

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Слободана В. Савића**

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5017/09-3 од 30. јуна 2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Слободана В. Савића** под насловом

„Закривљени континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи вишег реда за великодоменско електромагнетско моделовање“.

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

Слободан Савић је 1. децембра 2009. године уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Микроталасна техника, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Све испите на докторским студијама положио је са највишом оценом. Током рада на испитима са модула, кандидат је показао интересовање за нумеричке методе у електромагнетици, са чијим основима се упознао кроз предмете Метод коначних елемената у електромагнетици и Метод момената у електромагнетици. Под менторством др Милана Илића, ванредног професора, кандидат је започео истраживачки рад у вези са моделовањем континуално нехомогених и неизотропних електромагнетских средина великодоменском методом коначних елемената (*finite element method*, FEM) вишег реда. Додатно, кандидат је започео истраживачки рад у вези са моделовањем отворених електромагнетских (ЕМ) проблема методом коначних елемената.

Кандидат Слободан Савић је 14. фебруара 2014. године пријавио тему за израду докторске дисертације под радним насловом „Закривљени континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи вишег реда за великодоменско електромагнетско моделовање“. Комисија за студије III степена размотрила је предлог теме за израду докторске дисертације и 20. фебруара 2014. године упутила Наставно-научном већу предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације. Наставно-научно веће Електротехничког факултета именovalo је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације на седници одржаној 25. фебруара 2014. године (Одлука бр. 5017/09-1 од 31. марта 2014. године), у саставу

- др Антоније Ђорђевић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, и
- др Бранислав Нотарош, редовни професор, Electrical and Computer Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.

За ментора је предложен

- др Милан Илић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације обављена је 4. априла 2014. године на Електротехничком факултету у Београду, пред комисијом у саставу

- др Антоније Ђорђевић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, и
- др Бранислав Нотарош, редовни професор, Electrical and Computer Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.

На усменој одбрани физички су били присутни чланови Комисије проф. др Антоније Ђорђевић и проф. др Златан Стојковић. Члан Комисије проф. др Бранислав Нотарош био је присутан путем видео-конференцијске везе. Комисија је закључила да је кандидат на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације добио оцену „задовољно“. Комисија је предложила да ментор докторске дисертације буде др Милан Илић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета усвојило је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације на седници одржаној 20. маја 2014. године. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Слободана Савића, под насловом „Закривљени континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи вишег реда за великодоменско електромагнетско моделовање“, на седници одржаној 9. јуна 2014. године (Одлука бр. 61206-2603/2014 од 9. јуна 2014. године).

Слободан Савић је 28. маја 2015. године предао на преглед и оцену докторску дисертацију под насловом „Закривљени континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи вишег реда за великодоменско електромагнетско моделовање“. Комисија за студије III степена потврдила је 4. јуна 2015. године испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за именовање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. Наставно-научно веће Електротехничког факултета именovalo је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације на седници одржаној 23. јуна 2015. године (Одлука бр. 5017/09-3 од 30. јуна 2015. године), у саставу

- др Милан Илић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (ментор и председник комисије),
- др Антоније Ђорђевић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Бранислав Нотарош, редовни професор, Electrical and Computer Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA,

- др Бранко Колунџија, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, и
- др Драган Олћан, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада области Електромагнетика, антене и микроталаси, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Именовани ментор докторске дисертације, др Милан Илић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, активно се бави истраживањем из наведене научне области и из ње има укупно 23 публикована рада у часописима са *SCI* листе [радови наведени у *Thomson Reuters* (<http://ip-science.thomsonreuters.com>) *Journal Citation Reports (JCR)* листи, тј. часописи који имају *impact factor*], од којих је 21 рад објављен у последњих 10 година.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Слободан В. Савић је рођен 28. јуна 1985. године у Београду, где је завршио основну школу и Средњу електротехничку школу „Никола Тесла“, обе као носилац Вукове дипломе и ученик генерације.

Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписао је 2004. године. Дипломирао је 27. септембра 2008. године на Одсеку за телекомуникације, Смер микроталасна техника, са просечном оценом 9,67, по четворогодишњем студијском програму. Дипломски рад „Електродинамичка анализа расејача хибридном FEM-МоМ методом вишег реда“ одбранио је са оценом 10.

Дипломске академске – мастер студије на Смеру за микроталасну технику, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, уписао је 2008. године. Мастер студије завршио је 28. септембра 2009. године са просечном оценом 10,00, по једногодишњем студијском програму. Мастер рад „Ефикасно моделовање сложених електромагнетских структура засновано на новом алгоритму просторне сегментације хексаедарским коначним елементима“ одбранио је са оценом 10.

Докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Микроталасна техника, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, уписао је 2009. године. На докторским студијама је положио све испите са просечном оценом 10,00.

Од 2009. године запослен је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. За сарадника у настави, на годину дана, при Катедри за општу електротехнику, изабран је 14. априла 2009. године. За асистента за ужу научну област Електромагнетика, антене и микроталаси, при Катедри за општу електротехнику, изабран је 25. маја 2010. године, а поново изабран у исто звање 25. маја 2013. године.

Коаутор је једног рада у врхунском међународном часопису (M21), два рада у истакнутим међународним часописима (M22), једног рада у међународном часопису (M23), три рада у домаћим научним часописима (M53), шест саопштења са међународних скупова штампаних у целини (M33), три саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (M34) и пет саопштења са скупова националног значаја штампаних у целини (M63). Учествовао је у два пројекта Министарства за науку и технолошки развој републике Србије, у оквиру којих је коаутор 17 техничких решења (M85).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Закривљени континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи вишег реда за великодоменско електромагнетско моделовање“ има укупно 213 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. децембра 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 поглављима:
 1. Увод (14 страна),
 2. Основе теорије електромагнетског поља (9 страна),
 3. Метода коначних елемената (38 страна),
 4. Трансформациона електромагнетика (43 стране),
 5. Моделовање отворених електромагнетских проблема методом коначних елемената (20 страна),
 6. Нумерички примери (68 страна),
 7. Закључак (6 страна),
- списак литературе (9 страна),
- прилог (5 страна) и
- биографија аутора (1 страна).

Дисертација садржи 36 слика и 248 нумерисаних једначина. Списак литература садржи 149 библиографских јединица.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу (Увод) указано је на значај нумеричке електромагнетике (*computational electromagnetic*, СЕМ) у савременом друштву. Дат је преглед најзначајнијих СЕМ метода и тренутно стање у свету. Сагледане су предности и ограничења најзначајнијих СЕМ метода, као и области оптималне примене за сваку од метода. Сагледани су и правци развоја нумеричке електромагнетике у будућности, узимајући у обзир трендове развоја рачунарске технике и перформанси (приступачних) личних рачунара.

У другом поглављу (Основе теорије електромагнетског поља) представљене су теоријске основе електромагнетике неопходне за разумевање и примену методе коначних елемената. Прво су приказане Максвелове једначине у интегралном облику као фундаменталне једначине електромагнетског поља из којих се (користећи се векторском анализом) могу извести Максвелове једначине у диференцијалном облику. Представљене су и конститутивне релације (у општем случају). Посебно је разматран случај простопериодичних електромагнетских поља, у оквиру којег је представљена векторска

таласна једначина. На крају су дати гранични услови на раздвојним површинама двеју средина.

У трећем поглављу (Метода коначних елемената) укратко је изложена теорија неопходна за примену и разумевање методе коначних елемената. Представљен је проблем граничних вредности као теоријска основа методе коначних елемената и описане су две најчешће коришћене методе за његово решавање: Рејли-Риц метода и метода отежаних резидуала. Изложене су основне једначине које описују електромагнетско поље и које се најчешће решавају методом коначних елемената (векторске таласне једначине). Наведени су основни кораци у оквиру методе коначних елемената. Посебна пажња посвећена је геометријском моделовању. Математички су описани закривљени параметарски хексаедри вишег (геометријског) реда Лагранжовог типа, дефинисани помоћу уопштеног закривљеног координатног система. Изложен је и математички апарат неопходан за векторску анализу и алгебру у закривљеном координатном систему. Описана је апроксимација (електричног) поља векторским, роторски-конформним, хијерархијским, полиномским функцијама базиса вишег реда. Посебна пажња посвећена је нумеричком ЕМ моделовању континуално нехомогених и неизотропних средина. Овакве средине могу настати након примене трансформационе електромагнетике у циљу конструкције ЕМ система жељених својстава и функција којима се може манипулисати ЕМ пољем по вољи.

У четвртом поглављу (Трансформациона електромагнетика) изложена је теорија трансформационе електромагнетике. Представљена су два облика записа Максвелових једначина: стандардни и инваријантни (који се користи у оквиру трансформационе електромагнетике). Приказана су детаљна математичка извођења неопходна за одређивање (тензора) параметара средине применом трансформационе електромагнетике, у општем случају. Математичка извођења представљена су у облику погодном за инжењере. Затим је укратко описан концепт прекривки за смањење радарског попречног пресека, а тензори параметара средине су приказани за сферичну и коцкасту прекривку. Ове прекривке су континуално нехомогене и неизотропне, а посебно захтевне за нумеричку анализу. Приказана је и анализа блиског поља у околини сферичне прекривке за смањење радарског попречног пресека коришћењем егзактних аналитичких израза, која би требало да допринесе бољем разумевању механизма смањења радарског попречног пресека.

У петом поглављу (Моделовање отворених електромагнетских проблема методом коначних елемената) теоријски су разматрани отворени електромагнетски проблеми и могућности њиховог моделовања методом коначних елемената. Укратко су изложене основне поставке тренутно доступних решења за ограничавање нумеричког домена прорачуна. Закључено је да је, са становишта ефикасности и заузећа рачунарских ресурса, апсорпциони гранични услов (*absorbing boundary condition*, АВС) један од најбољих избора. Укратко је изложена теоријска основа апсорпционих граничних услова и указано је на инхерентна ограничења овог апроксимативног граничног услова. Посебна пажња посвећена је примени симетричног АВС другог реда у великодоменској методи коначних елемената са хијерархијским полиномским роторски-конформним функцијама базиса вишег реда. Приказани су и детаљи потребни за нумеричку примену симетричног АВС другог реда у великодоменској методи коначних елемената. Експлицитно су приказани интегрални облици које је потребно прорачунати приликом попуњавања матрица система. Применом предложеног граничног услова није потребно спровести свеобухватне измене на постојећем FEM рачунарском коду, које би биле неопходне када би се постојеће базисне функције мењале новим дивергенцијски-конформним функцијама по АВС површи. На крају, коришћењем Кирхофове векторске интеграционе методе, полазећи од познатог FEM решења за електрично поље у непосредној околини расејача (или антене), приказане су и једначине неопходне за прорачун расејаног и укупног електричног поља изван АВС површи.

У шестом поглављу (Нумерички примери) прво је представљена параметризација константном брзином (*constant speed parametrization*, CSP) у циљу постизања што веће

тачности нумеричког решења електромагнетских проблема. Приказана је и апроксимација CSP мапирања великим Лагранжовим елементима. Назначено је и да се концепт CSP мапирања не мора користити искључиво у комбинацији са приказаном Лагранжовом геометријском апроксимацијом, већ се може проширити и на друге геометријске апроксимације (као што су неуниформни рационални B-сплајнови – *nonuniform rational B-splines*, NURBS), поготову када се желе добити резултати велике тачности коришћењем нумеричких модела са што мањим бројем електрично великих коначних елемената. Теоријским разматрањима и кроз неколико нумеричких примера, указано је на важност примене параметризације константном брзином (тј. параметризације константном лучном дужином) дуж координатних линија по површи расејача. Затим је указано и на важност правилног избора редова полинома апроксимације поља и (електричне) величине коначних елемената. На основу ограниченог скупа нумеричких симулација неизотропних ЕМ расејача, установљене су прелиминарне препоруке за одређивање оптималних (или скоро оптималних) редова хијерархијских полиномских базисних функција и редова Гаус-Лежандрове интеграционе формуле у FEM анализи униаксијалних средина. Затим су приказани и ефикасни тродимензиони нумерички модели прекривке за смањење радарског попречног пресека. Посебно, приказана је ефикасна великодоменска нумеричка FEM-МоМ анализа (вишег реда) линеарне и нелинеарне сферичне прекривке за смањење радарског попречног пресека (добијене трансформационом електромагнетиком). Континуално нехомоген неизотропан домен прекривке моделован је помоћу великих закривљених коначних елемената. Затим је представљена и нова конформна коцкаста прекривка за смањење радарског попречног пресека, добијена применом трансформационе електромагнетике, као и њена ригорозна пуноталасна нумеричка верификација у блиском и далеком пољу, заснована на предложеној великодоменској FEM-МоМ методи вишег реда. Нумеричка верификација функционисања прекривке спроведена је помоћу великих континуално нехомогених уопштених хексаедарских коначних елемената, без потребе за просторном дискретизацијом услед нехомогености средине (поделом на велики број електрично малих коначних елемената), типичном у већини примера нумеричке анализе оваквих средина методом коначних елемената. У постојећи FEM рачунарски код имплементиран је симетричан (неригорозан) ABC другог реда. Оваква (неригорозна) имплементација не захтева свеобухватне измене рачунарског кода (као у случају промене типа базисних функција или додавања нових скаларних променљивих). Приказани су и резултати нумеричке анализе савршено електрично проводног и диелектричног сферног расејача. На крају, како би се обезбедило постепено прилагођење постојећег рачунарског програма методе коначних елемената вишег реда на мулти-процесорске рачунарске системе, као и боље искоришћење расположивих рачунарских ресурса, паралелизовани су запремински интегрални који се (нумерички) прорачунавају приликом попуњавања матрица система методе коначних елемената, а перформансе спроведене паралелизације испитане су на примеру нумеричке анализе диелектричног расејача.

У седмом поглављу (Закључак) наведени су основни доприноси дисертације и дати су правци могућег даљег истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Метода коначних елемената је једна од најзначајнијих нумеричких метода у модерној инжењерској пракси. Нумеричке методе вишег реда (било у смислу вишег реда геометријске апроксимације, било у смислу вишег реда апроксимације поља) све су заступљеније у СЕМ. Нумеричке методе вишег реда пружају шире могућности геометријског моделовања и, по правилу, имају бољу конвергенцију и ефикасност од метода ниског (нултог или првог) реда. Иако су метода коначних елемената и њене основне поставке већ дуго познате, а нумеричка

електромагнетика развијена и зрела научна област, истраживачки рад у овој области је и данас врло жив. Применом нових техника (као што је трансформациона електромагнетика) могуће је пројектовати електромагнетске уређаје сложенијих особина (континуално нехомогене и неизотропне средине) него што је то до сада било могуће. Приликом нумеричког моделовања таквих средина, пред методу коначних елемената постављају се нови изазови и захтеви, те је потребно додатно усложњавање и усавршавање постојећих алгоритама, као и њихова верификација кроз нумеричке експерименте.

Оригиналноста своје дисертације кандидат је потврдио на најбољи могући начин – објављивањем три рада у међународним часописима, од којих је један категорије M21, а друга два категорије M22. Кандидат је првопотписани на раду категорије M21 и једном раду категорије M22, а другопотписани на једном раду категорије M22.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У раду је коришћена обимна литература из области нумеричке електромагнетике, трансформационе електромагнетике и методе коначних елемената, полазећи од основних референци, па све до најновијих радова у врхунским међународним часописима. На основу тих референци, оригинални научни доприноси, до којих је кандидат дошао у дисертацији, стављени су у коректан контекст.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Кандидат је у раду успешно користио више различитих поступака. Најпре је увидом у литературу, у сарадњи са ментором, дошао до закључака о потреби и адекватности ефикасног и тачног моделовања континуално нехомогених и неизотропних електромагнетских средина. Основни аргумент у овом смеру је чињеница да тренутно не постоје комерцијално доступни рачунарски програми и алгоритми који могу (без додатних апроксимација) да моделују овакве средине, као и чињеница да се овакве средине све чешће сусрећу у СЕМ заједници, поготову након популаризације теорије трансформационе електромагнетике. Кандидат је самостално конструисао нумеричке моделе за анализу прекривки за смањење радарског попречног пресека расејача, које су по својој природи континуално нехомогене и неизотропне, а перформансе нумеричких модела испитане су кроз низ нумеричких експеримената.

Иако је трансформациона електромагнетика један од популарнијих праваца у СЕМ заједници, теоријска извођења и објашњења преваходно су окренута физичарима. Користе се сложене нотације, које обично нису познате инжењерима електротехнике, а недостају и објашњења основних претпоставки, идеја и закључака, у облику погодном за инжењере. Кандидат је самостално, полазећи од основних особина трансформација вектора, формулисао теорију трансформационе електромагнетике у облику погодном за инжењере. Као илустративан пример, теоријски је разматрао расподелу блиског поља у околини сферичне прекривке за смањење радарског попречног пресека. Ово разматрање доприноси бољем разумевању концепата трансформационе електромагнетике и начина функционисања прекривки за смањење радарског попречног пресека.

У циљу проширења области примене методе коначних елемената, кандидат је самостално развио и уградио симетрични (неригорозни) апсорпциони гранични услов другог реда у великодоменску методу коначних елемената вишег реда. При томе је сагледао и актуелан проблем прорачуна дивергенције роторски-конформних функција базиса, а предложено решење је, као софтверски модул, уградио у постојећи FEM рачунарски код. Критички сагледавши резултате бројних нумеричких експеримената, кандидат је верификовао тачност и ефикасност предложеног апсорпционог граничног услова.

У оквиру дисертације кандидат је дао и низ препорука за унапређење тачности и ефикасности великодоменске методе коначних елемената вишег реда. Предложио је нове

начине геометријског моделовања, а дао је и препоруке за одређивање (приближно) оптималних редова полиномске апроксимације поља у неизотропним срединама. Оправданост ових препорука потврђена је нумеричким експериментима.

На крају, кандидат је критички анализирао предности и мане свих предложених и имплементираних нових формулација и дао смернице за наставак истраживања.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати до којих је кандидат дошао у својој дисертацији већ су имплементирани у академском FEM софтверу за електродинамичку анализу, а могу имати и непосредну примену у формирању нових нумеричких алгоритама и ефикаснијег софтвера за анализу тродимензионих електромагнетских система. Електромагнетско моделовање је важан елемент за дизајн помоћу рачунара и неопходно је при пројектовању микроталасних компоненти, које су данас заступљене у великом броју уређаја, како телекомуникационих, тако и оних са брзим дигиталним везама. Побољшање нумеричких метода генерално води поједностављењу процеса пројектовања уређаја у којима постоје изражени електромагнетски ефекти који се не могу узети у обзир у симулаторима заснованим на принципима теорије електричних кола и омогућава њихову ефикаснију оптимизацију. Резултати и закључци до којих је кандидат дошао значајно проширују спектар проблема који се могу моделовати методом коначних елемената.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је у свом целокупном досадашњем раду показао особине неопходне за научноистраживачки рад, као што су: разумевање и проширивање теоријских концепата, самостално проучавање стручне литературе, оригиналност, формулисање сложених алгоритама и њихова софтверска имплементација, анализа добијених резултата, као и дефинисање структура података неопходних да би се теоријски модели могли користити за прорачуне на рачунару.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни допринос дисертације обухвата:

- развој методологије за анализу комплексних ЕМ проблема са континуално нехомогеним и неизотропним параметрима средине методом коначних елемената вишег реда са закривљеним коначним елементима континуално променљивих параметара,
- пројектовање нове структуре за смањење радарског попречног пресека расејача теоријом трансформационе електромагнетике,
- развој нових апсорпционих граничних услова применљивих на велике закривљене хексаедарске коначне елементе и
- повећање тачности анализе употребом подобнијих функција просторног мапирања код великих закривљених елемената.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Коришћењем великодоменске методе коначних елемената конструисани су нумерички модели за ефикасну и тачну нумеричку електромагнетску анализу континуално нехомогених и неизотропних прекривки за смањење радарског попречног пресека. Први пут у свету конструисани су нумерички модели прекривки за смањење радарског попречног

пресека који у себи (инхерентно) не садрже део-по-део хомогену апроксимацију континуално нехомогених средина. Развијени нумерички модели се састоје од малог броја електрично великих коначних елемената, па су зато и знатно ефикаснији у односу на до тада предложена решења. Пошто се користе функције базиса вишег реда, развијени нумерички модели су веома тачни упркос малом броју коришћених коначних елемената.

По први пут у свету је трансформационом електромагнетиком конструисана коцкаста прекривка за теоријски идеално сузбијање радарског попречног пресека расејача. Таква прекривка садржи оштре ивице и рогљеве који су посебно захтевни приликом електромагнетске анализе. Добијени нумерички резултати потврдили су квалитет развијених модела за анализу континуално нехомогених и неизотропних средина са ивицама и рогљевима. Верификовани су ефикасност и тачност FEM методе вишег реда уз употребу развијених модела.

У оквиру великодоменске методе коначних елемената имплементиран је и симетрични (неригорозни) апсорпциони гранични услов другог реда. Посебна пажња посвећена је имплементационим детаљима у вези са прорачуном дивергенције роторски-конформних функција базиса по ABC површи. Како роторски-конформне функције базиса не задовољавају аутоматски и једнакост нормалних компоненти поља на споју два коначна елемента, након примене дивергенције на овакве базисне функције, на линијама споја два коначна елемента (по ABC површи) појавиће се сингуларни чланови, које није могуће лако интегралити. У литератури већ постоје решења која делимично решавају поменути проблем. При томе у СЕМ заједници влада мишљење да делови интеграла са сингуларним члановима не доприносе квалитету решења, ако се не прорачунају егзактно. Међутим, у дисертацији је кроз нумеричке експерименте први пут у свету показано да такви закључци не важе стриктно и у случају полиномских базисних функција вишег реда са великодоменским елементима.

Развијен је и представљен механизам конструкције геометријске параметризације константном брзином, која у општем случају води ка најмањем изобличењу финалног простора, примењен на великодоменске коначне елементе вишег реда (Лагранжовог типа). Кроз неколико нумеричких примера верификоване су све полазне хипотезе и показано је да је, за добијање тачних нумеричких решења великодоменским СЕМ методама, потребно посветити посебну пажњу геометријском моделовању и конструкцији одговарајућих параметризација просторног мапирања. Иако се великодоменске СЕМ методе све више користе, питање оптималне параметризације геометријског мапирања није довољно обухваћено постојећом литературом. Стога ће теоријска разматрања и нумерички резултати представљени у дисертацији допринети укупном знању из области нумеричке електромагнетике.

У циљу проширења скупа проблема које је могуће ефикасно моделовати на постојећим персоналним рачунарима, у току истраживања у вези са докторском дисертацијом, урађена је и паралелизација најзахтевнијих делова (са становишта рачунарских ресурса) FEM кода – петљи у оквиру којих се рачунају тродимензиони запремински интегрални у оквиру алгорита за попуњавање глобалне FEM матрице. Паралелизација рачунарских кодова посебно је актуелна у последње време, а спроведеном паралелизацијом додата је практична вредност постојећој имплементацији великодоменске методе коначних елемената. Паралелизација FEM кода спроведена је коришћењем OpenMP библиотеке на специфичан начин – тако да се не наруше постојећа структура и функционалност пажљиво конструисаних оригиналних алгоритама погодних за минимизирање редундантних прорачуна при попуњавању матрице у методи коначних елемената вишег реда. На тај начин је обезбеђена постепена транзиција постојећег рачунарског кода за нумеричку електромагнетску анализу методом коначних елемената вишег реда на нове мулти-процесорске рачунарске системе. Резултати паралелизације успешно су верификовани нумеричким примерима који су показали да је постигнуто значајно убрзање извршавања симулација, као и да је ефикасније спровести контролу броја

коришћених рачунарских нити директно у рачунарском коду (помоћу OpenMP библиотеке), него контролом кроз оперативни систем.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси дисертације верификовани су следећим радовима

Категорија M21:

[1] **Savić, S. V.**, Manić, A. B., Ilić, M. M., Notaroš, B. M.: Efficient higher order full-wave numerical analysis of 3-D cloaking structures, *Plasmonics*, vol. 8, no. 2, pp. 455–463, June 1, 2013. (IF₂₀₁₃ 2,738, M21, ISSN: 1557-1955, doi: 10.1007/s11468-012-9410-0, url: <http://dx.doi.org/10.1007/s11468-012-9410-0>)

Категорија M22:

[2] **Savić, S. V.**, Notaroš, B. M., Ilić, M. M.: Conformal cubical 3D transformation-based metamaterial invisibility cloak, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 30, no. 1, pp. 7–12, January 2013. (IF₂₀₁₃ 1,448, M22, ISSN: 1084-7529, doi: 10.1364/JOSAA.30.000007, url: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.30.000007>)

[3] Ilić, M. M., **Savić, S. V.**, Ilić, A. Ž., Notaroš, B. M.: Constant speed parametrization mapping of curved boundary surfaces in higher-order moment-method electromagnetic modeling, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1457–1460, December 2011. (IF₂₀₁₁ 1,374, M22, ISSN: 1536-1225, doi: 10.1109/LAWP.2011.2180354, url: <http://dx.doi.org/10.1109/LAWP.2011.2180354>)

Категорија M23:

[4] **Savić, S. V.**, Krneta, A., Stevanović, M., Olćan, D. I., Tasić, M., Ilić, M. M., Tošić, D., Kolundžija, B., Djordjević, A. R.: Analytic solutions of electromagnetic fields in inhomogeneous media, *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 52, no. 2, pp. 131–141, April 2015. (IF₂₀₁₄ 0,077, M23, ISSN: 0020-7209, doi: 10.1177/0020720915571799, url: <http://dx.doi.org/10.1177/0020720915571799>)

Категорија M53:

[5] Ilić, M. M., **Savić, S. V.**, Ilić, A. Ž., Notaroš, B. M.: Hybrid higher order FEM-MoM analysis of continuously inhomogeneous electromagnetic scatterers, *Telfor Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 121–124, 2011. (M53, ISSN: 1821-3251, url: http://journal.telfor.rs/Published/Vol3No2/Vol3No2_A10.pdf)

[6] **Savić, S. V.**, Ilić, M. M., Kolundžija, B. M., Notaroš, B. M.: Efficient modeling of complex electromagnetic structures based on the novel algorithm for spatial segmentation using hexahedral finite elements, *Telfor Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 98–101, 2010. (M53, ISSN: 1821-3251, url: http://journal.telfor.rs/Published/Vol2No2/Vol2No2_A8.pdf)

[7] Ilić, A. Ž., **Savić, S. V.**, Ilić, M. M., Notaroš, B. M.: Analysis of electromagnetic scatterers using hybrid higher order FEM-MoM technique, *Telfor Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 53–56, 2009. (M53, ISSN: 1821-3251, url: http://journal.telfor.rs/Published/Vol1No2/Vol1No2_A5.pdf)

Категорија M33:

- [8] **Savić, S. V.**, Ilić, M. M.: “Convergence of the higher order time-domain finite element method in modeling of 1-D electromagnetic problems,” *Proceedings of The 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN 2014*, Vrnjačka Banja, Serbia, 2014, pp. API1.1.1–4. (M33, ISBN: 978-86-80509-70-9, url: http://etran.etf.rs/index_e.html)
- [9] **Savić, S. V.**, Kolundžija, B. M.: “Efficient iterative algorithm for design of probe fed rectangular microstrip patch antennas using software for electromagnetic modeling,” *Proceedings of The 29th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, ACES 2013*, Monterey, California, USA, 2013, pp. 789–793. (M33, url: http://www.aces-society.org/conference/2013/ACES_2013_Program_Mar_18.pdf)
- [10] **Savić, S. V.**, Ilić, M. M.: “Guidelines for utilization of higher order finite elements in uniaxial media,” *Proceedings of The 29th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, ACES 2013*, Monterey, California, USA, 2013, pp. 18–22. (M33, url: http://www.aces-society.org/conference/2013/ACES_2013_Program_Mar_18.pdf)
- [11] Notaroš, B. M., Ilić, M. M., **Savić, S. V.**, Šekeljić, N. J., Ilić, A. Ž.: “Accurate and efficient curvilinear geometrical modeling using interpolation parametric elements in higher order CEM techniques,” *Proceedings of the 28th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, ACES 2012*, Columbus, Ohio, USA, 2012, pp. 602–607. (M33, url: http://aces.ee.olemiss.edu/conference/2012/ACES2012_FinalProgram_Small.pdf)
- [12] Ilić, M. M., **Savić, S. V.**, Notaroš, B. M.: “First order absorbing boundary condition in large-domain finite element analysis of electromagnetic scatterers,” *Proceedings of 10th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, TELSIS 2011*, Niš, Serbia, 2011, pp. 424–427. (M33, ISBN: 978-1-4577-2016-1, doi: 10.1109/TELSIS.2011.6143235, url: <http://dx.doi.org/10.1109/TELSIS.2011.6143235>)
- [13] Notaroš, B. M., Ilić, M. M., Ilić, A. Ž., Djordjević, M., **Savić, S. V.**: “Efficient higher order finite element–moment method modeling of 3-D radiation and scattering problems,” *Proceedings of The 25th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, ACES 2009*, Monterey, California, USA, 2009, pp. 627–632. (M33)

Категорија M34:

- [14] Šekeljić, N. J., **Savić, S. V.**, Ilić, M. M., Notaroš, B. M.: “Rules for adoption of expansion and integration orders in FEM analysis using higher order hierarchical bases on generalized hexahedral elements,” *Proceedings of The 11th International Workshop on Finite Elements for Microwave Engineering, FEM 2012*, Estes Park, Colorado, USA, 2012, p. 76. (M34, url: http://www.engr.colostate.edu/FEM2012/documents/FEM2012_Book_of_Abstracts.pdf)
- [15] Manić, S. B., **Savić, S. V.**, Ilić, M. M., Notaroš, B. M.: “Time-domain response of 3-D waveguide and scattering structures calculated by higher order frequency-domain FEM technique and DFT,” -presented at the USNC-URSI National Radio Science Meeting, Boulder, Colorado, USA, 2012. (M34)
- [16] Manić, A. B., Manić, S. B., **Savić, S. V.**, Ilić, M. M., Notaroš, B. M.: “Efficient electromagnetic analysis using electrically large curved p-refined hierarchical anisotropic

inhomogeneous finite elements,” presented at the USNC-URSI National Radio Science Meeting, Boulder, Colorado, USA, 2012. (M34)

Категорија M63:

- [17] **Savić, S. V.**, Ilić, A. Ž., Notaroš, B. M., Ilić, M. M.: “Acceleration of higher order FEM matrix filling by OpenMP parallelization of volume integrations,” *Proceedings of 20th Telecommunications Forum TELFOR 2012*, Belgrade, Serbia, 2012, pp. 1183–1184. (M63, ISBN: 978-1-4673-2983-5, doi: 10.1109/TELFOR.2012.6419425, url: <http://dx.doi.org/10.1109/TELFOR.2012.6419425>)
- [18] Manić, S. B., **Savić, S. V.**, Ilić, M. M., Notaroš, B. M.: “Combining finite element method and Fourier transform to analyze waveguide transients,” *Proceedings of 19th Telecommunications Forum TELFOR 2011*, Belgrade, Serbia, 2011, pp. 1004–1007. (M63, ISBN: 978-1-4577-1499-3, doi: 10.1109/TELFOR.2011.6143717, url: <http://dx.doi.org/10.1109/TELFOR.2011.6143717>)
- [19] Ilić, M. M., **Savić, S. V.**, Ilić, A. Ž., Notaroš, B. M.: “Hybrid higher order FEM-MoM analysis of continuously inhomogeneous electromagnetic scatterers,” *Proceedings of 18th Telecommunications Forum TELFOR 2010*, Belgrade, Serbia, 2010, pp. 843–846. (M63, ISBN: 978-86-7466-392-9, url: http://2010.telfor.rs/files/radovi/TELFOR2010_08_01.pdf)
- [20] **Savić, S. V.**, Ilić, M. M., Kolundžija, B. M., Notaroš, B. M.: “Efikasno modelovanje složenih elektromagnetskih struktura zasnovano na novom algoritmu prostorne segmentacije heksaedarskim konacnim elementima,” *Proceedings of 17th Telecommunications Forum TELFOR 2009*, Belgrade, Serbia, 2009, pp. 835–838. (M63, ISBN: 978-86-7466-375-2, url: http://2009.telfor.rs/files/radovi/08_02.pdf)
- [21] Ilić, A. Ž., **Savić, S. V.**, Ilić, M. M., Notaroš, B. M.: “Analysis of electromagnetic scatterers using hybrid higher order FEM-MoM technique,” *Proceedings of 16th Telecommunications Forum TELFOR 2008*, Belgrade, Serbia, 2008, pp. 480–483. (M63, ISBN: 978-86-7466-337-0, url: http://2008.telfor.rs/files/radovi/07_02.pdf)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

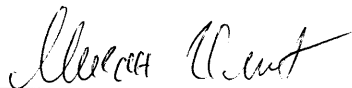
На основу изложеног, комисија констатује да докторска дисертација **Слободана В. Савића**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом „**Закривљени континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи вишег реда за великодоменско електромагнетско моделовање**“, испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Докторска дисертација Слободана Савића садржи научне доприносе који се састоје у развоју метода, нумеричких модела и софтвера за ефикасно и тачно моделовање континуално нехомогених и неизотропних електромагнетских средина методом коначних елемената. Главни резултати истраживања приказани су у радовима [1] и [2] објављеним у међународним часописима, од којих је један категорије M21, а други M22, где је кандидат првопотписани. Развијени су и додатни алгоритми који су од интереса при геометријском моделовању вишег реда који су приказани у међународном часопису [3] категорије M22, где је кандидат другопотписани. Остварени научни резултати омогућавају реализовање и даљи развој ефикасних алгоритама велике тачности за потребе нумеричке електромагнетике. Током целокупне израде докторске дисертације кандидат је показао несумњиву способност за самосталан научноистраживачки рад.

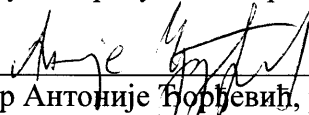
Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под насловом „**Закривљени континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи вишег реда за великодоменско електромагнетско моделовање**“ кандидата **Слободана В. Савића**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 3. јул 2015. године.

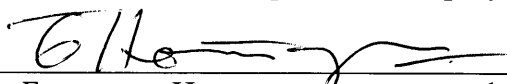
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



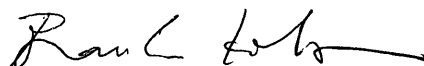
др Милан Илић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



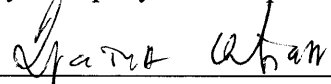
др Антоније Горђевић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Бранислав Нотарош, редовни професор
Electrical and Computer Engineering Department, Colorado State University,
Fort Collins, Colorado, USA



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



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