

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Александре Крнете

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5005/12-3 од 25.01.2018. године (донетој на 822. седници одржаној 16.01.2018. године), именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Александре Крнете под насловом

„Функције базиса ултра високог реда и сингуларне функције базиса у анализи аксијално симетричних металних структура“

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

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

13.11.2012. године Александра Крнета је уписала докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Микроталасна техника, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. На докторским студијама положила је све испите са просечном оценом 10,0.

2.3.2017. године Александра Крнета је пријавила тему за израду докторске дисертације под радним називом „Функције базиса ултра високог реда и сингуларне функције базиса у анализи аксијално симетричних металних структура“.

7.3.2017. године Комисија за студије III степена размотрила је предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно-научном већу предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

14.03.2017. године, на 811. седници, Наставно-научно веће Електротехничког факултета именovalo је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5005/12-1 од 22.3.2017.године) у саставу:

- др Драган Олћан, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
 - др Братислав Миловановић, редовни професор, Универзитет Сингидунум у Београду
 - др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- За ментора је предложен
- др Бранко Колунџија, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

12.4.2017. године је обављена јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, пред комисијом у саставу

- др Драган Олћан, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Братислав Миловановић, редовни професор, Универзитет Сингидунум у Београду,
- др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

На одбрани су били присутни сви чланови комисије. Комисија је закључила да је кандидаткиња добила оцјену „задовољно“. Комисија је предложила да ментор докторске дисертације буде др Бранко Колунџија, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

16.5.2017. године, на 813. Седници, Наставно-научно веће Електротехничког факултета усвојило је Извештај Комисије за оцјену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5005/12-2 од 16.5.2017. године).

5.6.2017. године Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Александре Крнете, под насловом „Функције базиса ултра високог реда и сингуларне функције базиса у анализи аксијално симетричних металних структура“ (Одлука бр. 61206-2078/2-17 од 6.7.2017. године).

28.12.2017. године Александра Крнета је предала на преглед и оцјену докторску дисертацију под насловом „Функције базиса ултра високог реда и сингуларне функције базиса у анализи аксијално симетричних металних структура“.

10.1.2018. године Комисија за студије III степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Научно-наставном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцјену докторске дисертације.

16.1.2018. године на 822. седници Наставно-научно веће Електротехничког факултета именovalo је Комисију за преглед и оцјену докторске дисертације (Одлука бр. 5005/12-3 од 25.01.2018. године), у саставу

- др Бранко Колунџија, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Драган Олћан, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Бранка Јокановић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за Физику
- др Милан Илић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Миодраг Тасић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под називом „Функције базиса ултра високог реда и сингуларне функције базиса у анализи аксијално симетричних металних структура“ припада научној области Електротехника и рачунарство, ужа научна област Електромагнетика, антене и микроталаси, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор кандидата је др Бранко Колунџија, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, члан Катедре за општу електротехнику и члан Групе за микроталасну технику. Др Бранко Колунџија је изабран у звање редовног професора за исту научну област и држи наставу на основним, мастер и докторским студијама при Катедри за општу електротехнику. Активно се бави истраживањем из наведене научне области и аутор је или коаутор већег броја радова у међународним часописима са импакт фактором, који га квалификују за вођење ове дисертације. Релевантни радови ментора су наведени при пријави теме дисертације кандидаткиње.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Александра Крнета је рођена 2. јануара 1989. године у Београду, где је завршила основну школу “Младост” као носилац Вукове дипломе и ученик генерације, и Математичку гимназију као носилац Вукове дипломе. Током основне школе и гимназије освојила је 12 награда на Републичким и Савезним такмичењима из физике и математике, једну награду на Физичкој олимпијади Србије и велики број награда на градским и општинским такмичењима.

Електротехнички факултет у Београду уписала је 2007. године. Дипломирала је 15. јула 2011. године на Одсеку за телекомуникације и информационе технологије, Смер микроталасна техника, са просечном оценом 9,91, по четворогодишњем студијском програму. Дипломски рад „Моделовање антена на људском телу за бежичне сензорске мреже“, одбранила је са оценом 10, а ментор рада је био др Владимир Петровић, ванредни професор. По дипломирању проглашена је за студента са најбољим успехом међу студентима који су дипломирали 2010/2011 године на Одсеку за телекомуникације и информационе технологије.

Дипломске академске – мастер студије на Смеру за микроталасну технику, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, уписала је 2011. године. Мастер студије завршила је 27. септембра 2012. године са просечном оценом 10,00 по једногодишњем студијском програму. Мастер рад „Кружни антенски низ на диелектричној сфери за омнидирекционо и усмерено зрачење“, одбранила је са оценом 10, а ментор рада је био др Владимир Петровић, ванредни професор.

Докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписала је 13. новембра 2012. године на модулу за Микроталасну технику. На докторским студијама положила је свих 10 испита са просечном оценом 10,00.

Александра Крнета је запослена са пуним радним временом на Катедри за општу електротехнику Електротехничког факултета Универзитета у Београду од краја 2011. године. За сарадника у настави на годину дана за ужу научну област Електромагнетика, антене и микроталаси изабрана је 6. децембра 2011. године. За асистента за ужу научну област Електромагнетика, антене и микроталаси изабрана је 12. фебруара 2013. године, а поново је изабрана у исто звање 1. марта 2016. године.

Аутор је једног рада у врхунском међународном часопису (M21). Аутор или коаутор је два рада у часописима од међународног значаја са импакт фактором (M23), једног рада у часопису међународног значаја верификованог посебним одлукама (M24), осам радова на конференцијама међународног значаја (M33) и четири рада на конференцијама националног значаја (M63). Учесник је пројекта TP32005 Министарства за науку и технолошки развој републике Србије у оквиру којег је коаутор 28 техничких решења (M85). Сем тога учествовала је у међународном FP7 пројекту SALUS.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Функције базиса ултра високог реда и сингуларне функције базиса у анализи аксијално симетричних металних структура“ има укупно 147 страна. По форми и структури у свему одговара Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14.12.2011. године. Делови дисертације су

- насловна страна на српском и енглеском језику,

- страна са информацијама о ментору и члановима комисије,
- страна са изјавом захвалности,
- стране са подацима о докторској дисертацији на српском језику (3 стране) и енглеском језику (3 стране),
- садржај (2 стране)
- текст рада по главама:
 1. Увод (13 страна)
 2. Опис методе за анализу аксијално симетричних металних структура (18 страна)
 3. Нова метода за рачунање импедансних интеграла заснована на техници поништавања сингуларитета (55 страна)
 4. Ефикасно коришћење макс-орто функција базиса у развојима за струје ултра високог реда (22 стране)
 5. Сингуларне функције базиса (26 страна)
 6. Закључак (3 стране)
- списак литературе (9 страна)
- биографија аутора (1 страна)
- изјава о ауторству (1 страна)
- изјава о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада (1 страна)
- изјава о коришћењу (2 стране)

Дисертација садржи 74 слике, 6 табела и 99 једначина. Списак литературе садржи 117 библиографских јединица наведених по редоследу цитирања у тексту дисертације.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првој, уводној, глави указано је на значај нумеричке електромагнетике у савременом друштву. Наведене су најзначајније нумеричке методе у електромагнетици и њихове оптималне области примене. Образложени су предмет и значај истраживања докторске тезе. Дати су преглед и историјат развоја метода за анализу аксијално симетричних металних структура базираних на методи момената. Указано је на технике помоћу којих се анализа тих структура методом момената може учинити ефикаснијом и прецизнијом, а чија реализација представља циљеве ове дисертације. Такође, истакнута је мотивација за истраживање у наведеном смеру у оквиру дисертације, као и полазне хипотезе. Посебно су истакнути научни доприноси који су из ње проистекли у виду конкретних алгоритама за рачунање елемената системске матрице са жељеном тачношћу и имплементацију максимално ортогонализованих функција базиса и сингуларних функција базиса. На крају је укратко описана и даља структура дисертације.

У другој глави прво су описане структуре чије се електромагнетско (ЕМ) моделовање разматра у дисертацији. Изведена је интегрална једначина електричног поља која једнозначно дефинише непознату расподелу површинских струја индукованих на проводним површима. Представљена је метода момената и кораци које она подразумева у циљу формирања система линеарних једначина из интегралне једначине, а чијим се решавањем добија апроксимативно решење за расподелу површинских струја. У наставку је сваки од корака методе момената детаљно анализиран. Прво је разматрано геометријско моделовање аксијално симетричних структура зарубљеним конусима. Образложена је апроксимација непознате расподеле површинских струја сумом познатих функција базиса помножених непознатим коефицијентима који треба да се одреде, и анализиран је облик функција базиса

који је погодно изабрати у случају постојања аксијалне симетрије. Затим су изведени аналитички облици за елементе системске матрице (тзв. импедансне интеграле) и вектора слободних чланова у случају примене Галеркинове тест процедуре. На крају је коришћењем аксијалне симетрије показано да се четвороструки импедансни интеграл могу свести на троструке интеграле.

У трећој глави је разматрана нумеричка интеграција импедансних интеграла системске матрице. Назначено је да импедансни интеграл у одређеним ситуацијама испољавају сингуларно или квази-сингуларно понашање, па је њихова нумеричка интеграција директном применом Гаус-Лежандрових интеграционих формула неефикасна. За почетни облик функција базиса изабране су модификоване функције базиса вишег реда, а импедансни интеграл су представљени као линеарна комбинација импедансних интеграла услед степених функција, тзв. P -интеграла. За рачунање сингуларних и квази-сингуларних P -интеграла предложена је техника поништавања сингуларитета. За сваку од три интеграције предложено је више нових смена променљивих којима се сингуларни интегранд трансформише у споро променљиву функцију и који се затим ефикасно интеграл применом Гаус-Лежандрових формула. На разним примерима анализирани су ефикасност и тачност разматраних смена у случају, прве, друге и треће интеграције. Одабране су оптималне смене и формиран је алгоритам који процењује потребан број тачака интеграције за остваривање жељене тачности системске (импедансне) матрице. У наставку је тачност методе потврђена поређењем резултата са постојећим методама. Предности рачунања импедансних интеграла са високом тачношћу илустроване су на више нумеричких примера. Показани су висока тачност анализе у општем случају, стабилност резултата у случају електрички малих структура, ефикасност анализе у случају електрички великих структура и добијање стабилних и тачних резултата у широком опсегу вредности. Додатно, показано је да се за исти број непознатих p -рафинацијом остварује већа тачност у поређењу са h -рафинацијом, као и да максимални ред развоја који се може користити за добијање стабилних и тачних резултата износи 10 у обичној прецизности, и 20 у дуплој.

У четвртој глави је анализирана могућност повећања максимално употребљивог реда развоја струје имплементацијом макс-орто функција базиса. Указано је на то да са повећавањем реда развоја модификованих функција базиса изнад 20 у дуплој прецизности, системска матрица постаје лоше условљена, а резултати постају нестабилни и брзо дивергирају. Назначено је да је, за разлику од тога, применом макс-орто функција базиса могуће обезбедити стабилну системску матрицу практично без обзира на коришћени ред развоја. Разлог за то су ортогонална својства ових функција. У наставку је дат опис макс-орто функција базиса и разматрано је тачно и ефикасно рачунање одговарајућих импедансних интеграла. Прво је анализирана могућност рачунања тих интеграла као линеарне комбинације импедансних интеграла услед степених функција (као и у случају модификованих функција базиса). На основу нумеричких резултата уочено је да се у том случају применом 25. реда развоја губе све цифре тачности. Стога је у наставку разматрано представљање импедансних интеграла услед макс-орто функција базиса у облику линеарне комбинације импедансних интеграла услед Лежандрових полинома и њихових извода. Уколико се у том случају Лежандрови полиноми и њихови изводи рачунају применом познатих рекурентних формула, на основу разних нумеричких резултата је закључено да се системска матрица може израчунати са више од 11 цифара тачности применом реда развоја до 128. Назначено је да се за тачан прорачун квази-сингуларних импедансних интеграла услед макс-орто функција базиса могу користити исте смене променљивих за технику поништавања сингуларитета као и код модификованих функција базиса. У наставку су предности примене ултра високих редова развоја макс-орто функција базиса илустроване на примеру дебеле дипол антене дужине око 1 таласне дужине, где је показано да се применом реда 128 уместо 16 релативна средња квадратна грешка смањи око 10 пута за исти број непознатих. Назначено је да се иста тачност може постићи и применом реда 16 али са око 6 пута већим бројем непознатих.

У петој глави је анализирана примена сингуларних функција базиса које узимају у обзир ивичне ефекте. Указано је да на спојевима два елемента у одређеним случајевима, као и на отвореној ивици структуре, постоји теоријски бесконачно наелектрисање које се не може тачно апроксимирати полиномским функцијама базиса као што су модификоване и макс-орто функције базиса. Сингуларне функције базиса су изабране тако да њихов извод, који је сразмеран површинском наелектрисању, одговара теоријској расподели наелектрисања у околини ивица елемената. Објашњено је да сингуларитети код сингуларних функција базиса додатно отежавају нумеричко рачунање одговарајућих импедансних интеграла. Стога су у наставку предложене нове смене за технику поништавања сингуларитета за прву и трећу интеграцију у оквиру одговарајућих импедансних интеграла. На више нумеричких примера илустрована је ефикасност ових смена и осмишљен је алгоритам за одабир оптималних смена као и за процену броја тачака интеграције за добијање жељене тачности. Предности примене сингуларних функција базиса су илустроване на више нумеричких примера биконичне антене, дужине крака од $0,25\lambda$ до 10λ . Показано је да се применом сингуларних функција базиса постиже тачност која је за три до пет редова величине већа него у случају кад се ове функције базиса не користе.

Шеста глава представља закључак дисертације у коме се укратко сумирају како сва истраживања извршена у оквиру дисертације, тако и сви постигнути научни резултати. Сем тога у овој глави су дати правци могућег даљег истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

У докторској дисертацији је предложена нова метода за анализу аксијално симетричних металних антена, која је базирана на методи момената. Анализом оваквих структура применом методе момената истраживачи се баве већ више десетина година. Стални захтеви за повећањем тачности и ефикасности ЕМ моделовања, за анализом све већих и комплекснијих структура које укључују веома ситне детаље, као и за проширењем опсега учестаности идући од веома ниских до веома високих учестаности, чине ову област и даље веома актуелном, па се њоме баве и многи савремени научно-истраживачки радови. Нове технике које су предложене у дисертацији за повећање ефикасности, тачности и домена примене методе за анализу аксијално симетричних металних структура могу се лако проширити на ЕМ анализу произвољних метално-диелектричних структура, што додатно повећава значај ове теме за развој савремених метода за ЕМ моделовање.

Разматрана докторска дисертација представља оригинални научно истраживачки рад у области нумеричке електромагнетике. У оквиру дисертације је развијена нова метода која по први пут користи егзактно језгро интегралне једначине електричног поља за поставку проблема у комбинацији са зарубљеним конусима за геометријско моделовање проблема у циљу постизања велике прецизности анализе. За прецизно и ефикасно рачунање импедансних интеграла у оквиру системске матрице користи се техника поништавања сингуларитета, у оквиру које су предложене нове смене променљивих. Анализом ефикасности тих смена формиран је нов алгоритам који бира оптималне смене за све три интеграције импедансних интеграла и процењује потребан број тачака интеграције за остваривање жељене тачности. Оригиналност дисертације се између осталог огледа и у примени ултра високих редова развоја макс-орто функција базиса тестираних до реда 128. Тиме је добијање високе тачности омогућено применом око шест пута мањег броја напознатих у поређењу са стандардним развојима вишег реда и око педесет пута мањег броја непознатих у поређењу са развојима нижег реда. Додатну новину дисертације представља и увођење и ефикасна примена сингуларних функција базиса у предложену методу. Сингуларне функције базиса прецизно моделују ивичне ефекте, али додатно отежавају

рачунање одговарајућих импедансних интеграла. Алгоритам за ефикасно рачунање тих интеграла који подразумева примену нових смена променљивих за технику поништавања сингуларитета представља још један од доприноса дисертације.

Оригиналност своје дисертације кандидаткиња је потврдила објављивањем једног рада у врхунском међународном часопису (M21), и једног рада у часопису међународног значаја верификованог посебним одлукама (M24). При томе је кандидаткиња првопотписани аутор на оба рада. Доприноси дисертације су такође објављени и у четири рада са међународних скупова штампаних у целини (M33) и у два рада са скупова националног значаја штампаних у целини (M63), где је кандидаткиња аутор или коаутор.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације Александра Крнета је истражила постојећу литературу и као најрелевантније за тему дисертације навела 117 референци. Литература обухвата широк опсег доступних публикација, од фундаменталних до савремених. Највећи број наведених радова се може сврстати у шест група: 1) радови које се баве аналитичким решавањем ЕМ проблема, 2) пионирски радови о нумеричким методама у електромагнетици, 3) радови који указују на тренутну актуелност теме и потребу за тачном и ефикасном анализом аксијално симетричних структура, 4) литература у којој се анализа жичаних антена и аксијално симетричних антена врши применом било егзактног било редукованог језгра интегралне једначине, 5) радови у којима су анализиране функције базиса са ортогоналним својствима, и 6) радови који се баве ивичним ефектима и ефектима услед коничних крајева. Литература укључује и публикације на којима је Александра Крнета аутор или коаутор, а које су директно проистекле из рада на дисертацији.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање у оквиру ове дисертације представља комбинацију различитих теоријских и симулационих метода које су реализоване у неколико корака:

- Прикупљена су постојећа знања објављена у отвореној литератури, а пре свега у часописима, зборницима радова и уџбеницима који се баве електромагнетским моделовањем и, посебно, анализом аксијално симетричних структура методом момената.
- Проучавањем доступне литературе сагледано је актуелно стање, дефинисан је проблем који се разматра у тези и формиране су полазне хипотезе и глобални циљеви истраживања које обухвата дисертација.
- Теоријским изучавањем и коришћењем математичких алата извршена је припрема алгоритама за анализу аксијално симетричних металних структура коришћењем различитих типова функција базиса дефинисаних дуж зарубљених конуса којима се моделује геометрија.
- Развијен је и тестиран програмски модул за анализу аксијално симетричних металних структура који се базира на егзактном језгру интегралне једначине електричног поља у комбинацији са методом момената, а за моделовање геометрије проблема се користе градивни елементи у облику зарубљених конуса. За апроксимацију површинских струја користе се модификоване, макс-орто и сингуларне функције базиса, а импедансни интегрални се рачунају применом различитих смена променљивих којима се врши поништавање сингуларитета.
- Извршена је компаративна анализа тачности системске матрице као и крајњих резултата за различите смене променљивих, типове функција базиса и редове апроксимација за струје, укључујући и поређење са познатим методама.

3.4. Применљивост остварених резултата

Коришћењем резултата до којих је кандидаткиња дошла у својој дисертацији могу се знатно повећати ефикасност и тачност анализе електромагнетских система са аксијалном симетријом у односу на постојеће методе. Такође, применом предложене методе у оквиру дисертације могу се анализирати електрички много већи проблеми него што је то до сада било могуће. Технике и алгоритми предложени у дисертацији могу се применити на анализу произвољних метално-диелектричних структура.

Резултати овог истраживања већ се уграђују у комерцијални пакет WIPL-D Pro.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња Александра Крнета је у току израде дисертације обучена за уочавање проблема, постављање хипотеза за њихово решавање, систематску проверу постављених хипотеза и критичку анализу добијених резултата. У свом целокупном досадашњем раду кандидаткиња је између осталог показала иницијативу, способност самосталног изучавања литературе, систематичност, могућност формулисања сложених алгоритама и њихове имплементације, истрајност и могућност примене резултата из различитих области. Оригинални научни доприноси који су остварени у овом истраживању потврђују да је Александра Крнета стекла добре основе за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни доприноси који су остварени у дисертацији су:

- 1) Развијена је нова метода за анализу аксијално симетричних металних структура применом егзактног језгра интегралне једначине у комбинацији са методом момената за поставку проблема, зарубљених конуса за геометријско моделовање и функција базиса вишег реда за апроксимацију струја,
- 2) Смена променљивих, узета из доступне литературе, примењена је на нов начин за поништавање квази-сингуларитета интегранда при прорачуну интеграла потенцијала услед праве линијске струје,
- 3) Предложене су нове смене променљивих за поништавање квази-сингуларитета у другој и трећој интеграцији импедансних интеграла при анализи танких цилиндричних антена коришћењем егзактног језгра интегралне једначине,
- 4) Алгоритми су генерализовани на анализу произвољних аксијално симетричних металних структура које су сачињене од зарубљених конуса произвољно великог полупречника (тестираног до 100λ),
- 5) Формиране су једноставне формуле за одређивање потребног броја тачака интеграције да би се остварила жељена тачност за произвољно дугачке елементе (тестиране до 10λ),
- 6) Развијен је алгоритам за одређивање интеграла потенцијала и импедансних интеграла са прописаном тачношћу до машинске прецизности на основу доприноса 1) до 5),
- 7) Осмишљена је нова техника за прорачун системске матрице услед макс-орто функција базиса, при чему су елементи матрице представљени у виду линеарне комбинације импедансних интеграла услед Лежандрових полинома и њихових првих извода,
- 8) Развијена је нова метода за ефикасну анализу аксијално симетричних металних структура, базиране на макс-орто функцијама базиса ултра високог реда (тестирана до реда 128),

- 9) Развијене су и имплементирани сингуларне функције базиса које у себи укључују сингуларно понашање расподеле струја у околини ивица.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У дисертацији се по први пут разматра метода која комбинује примену зарубљених конуса за прецизно моделовање геометрије проблема и егзактно језгро интегралне једначине за поставку проблема. Мотивација која стоји иза овог приступа је повећање тачности и ефикасности ЕМ анализе аксијално симетричних металних структура у поређењу са методама које су до сада коришћене.

Импедансни интегрални показују сингуларно или квази-сингуларно понашање у случају када је раздаљина између два посматрана елемента (чија се спрега рачуна) релативно мала. За прву интеграцију импедансног интеграла примењена је смена која је већ публикована у литератури, али је у дисертацији први пут предложена за обрнут редослед интеграције. Тиме је добијен једноставнији аналитички облик интегранда који омогућава једноставније поништавање сингуларитета у другој интеграцији.

За другу интеграцију је предложено пет нових смена за поништавање сингуларитета, а које до сада нису разматране у литератури. Трећа интеграција се у литератури по правилу врши директном применом Гаус-Лежандрових формула. У дисертацији је по први пут предложено да се техника поништавања сингуларитета примени и на трећу интеграцију, при чему је разматрано више нових смена променљивих. Компаративном анализом изабране су оптималне смене променљивих за сваку од интеграција. Тиме је омогућено рачунање импедансних интеграла са задатом тачношћу, до машинске прецизности, и обезбеђена вишеструко бржа конвергенција импедансних интеграла у поређењу са директном интеграцијом и другим техникама интеграције које су наведене у доступној литератури. Додатно, предложене технике поништавања сингуларитета се лако имплементирају у случају све три интеграције импедансних интеграла независно од типа функција базиса и примењеног реда апроксимације струје.

Рачунање импедансних интеграла применом технике поништавања сингуларитета је у литератури разматрано само у случају цилиндричних градивних елемената. У дисертацији је ова техника по први пут примењена и у случају градивних елемената у облику зарубљених конуса (који могу да дегенеришу у цилиндар, диск, прстен или конус), чиме је знатно проширен скуп проблема који се могу анализирати.

Алгоритам за процену потребног броја тачака интеграције (за све три интеграције) за добијање жељене тачности је по први пут предложен у овој дисертацији. Због своје адаптивности конкретном проблему, алгоритам обезбеђује оптималну примену технике поништавања сингуларитета тако да се оствари жељена тачност системске матрице уз примену што мањег броја тачака интеграције. Додатно, предложени алгоритам је веома једноставан за имплементацију.

Применом свих наведених техника добијен је нови алгоритам за ефикасан прорачун системске матрице са жељеном тачношћу. Тиме је омогућена ефикасна анализа аксијално симетричних металних структура са великом тачношћу. На разним нумеричким примерима илустроване су могућности методе које између осталог укључују стабилну анализу електрички малих структура (тј. фреквенција где долази до краха на ниским учестаностима је изузетно ниска, реда неколико десетина херца), ефикасну анализу електрички великих структура (тестирано до сто таласних дужина), као и добијање стабилних и тачних резултата у широком опсегу вредности (до сто децибела).

У циљу повећања ефикасности анализе предложена је примена макс-орто функција базиса. Нов алгоритам за рачунање системске матрице у случају макс-орто функција базиса, који је по први пут предложен у дисертацији, омогућава велику тачност рачунања системске

матрице и при ултра високим редовима апроксимације (минимална релативна средња квадратна грешка системске матрице се мења од 10^{-15} до 10^{-11} за редове развоја од 1 до 128). Тиме је омогућено добијање високе тачности анализе коришћењем и до 6 пута мањег броја непознатих у поређењу са стандардним развојима вишег реда, и до 50 пута мањег броја непознатих у поређењу са стандардним развојима нижег реда.

Увођењем сингуларних функција базиса (поред макс-орто) у нову методу добијају се импедансни интегрални који се веома неефикасно рачунају применом познатих техника из доступне литературе. Коришћењем нових смена променљивих за поништавање сингуларитета функција базиса и ови импедансни интегрални се могу израчунати веома ефикасно са произвољно великом тачношћу (до машинске прецизности), што раније није било могуће. Тиме је отворена могућност методе за добијање резултата ултра високе тачности, са релативном грешком мањом за 3 до 5 редова величине него у случају када се не користе овакве функције базиса.

У целини гледано, сви ови резултати омогућавају стабилнију, ефикаснију и тачнију ЕМ анализу аксијално симетричних металних структура него што је то до сада било могуће, као и повећање домена примене ове методе. Искуства стечена у имплементацији макс-орто функција базиса ултра високог реда и сингуларних функција базиса, укључујући технике поништавања сингуларитета при рачунању импедансних интеграла, веома су драгоцене за примену у случају произвољних метално-диелектричних структура.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси верификовани су следећим радовима:

Категорија M21:

1. **Krneta, A. J.**, Kolundzija, B. M.: Evaluation of Potential and Impedance Integrals in Analysis of Axially Symmetric Metallic Structures to Prescribed Accuracy up to Machine Precision, - *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 5, pp. 2526-2539, May 2017 (IF₂₀₁₆ = 2,957) (ISSN: 0018-926X) (DOI: 10.1109/TAP.2017.2673760) (URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7862821/>)

Категорија M24:

1. **Krneta, A. J.**, Kolundzija, B. M.: Analysis of Axially Symmetric Wire Antennas by the Use of Exact Kernel of Electric Field Integral Equation, - *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 95-109, February 2016 (ISSN: 1451-4869) (UDC: 621.396.67:517.968) (DOI: 10.2298/SJEE1601095K) (url: http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol_13-1/09-Krneta-Kolundzija.pdf)

Категорија M33:

1. **Krneta, A. J.**, Kolundzija, B. M.: "Matrix Fill in Analysis of Axially Symmetric Antennas Using Very High Expansion Orders," -2017 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, USA, July 9-14, 2017, pp. 131-132 (ISBN: 978-1-5386-0898-2) (Electronic ISSN: 1947-1491) (DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072108) (URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8072108/>)

2. **Krnetić, A. J.**, Kolundžija, B. M.: "Improved Efficiency of Matrix Fill in Higher Order Modeling of Axially Symmetric Antennas," -*Proceedings of the 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN 2017*, Kladovo, Serbia, June 5-8, 2017, pp. API1.6.1-4 (ISBN: 978-86-7466-692-0) (URL: https://www.etrn.rs/common/pages/proceedings/IcETRAN2017/API/IcETRAN2017_paper_API1_6.pdf)
3. Kolundžija, B. M., **Krnetić, A. J.**: "Optimal Use of Gauss-Legendre Integration Formula for Evaluation of Potential Integrals in Analysis of Axially Symmetrical Wire Antennas," - *Proceedings of the 3rd IcETRAN Conference, IcETRAN 2016*, Zlatibor, Serbia, June 13-16, 2016, pp. API1.4.1-6 (ISBN: 978-86-7466-618-0)
4. **Krnetić, A. J.**, Kolundžija, B. M.: "Singularity Cancellation and Extraction Techniques for Precise Evaluation of Impedance Integrals in Thin-Wire Analysis," -*10th European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2016*, Davos, Switzerland, 10-15 April, 2016, pp. 1-4 (ISBN: 978-8-8907-0186-3) (DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7481384) (URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7481384/>)

Kategorija M63:

1. **Krnetić, A. J.**, Kolundžija, B. M.: "Analiza aksijalno simetričnih žičanih antena korišćenjem egzaktnog jezgra integralne jednačine električnog polja", *Zbornik radova 59. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu fiziku ETRAN 2015*, Srebrno Jezero, Srbija, 8-11. jun 2015, str. AP1.4.1-6 (ISBN: 978-86-80509-71-6) (*rad je osvojio nagradu za najbolji rad mladog istraživača na sekciji za Antene i prostiranje*)
2. **Krnetić, A. J.**, Kolundžija, B. M.: "Poređenje dve metode za računanje integrala potencijala u analizi tankih žičanih struktura", *Zbornik radova 58. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu fiziku ETRAN 2014*, Vrnjačka Banja, Srbija, 2-5. jun 2014, str. AP1.3.1-6 (ISBN: 978-86-80509-70-9)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу изложеног Комисија констатује да докторска дисертација кандидаткиње Александре Крнете, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом „**Функције базиса ултра високог реда и сингуларне функције базиса у анализи аксијално симетричних металних структура**“ испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Докторска дисертација кандидаткиње Александре Крнете садржи више научних доприноса, од којих су најважнији: 1) нова метода за анализу аксијално симетричних металних структура применом егзактног језгра интегралне једначине у комбинацији са методом момената за поставку проблема, зарубљених конуса за геометријско моделовање и функција базиса вишег реда за апроксимацију струја, 2) нов алгоритам за рачунање импедансних интеграла са задатом тачношћу, до машинске прецизности, заснованог на поништавању сингуларитета коришћењем погодно одабраних смена променљивих, 3) примена ултра високих редова развоја макс-орто функција базиса у оквиру нове методе и 4) повећање тачности методе имплементацијом сингуларних функција базиса. У целини гледано сви ови научни резултати омогућавају стабилнију, ефикаснију и тачнију електромагнетску анализу аксијално симетричних металних структура, као и повећање домена примене ове методе. Посебну вредност ове новине имају јер се могу лако применити у анализи произвољних метално-диелектричних структура. Током израде докторске дисертације, као и самом дисертацијом, Александра Крнета је показала да је оспособљена за самостални научно-истраживачки рад.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под насловом „**Функције базиса ултра високог реда и сингуларне функције базиса у анализи аксијално симетричних металних структура**“ кандидаткиње Александре Крнете, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, прихвати, изложи на јавни увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 22. фебруар 2018. године

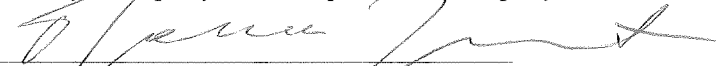
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



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



др Бранка Јокановић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за Физику



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



др Миодраг Тасић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет