

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Подобност теме и кандидата мастер инж. електротехнике Слободана В. Савића за израду докторске дисертације.

На 771. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, одржаној 25. фебруара 2014. године, одређени смо за чланове Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата Слободана В. Савића, мастер инж. електротехнике и рачунарства, под насловом **“Закривљени континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи вишег реда за великодоменско електромагнетско моделовање”**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата и на основу обављене јавне усмене одбране предложене теме, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

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 ФЕМ-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 је завршио 28. септембра 2009. године са просечном оценом 10,0, 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 10,0.

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 истакнутом међународном часопису (M22), три рада у домаћем научном часопису (M53), пет саопштења са међународног скупа штампаних у целини (M33), три саопштења са међународног скупа штампаних у изводу (M34) и пет саопштења са скупа 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).

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат је докторске студије уписао 1. децембра 2009. године. Све испите на модулу Микроталасна техника, као и изборне предмете ван модула, положио је са оценом 10. У оквиру предмета *Микроталасна пасивна кола* кандидат се упознао са основним теоријским поставкама пројектовања микроталасних филтара реализованих у техници правоугаоних таласовода. Неколико микроталасних филтара реализованих у техници правоугаоних таласовода нумерички је моделовао у комерцијално доступним софтверским пакетима за општу тродимензиону (3D) електромагнетску (ЕМ) анализу (WIPL-D 3D Pro, WIPL-D Microwave, Ansoft HFSS и AWR Microwave Office). У оквиру предмета *Микроталасна техника* кандидат се упознао са теоријским основама анализе сигнала на вишепроводничким водовима у временском домену и пројектовао софтвер за анализу транзијентних сигнала на вишепроводничким водовима. У оквиру предмета *Метод коначних елемената у електромагнетници* кандидат се упознао са основним поставкама метода коначних елемената, као и са напредним техникама моделовања ЕМ проблема полиномским функцијама базиса вишег реда. Кандидат је за практичан део испита написао софтвер за нумеричку једнодимензиону (1D) анализу вишеслојног расејача методом коначних елемената у фреквенцијском домену, написао је софтвер за одређивање резонантне учестаности правоугаоне савршено проводне шупљине и написао је софтвер за 1D анализу вишеслојног расејача методом коначних елемената у временском домену. У оквиру предмета *Анализа и синтеза антена и Антене и простирање радиоталаса* кандидат се упознао са најчешће коришћеним аналитичким моделима за анализу микротракастих антена, са математичком теоријом интеграције у околини стационарне тачке и концептом угаоног спектра равних таласа. Кандидат је пројектовао алгоритам за ефикасан дизајн микротракасте антене напајане сондом на основу кога је објављен рад на међународној конференцији. У оквиру предмета *Метод момената у електромагнетници* кандидат се упознао са основама метода момената. Пројектовао је софтвер за анализу 1D, дводимензионих (2D) и 3D проблема електростатике и брзо-променљивог ЕМ поља. Нумерички је анализирао утицај везе вртложних струја са површинским наелектрисањима на тачност глобалног решења. У оквиру предмета *Електромагнетика* кандидат је за практични део испита проучио проблеме расејања ЕМ поља на савршено проводној сфери, диелектричној сфери, као и расејање на савршено проводној или диелектричној сфери обложеној произвољним бројем диелектричних сферних љуски. За сваки од ових случајева кандидат је развио софтвер заснован на Мијевој теорији расејања. У оквиру предмета *Нумеричка анализа* (који је ван модула) кандидат се упознао са методима нумеричке интеграције у времену и особинама стабилности метода, а развио је (нумерички) модул за решавање система линеарних диференцијалних једначина. У оквиру предмета *Микроталасна електроника* кандидат се упознао са напредним техникама пројектовања активних микроталасних уређаја користећи се нелинеарним моделима и симулацијама хармоник баланс методом.

У радовима [1] и [2], који су у директној вези са предложеном темом докторске дисертације, описана је ефикасна нумеричка анализа нових теоријских ЕМ структура (покривних слојева) за смањење радарског попречног пресека (*radar cross section*, RCS) расејача. Кључна особина оваквих структура је континуална промена неизотропних параметара средине. У раду [3], који је посредно повезан са предложеном темом докторске дисертације, изучен је проблем оптималне параметризације елемената, који је веома важан за великодоменско моделовање закривљеним елементима.

1.2.1. Списак радова кандидата у међународним часописима са импакт фактором

- [1] S. V. Savić, A. B. Manić, M. M. Ilić, and B. M. Notaroš, "Efficient higher order full-wave numerical analysis of 3-D cloaking structures," *Plasmonics*, vol. 8, no. 2, pp. 455-463, July (published online) 2012. (M21, ISSN: 1557-1963, IF за 2012: 2,425)
- [2] S. V. Savić, B. M. Notaroš, and M. M. Ilić, "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. (M22, ISSN: 1084-7529, IF за 2012: 1,665)
- [3] M. M. Ilić, S. V. Savić, A. Ž. Ilić, and B. M. Notaroš, "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. (M22, ISSN: 1536-1225, IF за 2011: 1,374)

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат испуњава све формалне услове за започињање израде докторске дисертације са предложеном темом. Осим чврсто испуњених формалних услова, 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, способност формулисања алгоритама, као и дефинисања структура података неопходних да би се теоријски модели могли користити за прорачуне на рачунару.

2. **Предмет истраживања**

Предмет истраживања ове докторске дисертације је нумеричко моделовање и анализа ЕМ проблема великодоменским, закривљеним, континуално нехомогеним и неизотропним коначним елементима (*finite elements*, FE) вишег реда.

У дисертацији ће се најпре сагледати теорија трансформационе електромагнетике (трансформационе оптике). Применом ове теорије развиће се алгоритам и софтвер за конструкцију и нумеричку анализу нових теоријских ЕМ структура (покривних слојева) за смањење радарског попречног пресека расејача. Инхерентна особина оваквих структура је континуална промена неизотропних параметара средине. На конкретним примерима, провериће се тачност и ефикасност новог великодоменског начина моделовања оваквих структура закривљеним, континуално нехомогеним и неизотропним коначним елементима вишег реда. Како у свету не постоји софтвер за нумеричку ЕМ анализу у коме се користе велики континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи, добијени резултати ће бити упоређени са аналитичким решењима (која постоје у веома ограниченом броју случајева) и са нумеричким решењима добијеним моделовањем малодоменским, хомогеним, тетраедарским коначним елементима ниског реда апроксимације ЕМ поља. Практична примена ЕМ структура добијених на описани начин је за сада ограничена. Међутим, њихова примена у коначним елементима математички произвољних (па и нефизичких) параметара средине може бити веома корисна при конструкцији нових апсорпционих слојева за ограничавање нумеричког домена (затварање) у методу коначних елемената (*finite element method*, FEM).

У наставку ће се размотрити постојеће могућности затварања домена нумеричке анализе отворених ЕМ проблема методом коначних елемената локалним и глобалним граничним условима. Развиће се нов апсорпциони гранични услов (*absorbing boundary condition*, ABC) вишег реда, примерен великим закривљеним хексаедарским елементима вишег реда. Његове перформансе ће се упоредити са до сада коришћеним апсорпционим граничним условом првог реда. Апсорпциони гранични услов другог реда се најчешће користи као оптималан услов локалног типа за затварање FEM

домена у постојећим софтверским пакетима, који по правилу користе запреминску дискретизацију простора (*meshing*) тетраедрима, где се овај услов лако имплементира. Међутим, ефикасна имплементација сличног услова реда вишег од првог за велике закривљене елементе вишег реда није описана у отвореној литератури. На крају ће се размотрити могућност примене коначних елемената добијених теоријом трансформационе електромагнетике, као што је описано у претходном одељку, у циљу побољшања перформанси апсорпционих граничних услова.

Коначно, као незаобилазан функционални део разматрања ЕМ анализе великим закривљеним елементима, биће дат осврт на специфичности у погледу особина дискретизација геометрије разматраног проблема закривљеним великодоменским елементима заснованим на Лагранжовим интерполационим полиномима вишег реда. Биће предложена једна врста једноставног просторног мапирања родитељских домена на закривљене домene у циљу постизања што тачнијих резултата ЕМ анализе.

3. Циљ истраживања

Основни циљ истраживања је

- нумеричко моделовање континуално нехомогених и неизотропних ЕМ средина добијених теоријом трансформационе електромагнетике.

Основним циљем истраживања биће обухваћени и

- теорија трансформационе електромагнетике и њена примена у нумеричкој анализи конкретних ЕМ проблема,
- унапређење перформанси постојећих апроксимативних апсорпционих граничних услова у моделовању великим закривљеним коначним елементима и њихово побољшање применом теорије трансформационе електромагнетике,
- оптималан избор редова полинома апроксимације ЕМ поља и електричне величине коначних елемената, као и редова полинома нумеричке интеграције у случају изотропних и неизотропних средина, и
- повећање тачности нумеричке анализе подобнијим функцијама просторног мапирања код великих закривљених елемената.

4. Значај истраживања

Метод коначних елемената је један од најзначајнијих нумеричких метода за моделовање широког спектра инжењерских проблема. Иако је, у основном облику, формулисан пре дужег времена, а нумеричка електромагнетика добро изучена научна област, развојем технике и технологије пред савремене нумеричке алате за анализу ЕМ проблема стално се постављају нови и комплекснији задаци.

Првобитно развијене формулације метода коначних елемената ниског реда апроксимације ЕМ поља и скромне геометријске флексибилности постају недовољно ефикасне и тачне за данашње потребе, поготову када је циљ да се симулације врше на многобројним и приступачним личним рачунарима. Због тога, у последње време, нумерички методи вишег реда са геометријски флексибилним елементима постају све значајнији и чешће коришћени у модерној инжењерској пракси. Са друге стране, свако додатно усложњавање модела пред инжењера-корисника поставља нови скуп могућности и параметара симулације које је потребно правилно изабрати. Стога је неопходно проучити све аспекте нумеричке анализе ЕМ поља, како би се метод могао успешно користити у пракси.

Нове ЕМ структуре и пратећи елементи који их моделују данас могу бити врло комплексни, како геометријски, тако и по особинама својих параметара. Структуре добијене недавно развијеном теоријом трансформационе електромагнетике су по правилу нехомогене и неизотропне. Стога се јавља нова потреба за методима који су у

стању да их ефикасно и тачно моделују, као и скуп препорука за исправно и ефикасно коришћење тих метода.

Важно је напоменути да иако постоје нумерички методи који су се показали ефикаснијим за одређену класу проблема (на пример, метод момената за анализу отворених ЕМ проблема), када је потребно анализирати проблеме изузетне комплексности (континуално нехомогене и неизотропне средине), метод коначних елемената и даље представља први избор. Развојем нових апсорпционих граничних услова настоји се да се повећа тачност и прошири дијапазон могућности примене метода коначних елемената у електромагнетици.

5. Осврт на релевантне библиографске изворе

- [1] Roger F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, Wiley-IEEE Press, 2nd edition, 2001.
- [2] Jin A. Kong, *Electromagnetic Wave Theory*, John Wiley and Sons, 1986.
- [3] Olek C Zienkiewicz, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Butterworth-Heinemann, 6th edition, 2005.
- [4] Peter P. Silvester and Ronald L. Ferrari, *Finite Elements for Electrical Engineers*, Cambridge University Press, 3rd edition, 1996.
- [5] Jian-Ming Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, Wiley-IEEE Press, 2nd edition, 2002.
- [6] B. M. Notaroš, "Higher order frequency-domain computational electromagnetics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2251-2276, August 2008.
- [7] M. M. Ilić and B. M. Notaroš, "Higher order hierarchical curved hexahedral vector finite elements for electromagnetic modeling," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 3, pp. 1026-1033, March 2003.
- [8] M. M. Ilić, A. Ž. Ilić, and B. M. Notaroš, "Continuously inhomogeneous higher order finite elements for 3-D electromagnetic analysis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 9, pp. 2798-2803, September 2009.
- [9] A. B. Manić, S. B. Manić, M. M. Ilić, and B. M. Notaroš, "Large anisotropic inhomogeneous higher order hierarchical generalized hexahedral finite elements for 3-D electromagnetic modeling of scattering and waveguide structures," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 7, pp. 1644-1649, 2012.
- [10] K. Do-Hoon and D. H. Werner, "Transformation electromagnetics: An overview of the theory and applications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 52, no. 1, pp. 24-46, 2010.

Референца [1] представља основу опште теорије ЕМ поља. У референци [2], осим опште теорије ЕМ поља, посебан акценат је стављен и на анализу ЕМ поља у комплексним срединама (све до простирања равних таласа у бианизотропним срединама). Референца [3] представља класичан извор опште теорије метода коначних елемената, а референце [4] и [5] спадају у основну литературу везану за примену метода коначних елемената у електромагнетици.

У [6] је дат преглед метода вишег реда у електромагнетици. У [7] су уведени великодоменски закривљени континуално нехомогени коначни елементи вишег реда. У [8] је спроведена нумеричка анализа континуално нехомогених средина, а у [9] континуално нехомогених и неизотропних средина методом коначних елемената. У [10] је изложена теорија трансформационе електромагнетике и приказан одређен број конкретних (нумеричких) примена.

6. Полазне хипотезе

Основне полазне поставке у раду су:

- Дискретизација простора закривљеним коначним елементима би требало да буде што је могуће приближнија геометрији анализираног проблема, без обзира на електричну величину коначних елемената.
- Апроксимација ЕМ поља коначним елементима вишег реда би требало да буде што је могуће тачнија без обзира на комплексност параметара средине анализираног проблема.
- До сада коришћене публиковане FEM формулације нису у стању да адекватно одговоре на новонастале потребе нумеричке ЕМ анализе.
- Не постоје студије случаја за употребу закривљених континуално нехомогених неизотропних елемената вишег реда.
- Развој предложене методологије ће подићи квалитет ЕМ моделовања у односу на до сада најчешће коришћене нумеричке моделе (део по део хомогене и део по део равне).

7. Методи истраживања

Пошто је тема из области нумеричке електромагнетике, истраживање ће бити спроведено највећим делом кроз развој нових метода, алгоритама и софтвера, као и њихову верификацију нумеричким експериментима. Резултати нумеричких експеримената ће се поредити са резултатима других нумеричких експеримената, добијених по могућству другачијим методама, ради додатне валидације. Када је то могуће, резултати нумеричких експеримената ће се поредити и са аналитичким решењима, као и са резултатима мерења.

На основу теоријских разматрања особина ЕМ поља у околини расејача коначних димензија пројектоваће се нови апсорпциони гранични услови, а њихове перформансе ће бити тестиране нумеричким експериментима.

На основу теорије трансформационе електромагнетике, пројектоваће се нова теоријска структура за смањење радарског попречног пресека ЕМ расејача. Ефикасност и перформансе ове структуре ће бити тестиране нумеричким експериментима.

8. Очекивани научни доприноси

Оригинални научни допринос дисертације би био у следећем:

- 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 испитивање могућности унапређења постојећих граничних услова применом теорије трансформационе електромагнетике.
- Повећање тачности анализе употребом подобнијих функција просторног мапирања код великих закривљених елемената.
- Анализа случаја оптималног избора редова полиномске апроксимације ЕМ поља и електричне величине коначних елемената, као и редова полинома нумеричке интеграције код моделовања изотропних и неизотропних средина.

9. План истраживања

Најпре ће се проучити геометријско моделовање закривљеним хексаедарским елементима вишег реда и хијерархијске полиномске функције базиса вишег реда. Сагледаће се постојећи методи за анализу континуално нехомогених неизотропних

средина и уочити њихова ограничења. Проучиће се постојећи методи за затварање домена нумеричке ЕМ анализе методом коначних елемената. Ради одређивања тачности и ефикасности нумеричке ЕМ анализе закривљеним, континуално нехомогеним, неизотропним елементима вишег реда, анализираће се структура за смањење радарског попречног пресека расејача. Теоријом трансформационе електромагнетике пројектоваће се нова структура за смањење радарског попречног пресека расејача. Развиће се апсорпциони гранични услов вишег реда и размотриће се могућност примене теорије трансформационе електромагнетике на унапређење перформанси постојећих апсорпционих граничних услова.

10. Извештај са јавне усмене одбране предложене теме докторске дисертације

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 Електротехничког факултета,
- др Златан Стојковић, редовни професор Електротехничког факултета, 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.

Усмена одбрана је почела у 17:05 часова, а завршена у 18:20 часова.

Одбрана је почела тако што је председник Комисије, проф. др Антоније Ђорђевић, упознао присутне са хронологијом пријаве теме, одлукама Наставно-научног већа, основним подацима о кандидату и основним подацима о пријављеној теми докторске дисертације.

Затим је кандидат, у трајању од око 20 минута, изложио основне поставке предложене теме докторске дисертације.

По завршеној презентацији, чланови Комисије су кандидату поставили по неколико питања.

- Проф. др Бранислав Нотарош је поставио питање у вези са фреквенцијским опсегом Пендријеве прекривке, неколико питања у вези са трансформацијом координата из презентације теме, неколико питања у вези са апсорбујућим граничним условом, затражио је да се концепцијски објасни разлика између поступака геометријског моделовања, као и да се прецизније опише будући рад у вези са предложеном темом докторске дисертације. Презентацију је оценио одличном, као и одговоре на питања.
- Проф. др Златан Стојковић је затражио да се објасни разлика између метода момената и метода коначних елемената. Питао је да ли се софтвер описан у предлогу теме докторске дисертације развија од почетка или се надограђује, да ли се улазни подаци могу преузети из других програма, као и да ли се описани метод може применити на моделовање лоцирања атмосферског пражњења.
- Проф. др Антоније Ђорђевић је поставио питање о разлици између варијационог метода и Галеркиновог метода. Питао је шта се у методу коначних елемената добија ако непозната функција истовремено задовољава и једначину дивергенције, и једначину ротора. Затражио је објашњење због чега се Пендријев „материјал“ не може физички реализовати, као и да ли прекривка функционише за коцку без обзира на угао инциденције таласа.

На сва питања кандидат је успешно одговорио.

Из публике није било питања. Предложени ментор, др Милан Илић, прокоментарисао је да прекривке добијене трансформационом електромагнетиком по правилу нису физички остварљиве, али да су неспорно корисне као апсорбујући елементи у нумеричком моделовању.

По завршеној одбрани, Комисија се повукла на већање и једногласно донела следећи закључак:

Комисија је закључила да је кандидат на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације добио оцену „задовољно“. Комисија предлаже да ментор докторске дисертације буде др Милан Илић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

11. Закључак и предлог

На основу изложеног, комисија констатује да мастер инж. електротехнике Слободан В. Савић испуњава све потребне услове да може приступити изради докторске дисертације под насловом **“Закривљени континуално нехомогени и неизотропни коначни елементи вишег реда за великодоменско електромагнетско моделовање”**.

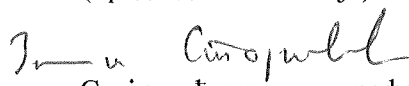
Предложена тема је научно заснована, припада ужој научној области Електромагнетика, антене и микроталаси и представља развој методологије за анализу комплексних ЕМ проблема са континуално нехомогеним и неизотропним параметрима средине методом коначних елемената. Тема је и од практичног значаја јер омогућава ефикасан прорачун 3D електромагнетских проблема.

Стога комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да одобри Слободану В. Савићу израду докторске дисертације под руководством др Милана Илића, ванредног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

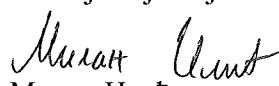
6. април 2014.

Чланови комисије


др Антоније Ђорђевић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
(председник комисије)


др Златан Стојковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Бранислав Нотарош, редовни професор
Electrical and Computer Engineering Department
Colorado State University
Fort Collins, Colorado, USA
(члан комисије који није запослен на ЕТФ-у)


др Милан Илић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
(предложени ментор)