нивоа у којем је релевантан утицај просторног наелектрисања или кулоновска интеракција између појединачних честица посматраног роја. Управо због природе позитрона, који се у интеракцији са електронима губе кроз процес анихилације, формирање позитронске плазме је предмет комплексних и скувих експеримената и представља значајан подухват. Такође, генерално мале густине и мали број нискоенергијских позитрона су једна од главних мотивација ове дисертације.

Из наведених разлога одабрана техника Монте Карло симулације, којом су описана сва три система разматрана у дисертацији, јесте у потпуности одговарајућа метода која је омогућила детаљно праћење временског и просторног развоја роја позитрона и електрона у реалним условима експеримента.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Уопштено гледано, дисертација се бави реалним проблемима у постојећим експерименталним системима, што претпоставља применљивост остварених резултата. У области моделовања позитронских трапова применљивост је евидентна. Формирани модел, поред успешног предвиђања и описа рада постојећих трапова, пружио је увид у процесе који ограничавају ефикасност траповања. То је омогућило формирање новог модела трапа који за траповање у првом сегменту користи угљеник-тетрафлуорид, и који обећава и два до три пута већу ефикасност траповања позитрона, као и друге предности, попут ужег излазног снопа и краћег времена термализације у зависности од примене трапа. Кроз експеримент и симулацију је показано да је конверзија постојећих, стандардних позитронских трапова, на предложени метод траповања тешко изводива, првенствено због неусклађености магнетских поља у области извора позитрона и у области самог трапа, али да би овај начин рада трапа требало имати у виду при конструкцији нових трапова, јер у зависности од примене може довести или до побољшаних карактеристика направе, или пак до трапа са стандардним карактеристикама али мањом ценом израде.

Модел, односно нумеричка симулација компресије снопа позитрона ротирајућим електричним пољем успешно моделује компресију у експерименталним условима. Иако није могуће директно квантитативно поређење због различитог позадинског гаса коришћеног у симулацији и у експерименту, квалитативно слагање је врло добро. То омогућава експерименталним истраживачима који имају потешкоће у реализације компресије да анализирају своје системе и упореде их са симулацијом како би прилагодили параметре поља и избегли губитак позитрона кроз формирање позитронијума или лакше подесили резонантну фреквенцу и остварили бољу компресију.

Резултати остварени у оквиру моделовања транспорта позитрона у биолошкој средини су, у поређењу са претходно анализираним резултатима, најмање директно примењиви, из

разлога што позитронски подаци за интеракцију са молекулом воде нису у потпуности познати и за неке од важних процеса, као што је на пример расподела енергије приликом јонизације молекула воде позитроном, ова дисертација и даље користи електронске податке. Самим тим, и ова дисертација пати од проблема на које указује а који су првенствено узроковани недостатком добрих података за интеракцију позитрона са молекулом воде и сложеним органским молекулима. Ипак ова дисертација представља важан корак ка формирању комплетног модела интеракције позитрона са ткивом. Поготово су важни резултати корелације (односно недостатка исте) енергије коју депонује високоенергијска честица и стохастичких догађаја оштећења органских молекула, који указују на потребу за ревизијом дозиметријских модела.

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

Од почетка истраживања до реализације дисертације, кандидат је прошао кроз неколико фаза. Изабрана је актуелна тема из области позитронске физике чије истраживање доприноси различитим областима, преко фундаменталних истраживања, физике честица, или физике материјала до медицинске примене позитрона. Наведена литература указује да је кандидат пажљиво прегледао и проучио релевантне и савремене изворе из области физике позитрона, позитронских трапова и утицаја позитронског зрачења, као и теорије и нумеричких метода потребних за моделовање. Нумеричка реализација ових модела захтевала је посебно програмерско умеће, као и примену савремених мултипроцесорских рачунарских система високих перформанси. Како се дисертација бави изворима нискоенергијских позитрона, који су критичан део већине позитронских експеримената, објављени резултати су релевантни за комплетно поље позитронске физике. Такође су остварени важни резултати и у оквиру медицинских примена позитрона. Добијени резултати су објављени у врхунским међународним часописима и презентовани на више међународних конференција. Коначно, сама докторска дисертација је припремљена и обликована у складу са добром праксом у светској научној заједници. На основу наведеног, комисија сматра да је кандидат показао високи степен способности за самосталан научни рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Из резултата приказаних у дисертацији могу се издвојити следећи оригинални научни доприноси:

- Развијен је модел позитронског трапа и одговарајућа рачунарска симулација која описује транспорт позитрона унутар трапа и предвиђа перформансе направе.
- Описани модел представља прву нумеричку квантитативну анализу процеса траповања позитрона засновану на мереним сударним пресецима за позитроне.
- Коришћењем развијене рачунарске симулације одређен је удео различитих процеса губитка позитрона и по први пут идентификован процес расејања уназад као важан мод губитка позитрона из трапа.
- Предложен је нови метод траповања позитрона који уместо стандардно коришћеног азота, користи угљеник-тетрахлорид за траповање позитрона и који нуди значајно побољшане перформансе трапа.



- Утврђени су конструкцијски недостаци који спречавају конверзију најчешће коришћених позитронских трапова на нови метод траповања и утврђене смернице којих би се требало придржавати при дизајну нових трапова.
- Формиран је модел, и реализована рачуарска симулација ефекта компресије облака позитрона применом ротирајућег електричног поља.
- Први пут је објашњено порекло ефекта компресије облака позитрона применом ротирајућег електричног поља, без апроксимација у третману интеракције позитрона са позадинским гасом.
- Уочено је загревање роја позитрона при компресији ротирајућим електричним пољем и губитак позитрона кроз процес формирања позитронијума, који нису могли бити опажени у експериментима у литератури услед начина на који је мерена брзина компресије.
- Идентификован је допринос различитих типова сударних процеса позитрона са позадинским гасом ефекту компресије.
- Формиран је модел биолошке средине и реализована рачуарска симулација завршног дела путање високоенергијског позитрона и секундарних електрона у ткиву заснована примарно на мереним сударним пресецима за позитроне у воденој пари.
- Утврђено је непостојање директне просторне корелације енергије депоноване у ткиву, и стохастичких догађаја оштећења биолошког материјала.
- Понуђене су мерљиве величине попут домета честица, депоноване енергије или средње енергије честица као начин да се сетови пресека за интеракцију позитрона са молекулом воде нормализују на експериментална мерења по узору на експерименте са ројевима електрона.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Позитронски трапови се користе више од двадесет година. Највећа еволутивна промена у односу на оригинални Сурков дизајн трапа јесте имплементација двостепених трапова који су погодни за коришћење у импулсном режиму. Осим тога, свако унапређење је било оптимизација у смислу побољшања квалитета појединачних елемената или комбинација више трапова у једну направу (*multicell* дизајн) али принцип рада је остао исти. Објашњење рада трапа је било на феноменолошком нивоу кроз терминологију снопова позитрона и дискретних енергијских губитака, без детаљне нумеричке анализе. Симулација представљена у овој дисертацији демонстрира рад трапа, уз први детаљан нумерички прорачун интеракције позитрона са позадинским гасом у трапу. Овакав приступ омогућио је детаљну анализу рада трапа, и идентификацију различитих процеса који утичу на ефикасност. Посебно се истиче процес расејања уназад услед судара са молекулима гаса који у литератури није разматран као значајан чинилац као и одређивање физичког ограничења ефикасности тростепеног трапа услед облика пресека за интеракцију позитрона са позадинским азотом. Како је процес формирања позитронијума на молекулима азота од раније препознат као најзначајнији процес губитка позитрона, у дисертацији је предложен модел трапа који користи угљеник-тетрафлуорид, чија је детаљна симулација урађена, који заобилази процес формирања позитронијума у потпуности, и тако превазилази физичко ограничење ефикасности траповања које постоји у стандардним позитронским траповима. Спровођењем експерименталног истраживања покушана је конверзија постојећег позитронског трапа на предложени, нови, начин рада који користи угљеник-тетрафлуорид за траповање. Иако траповање није успешно остварено, кроз експеримент и каснију симулацију утврђена су конструкцијска ограничења која спречавају конверзију стандардних трапова. Као резултат, предложене су смернице којих би се требало придржавати при конструкцији нових трапова како би били погодни за рад у овом новом режиму. Приказане симулације показују да предложени начин траповања може дати и два до три пута већу

ефикасност, као и краћа времена термализације и акумулације позитрона за већи укупан број позитрона у импулсном режиму рада трапа. То доводи до повећане прецизности постојећих експеримената, али и до значајних уштеда у времену а тиме и у новцу.

У оквиру истраживања ефекта компресије роја позитрона, формиран модел и припадајућа рачунарска симулација, недвосмислено су показале да је ефекат компресије последица особина трајекторије позитрона у комплексним условима поља, и пресека за интеракцију позитрона са молекулима позадинског гаса. Једини претходни покушај објашњења овог феномена уводио је грубе апроксимације за интеракцију позитрона са гасом потпуно занемарујући природу те интеракције. Детаљним Монте Карло приступом, приказаним у овој дисертацији, не само што је демонстриран механизам компресије него је и откривено иницијално загревање роја позитрона што у коначном доводи и до губитка одређеног броја честица кроз процес формирања позитронијума. Овај ефекат није било могуће уочити експериментално зато што се компресија ротирајућим електричним пољем користила да продужи време акумулације тиме што ће спречити дифузију претходно акумулираних позитрона на зидове направе. Тиме што је ефективно акумулиран већи број позитрона током дужег времена ефекат губитка позитрона услед иницијалног загревања је био маскиран и неопажен. Из истог разлога, није разматрана улога сударних процеса са вишим прагом на ефекат компресије, и сматрано је да су вибрациони судари кључни за постизање ефекта. Анализом приказаном у дисертацији је показано да вибрациона екситација молекула позадинског гаса заиста представља најзначајнији сударни процес, али и да процеси са вишим енергијским прагом, попут електронске екситације или јонизације имају улогу у остваривању пуне компресије.

Дозиметријска разматрања примене позитрона у медицини, првенствено у оквиру ПЕТ дијагностике су, због недостатка мерених података, користила податке за интеракцију електрона са водом, како би описала транспорт позитрона у биолошки релевантним срединама. Оваква претпоставка је оправдана у енергијском опсегу који је стандардно разматран у доступним рачунарским моделима, који прате позитроне са највиших, до енергија од 10 keV. Недавно је показано да кроз процесе дисоцијације и дисоцијативног захвата и нискоенергијски електрони могу довести до једноструких, двоструких и вишеструких прекида у молекулу ДНК што указује да је за потпун опис утицаја позитронског зрачења на ткиво неопходно пратити позитроне и секундарне електроне до термалних енергија. Такође је показано да због разлике у интеракцији са молекулом воде на ниским енергијама долази и до квалитативно другачијег транспорта нискоенергијских електрона и позитрона у воденој пари. Ова дисертација приказује модел биолошке средине у којем описује завршетак трајекторије високоенергијског позитрона и секундарних електрона које је произвео. За опис интеракције позитрона са средином водене паре користи све последње доступне мерене позитронске сударне пресеке, док недостајуће попуњава одговарајућим апроксимацијама где је то оправдано. Како интеракција позитрона и електрона са великим, биолошким молекулима попут молекула ДНК није добро позната, за опис оштећења ткива користи се моделни процес дисоцијације молекула метана, што ефективно представља прекид C-H везе. На овај начин представљени модел истовремено описује транспорт позитрона (и секундарних електрона) у ткиву помоћу стандардних дозиметријских величина, попут броја јонизационих догађаја или депоноване енергије, али и стохастичких догађаја оштећења биолошког материјала, што понуђени модел чини комплетнијим. Поређењем ова два приступа, показује се да просторни профили јонизације и депоноване енергије донекле одступају од просторне расподеле судара који доводе до оштећења биолошког материјала. Тиме ова дисертација указује на важну потребу да се прихваћени модели ревидирају како би се узели у обзир и стохастички догађаји који доводе до оштећења ткива али и формирали сетови пресека за интеракцију позитрона са водом који су директно мерени у експериментима. У том смислу, како би се формирани сет пресека нормирао и валидирао, неопходни су додатни експерименти са ројевима позитрона (попут експеримената са ројевима електрона) у воденој пари. У овој дисертацији извршен је

прорачун и понуђено је неколико различитих мерљивих величина које би могле послужити за нормализацију пресека попут домета или укупне депоноване енергије. На тај начин, анализа урађена у овој дисертацији представља важан корак ка бољим моделима и тачнијем и релевантнијем опису утицаја позитронског зрачења на ткиво.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси остварени у оквиру докторске дисертације објављени су у следећим публикацијама сврстаним у категорије према Правилнику о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије:

##### Категорија M21:

1. **Marjanović, S.**, Banković, A., White, R. D., Buckman, S. J., Garcia, G., Malović, G., Dujko, S., Petrović, Z. Lj.: Chemistry induced during the thermalization and transport of positrons and secondary electrons in gases and liquids, - *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 025016 (1-7), 2015, (**IF=2.808**) (ISSN: 0963-0252).  
Digital Object Identifier: 10.1088/0963-0252/24/2/025016
2. Petrović, Z. Lj., **Marjanović, S.**, Dujko, S., Banković, A., Malović, G., Buckman, S., Garcia, G., White, R. D., Brunger, M.: On the use of Monte Carlo simulations to model transport of positrons in gases and liquids, - *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 83, pp. 148-154, 2014, (**IF=1.231**) (ISSN: 0969-8043)  
Digital Object Identifier: 10.1016/j.apradiso.2013.01.010
3. Banković, A., Dujko, S., White, R. D., Marler, J. P., Buckman, S. J., **Marjanović, S.**, Malović, G., Garcia, G., Petrović, Z. Lj.: Positron transport in water vapor, - *New Journal of Physics*, vol. 14, pp. 035003 (1-23), 2012, (**IF=4.063**) (ISSN: 1367-2630)  
Digital Object Identifier: 10.1088/1367-2630/14/3/035003

##### Категорија M22

1. **Marjanović, S.**, Bankovic, A., Cassiy, D., Cooper, B., Deller, A., Dujko, S., Petrović, Z. Lj.: A CF<sub>4</sub> based positron trap, - *Journal of Physics. B: Atomic Molecular and Optical Physics*, vol. 49, pp. 215001 (1-12), 2016, (**IF=1.833**) (ISSN: 0953-4075)  
Digital Object Identifier: 10.1088/0953-4075/49/21/215001
2. Blanco, F., Roldán, A. M., Krupa, K., McEachran, R. P., White, R. D., **Marjanović, S.**, Petrović, Z. Lj., Brunger, M. J., Machacek, J. R., Buckman, S. J., Sullivan, J. P., Chiari, L., Limão-Vieira, P., García, G.: Scattering data for modelling positron tracks in gaseous and liquid water, - *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 49, no. 14, pp. 145001 (1-10), 2016, (**IF=1.833**) (ISSN: 0953-4075)  
Digital Object Identifier: 10.1088/0953-4075/49/14/145001
3. **Marjanovic, S.**, Suvakov, M., Bankovic, A., Buckman, S. J., Petrovic, Z. Lj.: Numerical Modeling of Thermalization of Positrons in Gas-Filled Surko Traps, - *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 11, pp. 2614-2615, 2011, (**IF=1.174**) (ISSN: 0093-3813)  
Digital Object Identifier: 10.1109/TPS.2011.2159129

### Kategorija M23

1. Banković, A., Dujko, S., **Marjanović, S.**, White, R. D., Petrovic, Z. Lj.: Positron transport in CF<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub> mixture, - *The European Physical Journal D*, vol. 68, no. 5, pp. 127 (1-10), 2014, (IF=1.228) (ISSN: 1434-6060)  
Digital Object Identifier: 10.1140/epjd/e2014-50087-5
2. **Marjanovic, S.**, Cvetic, J.: Conductivity of a Lightning-Channel Corona Sheath During Return Stroke, - *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 6, pp. 750-758, 2009, (IF=1.043) (ISSN: 0093-3813)  
Digital Object Identifier: 10.1109/TPS.2009.2016202

### Kategorija M14

1. **Marjanović, S.**, Banković, A., Šuvakov, M., Petrović, Z. Lj.: Monte Carlo modelling of positron transport in real world applications, 18th International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies, - *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 514, pp. 012046 (1-6), 2014, (ISSN: 1742-6588)  
Digital Object Identifier: 10.1088/1742-6596/514/1/012046
2. Petrović, Z. Lj., **Marjanović, S.**, Dujko, S., Banković, A., Šašić, O., Bošnjaković, D., Stojanović, V., Malović, G., Buckman, S., Garcia, G., White, R., Sullivan, J., Brunger, M.: Kinetic Phenomena in Transport of Electrons and Positrons in Gases caused by the Properties of Scattering Cross Sections, XXVIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2013) - *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 488, pp. 012047 (1-9), 2014, (ISSN: 1742-6588)  
Digital Object Identifier: 10.1088/1742-6596/488/1/012047
3. Petrović, Z. Lj., Banković, A., Dujko, S., **Marjanović, S.**, Malović, G., Sullivan, J. P., Buckman, S. J.: Data for Modeling of Positron Collisions and Transport in Gases, In Proceedings of the Eight International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications: ICAMDATA-8, - *AIP Conference Proceedings*, vol. 1545, pp. 15-131, 2013, (ISSN: 0094-243X)  
Digital Object Identifier: 10.1063/1.4815846
4. Petrović, Z. Lj., Banković, A., **Marjanović, S.**, Šuvakov, M., Dujko, S., Malović, G., White, R. D., Buckman, S. J.: Positrons in gas filled traps and their transport in molecular gases, 12<sup>th</sup> International workshop on slow positron beam techniques, 1-6th August, 2010 Magnetic Island, Australia (SLOPOS12) - *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 262, pp. 012046 (1-4), 2011, (ISSN: 1742-6588)  
Digital Object Identifier: 10.1088/1742-6596/262/1/012046
5. Petrović, Z. Lj., Banković, A., Dujko, S., **Marjanović, S.**, Šuvakov, M., Malović, G., Marler, J. P., Buckman, S.J., White, R. D., Robson, R. E.: On new developments in the physics of positron swarms, XV International Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics, - *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 199, pp. 012016 (1-6), 2010, (ISSN: 1742-6588)  
Digital Object Identifier: 10.1088/1742-6596/199/1/012016

#### Kategorija M31:

1. **Marjanović, S.**, Banković, A., Dujko, S., Petrović, Z. Lj.: "Modeling of positron and electron transport in gases and liquids," - *22nd Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases (ESCAMPIG)*, July 15-19, 2014 Greifswald, Germany

#### Kategorija M33:

1. **Marjanović, S.**, Banković, A., Šuvakov, M., Mortensen, T., Deller, A., Isaac, C. A., van der Werf, D. P., Charlton, M., Petrović, Z. Lj.: "Collision-driven positron cloud expansion – experiment and simulation," *26th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases*, August, 27 - 31, 2012, Zrenjanin, Serbia, p.333-336.
2. **Marjanović S.**, Šuvakov M., Petrović, Z. Lj. "Monte Carlo simulation of positron trapping efficiency," *26th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases*, August, 27 - 31, 2012, Zrenjanin, Serbia, p. 337-340.

#### Kategorija M34:

1. Is a set of cross sections for positron scattering in H<sub>2</sub> complete?  
S. Dujko, A. Banković, **S. Marjanović**, R.D. White, Z.Lj. Petrović  
*Gaseous Electronics Meeting GEM2016* Geelong, p113  
Australia, February 14-17, 2016
2. Swarms as an exact representation of weakly ionized gases  
Zoran Lj. Petrović, Saša Dujko, Dragana Marić, Danko Bošnjaković, **Srdan Marjanović**,  
Jasmina Mirić, Olivera Šašić, Snježana Dupljanin, Ilija  
Simonović, Ronald D. White  
*XIX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms*  
Lisboa, Portugal, p4  
17-21 July, 2015
3. Swarms as an exact representation of weakly ionized gases  
Z. Lj. Petrović, S. Dujko, D. Marić, D. Bošnjaković, **S. Marjanović**, J. Mirić, O. Šašić, S.  
Dupljanin, I. Simonović, R. D. White  
*XVIII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics*  
Lisboa, Portugal, p4  
17-20 July, 2015
4. Cross Sections for Scattering of Electrons and Positrons in Modeling of Ionized Gases  
and Non-Equilibrium Plasmas  
Z. Lj. Petrović, S. Dujko, J. Mirić, D. Bošnjaković, A. Banković, **S. Marjanović**, D. Marić,  
J. Sivoš, N. Škoro, M. Savić, O. Šašić and G. Malović  
*International Symposium on Non-equilibrium Plasma and Complex-System Sciences*  
(IS-NPCS) Icho Kaikan, Osaka University, Osaka, Japan, p106  
26-28 February, 2014
5. Avalanches of Electrons and Positrons in Atmospheres of Planets and Satellites of the  
Solar System: Basic Phenomenology and Application to Gas Breakdown in DC and RF  
Fields

Zoran Lj. Petrović, Ilija Adžić, Saša Dujko, Marija Savić, Srđan Marjanović, Dragana Marić, Marija Radmilović Rađenović, Gordana Malović and Antonije Đorđević  
*29th National Symposium on Plasma Science and Technology & International Conference on Plasma and Nanotechnology*  
8-11 December 2014, Kottayam, Kerala, India, pp. 18

6. Electron and Positron Transport in Gases at Higher Pressures: What may we learn from the physics of ionized gases  
Z.Lj. Petrović, **S. Marjanović**, A. Banković, R. D. White, S. Buckman, G. Malović, S. Dujko  
*Japan-Australia commemorative workshop - JAWS25*  
June 23-25, 2013, Canberra, Australia
7. Rotating wall compression of positron swarm in a harmonic potential: a Monte Carlo simulation  
**Srdjan Marjanovic**, Ana Bankovic, Milovan Suvakov, C. Aled Isaac, Dirk Peter van der Werf, Michael Charlton, Zoran Lj. Petrović,  
*Bulletin of the American Physical Society, 43rd Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics*, June 4-8, 2012, Anaheim, California, vol. 57, D1.00058.
8. On thermalization of positrons in water vapor  
**S. Marjanović**, A. Banković, S. Buckman, G. Garcia, R.D. White, M. Brunger, M. Suvakov, G. Malovic, S. Dujko and Z.Lj. Petrović  
*Bulletin of the American Physical Society, 43rd Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics*, June 4-8, 2012, Anaheim, California, vol. 57, Q1.00061
9. Numerical study of Penning-Malmberg-Surko positron trap efficiency  
**Srdjan Marjanovic**, Milovan Suvakov, Ana Bankovic, Zoran Lj. Petrovic  
*42nd Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics*  
June 13-17, 2011. Atlanta, Georgia, USA
10. Numerical modeling of positronium thermalization  
**S. Marjanović**, M. Šuvakov, J. J. Engbrecht, Z. LJ. Petrović  
*5th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems*  
Belgrade, Serbia, June 21 - 25, 2011
11. Numerical Modelling of Positron Traps  
**Srđan Marjanović**, Milovan Šuvakov, Zoran Lj. Petrović  
*XVI International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics*  
22 - 25 July 2011, Maynooth, Ireland
12. Plasma breakdown: Experiments and simulation  
D. Marić, M. Savić, **S. Marjanović**, N. Škoro, M. Šuvakov, M. Radmilović- Radjenović, G. Malović and Zoran Lj. Petrović  
*38th Conference on Plasma Physics*,  
Strasbourg, France, 27 June – 01 July 2011
13. Gas filled positron traps  
**S. Marjanović**, A. Banković, S. Dujko, M. Šuvakov, G. Malović and Z. Lj. Petrović,  
*38th Conference on Plasma Physics*,

Strasbourg, France, 27 June – 01 July 2011 P4.004

14. Numerical modeling of buffer gas positron traps  
**Srđan Marjanović**, Milovan Šuvakov and Zoran Lj. Petrović  
*64th Gaseous Electronics Conference, GEC2011*  
November 14-18, 2011, Salt Lake City, Utah, USA
15. Monte Carlo modeling of Surko type positron traps  
M. Šuvakov, **S. Marjanović**, A. Banković, Z. Lj. Petrović, S. J. Buckman, J. P. Marler  
*41st Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics*  
May 25-29, 2010 Houston, Texas, USA
16. Modeling of positron and Positronium Transport in Gases  
Z. Lj. Petrović, A. Banković, S. Dujko, M. Šuvakov, G. Malović, **S. Marjanović** and J. P. Marler  
*The 7th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing*, 23-26 April 2009, Chateau Liblice, Liblice, Czech Republic
17. On new developments in the physics of positron swarms  
Z. Lj. Petrović, A. Banković, M. Šuvakov, G. Malović, S. Dujko, S. Marjanović, J. P. Marler, S. J. Buckman, R. D. White and R. E. Robson  
*15<sup>th</sup> International workshop on low energy positron and positronium physics*, 29 July – 1. August 2009, York University, Toronto, Canada, p. 24
18. Transport and thermalization of positrons in molecular hydrogen  
A. Banković, S. Dujko, M. Šuvakov, **S. Marjanović**, G. Malović, J. P. Marler, Z. Lj. Petrović and R. D. White  
*15<sup>th</sup> International workshop on low energy positron and positronium physics*, 29 July – 1. August 2009, York University, Toronto, Canada, p. 51
19. Monte Carlo Simulation of Temporal and Spatrial relaxation of Positronium in Helium and water Vapour  
**S. Marjanović**, M. Šuvakov, J. Engbrecht and Z. Lj. Petrović  
*XV International Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics* (ed R. Campeanu, York University) 29.7-1.8 2009 Toronto. P35
20. Monte Carlo simulation of thermalization of positronium in helium and water vapour  
**S. Marjanović**, Z. Lj. Petrović  
*40th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics*  
May 19-23, 2009 Charlottesville, Virginia, USA

#### Kategorija M64:

1. Simulations of positron transport in materials of biological interest and their role in positron diagnostics development  
A. Banković, **S. Marjanović**, S. Dujko, R. D. White, J. P. Sullivan, S. J. Buckman, G. Garcia, M. J. Brunger and Z. Lj. Petrović  
*3rd National Conference on Electronic, Atomic Molecular and Photonic Physics*  
Belgrade, Serbia, August 25th, 2013

2. Numerical modeling of buffer gas positron traps  
S. Marjanović, M. Šuvakov and Z. LJ. Petrović  
2nd National Conference on Electronic, Atomic, Molecular and Photonic Physics  
Belgrade, Serbia, June 21 - 25, 2011

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Током истраживања и рада на дисертацији кандидат је показао висок степен способности за самосталан научноистраживачки рад. Докторска дисертација садржи бројне оригиналне научне доприносе у виду нових модела резултата и закључака из области транспорта позитрона, са акцентом на постојећим, експерименталним системима. Из тог разлога и добијени резултати имају велику примењивост у експерименталном истраживању и њихова примена се очекује, поготово у области извора нискоенергијских позитрона где могу довести до великог напретка у квалитету експеримената. Наведени резултати и модели објављени су у врхунским међународним часописима и приказани на угледним међународним конференцијама.

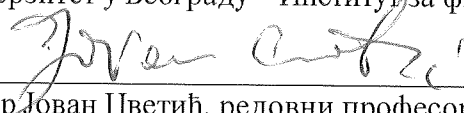
На основу изложеног, Комисија сматра да су испуњени сви суштински и сви формални услови предвиђени Законом о високом образовању и правилницима Електротехничког факултета и Универзитета у Београду. Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „Монте Карло симулација транспорта позитрона у реалним системима испуњеним гасом“ кандидата Срђана Марјановића прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 7. октобра 2016. године

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Зоран Љ. Петровић, научни саветник,  
Универзитет у Београду – Институт за физику



др Јован Цветић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Бранко Колунџија, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Братислав Иричанин, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет