

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Милоша Д. Давидовића**

На Наставно-научном већу Електротехничког факултета одржаном 18. новембра 2014. године (Одлука број 5057/07-3 од 26. 11. 2014. године) именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Милоша Д. Давидовића**, дипломираног инжењера електротехнике, под насловом „**Б-сплајн хексаедарски елементи за 3Д електромагнетско моделовање**“.

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

Милош Давидовић је као стипендиста Министарства науке, 2008. 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. Два испита са докторских студија, Научни рад 3 и Научни рад 4, кандидату су призната на основу два објављена рада са SCI листе, на којима је кандидат првопотписан. Током рада на испитима са модула, кандидат је показао интересовање за нумеричке методе у електромагнетици, са чијим основама се упознао кроз испите Метод момената у електромагнетици и Метод коначних елемената у електромагнетици. Под менторством др Милана Илића, ванредног професора, кандидат је 2011. године започео истраживачки рад везан за употребу Б-сплајн функција у методи коначних елемената.

Кандидат Милош Давидовић је 6. маја 2013. године пријавио тему за израду докторске дисертације под радним насловом „Б-сплајн хексаедарски елементи за 3Д електромагнетско моделовање“. Комисија за студије III степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и 9. маја 2013. године упутила Наставно-научном већу предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата на усвајање. Наставно-научно веће Електротехничког факултета именовало је 14. маја 2013. године Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу:

- др Милан Илић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (ментор),
- др Бранко Колунџија, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет и
- др Братислав Миловановић, редовни професор, Универзитет у Нишу – Електронски факултет.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета усвојило је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације на седници одржаној 11. јула 2013. године. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Милоша Давидовића, под насловом „Б-сплајн хексаедарски елементи за 3Д електромагнетско моделовање“, на седници одржаној 16. септембра 2013. године (Одлука бр. 61206-3935/2-13 од 16. 9. 2013. године).

Милош Давидовић је предао докторску дисертацију 23. октобра 2014. године, под насловом „Б-сплајн хексаедарски елементи за 3Д електромагнетско моделовање“, на преглед и оцену. Комисија за студије III степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације 12. новембра 2014. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације на седници одржаној 18. новембра 2014. године (Одлука бр. 5057/07-3 од 26. 11. 2014. године), у саставу:

- др Милан Илић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (ментор и председник комисије),
- др Бранко Колунџија, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Братислав Миловановић, редовни професор, Универзитет Сингидунум,
- др Драган Олћан, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет и
- др Ненад Цакић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

Ова одлука је званично достављена Комисији тек 8. децембра 2014. године.

На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 2944/2 од 11. 10. 2007. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2007/2008 године, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета.

По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду, као и додатно продужење за годину дана (Одлука бр. 24-06/04-2007/5057).

## 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, има укупно 21 рад из наведене научне области у часописима који имају *impact factor*, од којих је 19 објављено у последњих 10 година.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Милош Давидовић је рођен 29. јануара 1984. године у Београду где је завршио основну школу и Математичку гимназију, обе као носилац Вукове дипломе. Упоредо је завршио нижу и средњу музичку школу “Мокрањац”.

Електротехнички факултет, Универзитета у Београду, уписао је 2002. године, освојивши награду на пријемном испиту. Дипломирао је одбранивши дипломски рад “НМЕА декодирање и приказ података“ са оценом 10, и средњом оценом 9,45 током студија. Упоредо са студијама на Електротехничком факултету, студирао је на гудачком одсеку Филолошко-уметничког факултета Универзитета у Крагујевцу, где је дипломирао са оценом 10 у класи проф. Срђана Стошића и средњом оценом 9,53 током студија.

Као стипендиста Министарства науке, 2008. године уписао је докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Микроталасна техника, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Године 2011. запослио се у Институту за нуклеарне науке „Винча”, у Лабораторији за заштиту од зрачења и заштиту животне средине, као учесник на пројекту Министарства број ОН171028. До сада је, као аутор или коаутор, објавио 10 научних радова у међународним часописима, од чега су 3 објављена у врхунским часописима (M21) и више радова на домаћим и међународним конференцијама.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Б-сплајн хексаедарски елементи за 3Д електромагнетско моделовање“ има укупно 143 стране. По форми и структури у свему одговара Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14. децембра 2011. године.

Дисертација има седам поглавља и списак литературе. Делови дисертације су:

- Насловна страна, апстракт на српском и енглеском језику и Садржај,
- Увод, 4 стране,
- 1. Основе методе коначних елемената, 21 страна,
- 2. Основне дефиниције и особине Б-сплајн функција, 16 страна,
- 3. Геометријско моделовање у методи коначних елемената вишег реда, 14 страна,
- 4. Моделовање електричног поља, 22 стране
- 5. Нумерички резултати и дискусија, 59 страна,
- 6. Закључак, 2 стране,
- Референце, 3 стране и
- Биографија кандидата и списак одабраних радова, 2 стране.

У дисертацији има укупно 44 слике, 27 табела и 88 нумерисаних једначина. Литература садржи 68 библиографских јединица.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводу су дате идеје водиље које су мотивисале истраживачки рад на теми дисертације. Уз основну мотивацију наведени су и оригинални научни доприноси дисертације. Такође је дат и кратак преглед преосталих поглавља.

У првом поглављу су наведене основе методе коначних елемената (МКЕ), дат је приказ карактеристичних једначина у неколико различитих области и детаљно је решен 1Д пример из електростатике. Наведене су и битније публикације везане за примену МКЕ у електромагнетици. Такође су наведени и примери употребе Б-сплајн функција у контексту нумеричке електромагнетике. Потом је дискутован теоријски и практични оквир за МКЕ у електромагнетици.

У другом поглављу су дате основне дефиниције и особине Б-сплајн функција. Кратко су размотрени алгоритми додавања чворова и подизања степена ових функција. Описан је и општи алгоритам за налажење линеарних веза између различитих фамилија сплајнова.

У трећем поглављу је описано геометријско моделовање помоћу Б-сплајн функција. Дате су дефиниције хексаедарског елемента параметризованог помоћу Б-сплајн функција и наведено је неколико примера параметризације. Наведен је и алгоритам за аутоматску параметризацију помоћу којег је могуће параметризовати 3Д коначни елемент када је задата његова површ. Развијен је и алгоритам за инверзно пресликавање који може бити од користи при накнадној анализи у МКЕ. На крају поглавља су дискутоване особине меша у геометријском моделовању вишег реда.

У четвртом поглављу су уведене две врсте 3Д функција базиса, што представља главни научни допринос ове дисертације. Детаљно је дискутовано обезбеђивање континуалности тангенцијалне компоненте електричног поља када се користе ове функције базиса. Изведени су

изрази за израчунавање елемената МКЕ матрица и описан је одговарајући алгоритам попуњавања МКЕ матрица. Описане су разлике при попуњавању МКЕ матрица за два типа коришћених функција.

У петом поглављу су анализирана три нумеричка примера на којима су примењене новоуведене методе. На примерима шупљине облика квадрата и сферичне шупљине је, на основу нумеричких резултата, показано да су хијерархијске полиномске функције специјалан случај Б-сплајн функција (када ове функције немају унутрашњих чворова). Ово је потврђено и кроз теоријску анализу и такође је један од оригиналних резултата дисертације. На примеру шупљине са гребеном показана је могућност Б-сплајн функција да успешно моделују сингуларна поља, било кроз коришћење континуалних Б-сплајн функција, било кроз коришћење Б-сплајн функција са смањеном континуалношћу на месту очекиваног сингуларитета. Дато је објашњење на који начин понављање чворова опонаша класично смањивање елемената при моделовању (*h*-профињивање). У моделу резонантне шупљине са више елемената извршена је анализа конвергенције по узору на методу која се користи у HFSS софтверу (који се сматра индустријским стандардом за симулацију електромагнетских поља). Добијене су одличне конвергенције свих коришћених модела и илустрована је потреба за оптималним одређивањем границе конвергенције.

У закључку су још једном наведени основни доприноси дисертације и дати правци могућег даљег истраживања.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Метода коначних елемената (МКЕ) је једна од најзначајнијих нумеричких метода у модерној инжењерској пракси. Методе вишег реда (било у смислу вишег реда геометријске апроксимације, било у смислу вишег реда апроксимације поља) све су више заступљене у нумеричкој електромагнетици, јер пружају веће могућности при геометријском моделовању, побољшану конвергенцију и ефикасност. Иако су МКЕ и њене основне поставке већ дуго познате, а нумеричка електромагнетика развијена научна област, истраживачки рад у овој области је врло жив. То је стога што употреба различитих базисних функција у формулацији може довести до драстичних разлика у тачности и ефикасности МКЕ прорачуна.

У овом контексту кандидат је оригиналност своје дисертације потврдио на најбољи могући начин – објављивањем два рада у међународним часописима од којих је један категорије M21, а други категорије M23, на којима је кандидат првопотписан.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У раду је коришћена обимна литература из области 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 закључка о потреби и адекватности независног моделовања геометрије и поља у МКЕ у електромагнетици и коришћењу Б-сплајн функција за геометријско моделовање. Основни аргумент у овом смеру је чињеница да постоје различити услови које морају да испуњавају модели за апроксимацију геометрије и модели за апроксимацију електричног поља, као и да су Б-сплајн функције веома заступљене у алатима за геометријско моделовање. Затим су аналитичким поступцима изведени изрази који су неопходни за реализацију геометријског моделовања, као и за формулацију МКЕ у електромагнетици. Резултати су потом потврђени путем нумеричких експеримената, за које је кандидат користио софтвер који је самостално развио током истраживачког рада у оквиру докторских студија.

Анализа стања и трендова у области коришћења Б-сплајн функција, као базиса за моделовање поља, показала је да је употреба ових функција веома слабо разјашњена у отвореној литератури. Кандидат је стога самостално развио формулацију нових Б-сплајн базисних функција, изводећи детаљно аналитичке изразе за попуњавање МКЕ матрица. При томе је анализирао и неке могућности ефикаснијег попуњавања матрица, које произилазе из особина карактеристичних за Б-сплајн функције. Будући да су у тези формулисана два различита типа базисних функција, изрази за попуњавање МКЕ матрица су детаљно изведени за оба типа функција. Такође је испитна и веза која постоји између два типа функција и утврђено је да су хијерархијске полиномске функције специјалан случај Б-сплајн функција. Као доказ су послужили и нумерички примери и разматрања заснована на аналитичким изразима.

За примену развијених метода коришћени су примери који у довољној мери имају особине реалних инжењерских проблема (нпр. нетривијална геометрија и присуство сингуларног поља), а да су при томе довољно једноставни за анализу и прорачун уз коришћење самостално развијеног академског софтвера за унос геометрије, електромагнетску анализу и постпроцесирање добијених резултата.

Предности и мане нових формулација су критички сагледане и дате су смернице за даљи рад.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати до којих је кандидат дошао у својој дисертацији могу имати непосредну примену у формирању нових нумеричких алгоритама и ефикаснијег софтвера за прорачун 3Д 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, било телекомуникационих, било оних са брзим дигиталним везама. Побољшање нумеричких метода може довести до поједностављења процеса пројектовања свих уређаја у којима постоје изражени електромагнетски ефекти који се не могу узети у обзир симулаторима заснованим на принципима теорије електричних кола и омогућити њихову ефикаснију оптимизацију.

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

Кандидат је у свом досадашњем раду показао квалитете пресудне за научноистраживачки рад, као што су схватање и проширивање теоријских концепата, оригиналност, способност да теоријске методе преточи у алгоритме, структуре података и рачунарске програме, као и да критички анализира добијене резултате.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОСИ**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни допринос дисертације је у следећем:

- формулација нове варијанте тродимензионе методе коначних елемената, где се независно моделују геометрија и поље уз употребу Б-сплајн функција за моделовање геометрије и
- проширење ове формулације на двоструко моделовање Б-сплајновима, тј. моделовање и геометрије и поља, независно, Б-сплајн функцијама.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Коришћење Б-сплајн функција, као основе геометријског моделовања електромагнетских структура, приказано је на неколико карактеристичних примера. Уз коришћење само једног елемента вишег реда, веома успешно су први пут у свету моделоване резонантне шупљине облика квадрата, сфере и шупљина са гребеном. Размотрен је и један могући алгоритам параметризације 3Д коначних елемената вишег реда који може донети извесна побољшања у тачности нумеричког прорачуна, а употреба алгоритма је илустрована на примеру резонантне шупљине са гребеном.

Моделовање електричног поља је размотрено и формулисано уз коришћење две врсте функција; хијерархијских полиномских функција и Б-сплајн функција. Показано је да су хијерархијске полиномске функције специјалан случај Б-сплајн функција које не садрже унутрашње чворове у вектору чворова. Ова еквивалентност је потврђена кроз нумеричке примере на примерима шупљина облика квадра и сфере, а такође је дато и детаљно теоријско објашњење. На основу овог објашњења могуће је увидети и значај геометријског моделовања, будући да је еквивалентност базисних функција могућа једино уз исти геометријски модел. На примеру шупљине са гребеном испитани су и модели са једним елементом (и неколико различитих параметризација) и модели са више елемената који су преузети из литературе или добијени употребом мешера. У моделима са једним елементом показана је могућност Б-сплајн функција да успешно моделују сингуларна поља, било кроз коришћење Б-сплајн функција максималног реда континуалности, било кроз коришћење Б-сплајн функција са смањеним редом континуалности на месту очекиваног сингуларитета. Дато је објашњење на који начин понављање чворова опонаша класично  $h$ -профињивање. Разматрани модели су дали одличну тачност у односу на индустријски стандард МКЕ прорачуна у електромагнетици, софтвер ANSYS HFSS. У моделу резонантне шупљине са више елемената извршена је анализа конвергенције по узору на методу која се користи у ANSYS HFSS софтверу. Добијене су одличне конвергенције свих коришћених модела и илустрована је потреба за оптималним одређивањем границе конвергенције.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси дисертације верификовани су следећим радовима<sup>1</sup>:

##### Категорија M21:

[1] **M. D. Davidović**, B. M. Notaroš, and M. M. Ilić, "B-Spline Entire-Domain Higher Order Finite Elements for 3-D Electromagnetic Modeling," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* (ISSN: 1531-1309), vol. 22, no. 10, October 2012, pp. 497–499. (IF<sub>2012</sub>: 1,784, DOI: 10.1109/LMWC.2012.2217123)

##### Категорија M23:

[2] **M. D. Davidović** and M. M. Ilić, "Double B-spline Finite Elements for 3D Electromagnetic Modeling," *Microwave and Optical Technology Letters* (ISSN: 0895-2477), vol. 56, no. 3, 2014, pp. 619–624. (IF<sub>2013</sub>: 0,623, DOI: 10.1002/mop.28178)

##### Категорија M53:

[3] **M. Davidović**, A. Ilić, M. Tasić, B. Notaroš, and M. Ilić, "A Comparison of Modal Electromagnetic Field Distributions in Analytical and Numerical Solutions," *Microwave Review*, vol. 19, no. 1, September 2013, pp. 26–30.

##### Категорија M63:

[4] **Милош Давидовић**, Ласло Нађђерђ, и Милан Илић, "Параметризација хексаедарских елемената у методи коначних елемената вишег реда у 3Д електромагнетици," *Зборник 58. Конференције ЕТРАН*, Врњачка Бања, 2–5. јун 2014, АР1.1.1–4.

[5] **Miloš Davidović**, Andjelija Ilić, Miodrag Tasić, Branislav Notaroš, and Milan Ilić "Convergence of Modal Electromagnetic Fields in a B-spline Finite Element Method", *Proceedings of 57th ETRAN Conference*, Zlatibor, Serbia, June 3-6, 2013, pp. AP1.5.1–4

Референца [5] је награђена као најбољи рад на конференцији ЕТРАН у секцији Антене и простирање и, у нешто проширеном облику, објављена у [3].

<sup>1</sup> Финалне верзије радова у часописима су послате пре 1. октобра 2013. године, односно пре ступања на снагу Одлуке о афилијацији коју је донело Наставно-научно веће Електротехничког факултета 16. априла 2013. године.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

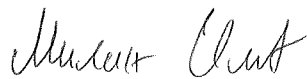
На основу изложеног, комисија констатује да докторска дисертација Милоша Д. Давидовића, дипломираног инжењера електротехнике, под насловом „Б-сплајн хексаедарски елементи за 3Д електромагнетско моделовање“ испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Докторска дисертација Милоша Давидовића садржи научне доприносе који се састоје у пионирском формулисању нове варијанте тродимензионе методе коначних елемената за електромагнетску анализу, где се независно моделују геометрија и поље уз употребу Б-сплајнова. Ове формулације су приказане у радовима објављеним у међународним часописима [1,2], од којих је један категорије M21, а други M23, где је кандидат првопотписан. Развијени су и додатни алгоритми који могу бити од интереса при геометријском моделовању вишег реда који су приказани на домаћој конференцији ЕТРАН 2014 [4]. Објављене формулације МКЕ омогућавају реализовање и даљи развој ефикасних алгоритама високе тачности за потребе нумеричке електромагнетике. Током целокупне израде докторске дисертације као и на укупном раду на пројекту Министарства науке ОН171028, кандидат је показао несумњиву способност за самосталан научноистраживачки рад.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под насловом „Б-сплајн хексаедарски елементи за 3Д електромагнетско моделовање“ кандидата Милоша Д. Давидовића, дипломираног инжењера електротехнике прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 5. март 2015. године

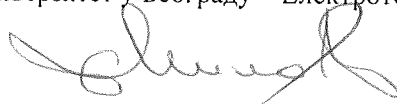
### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



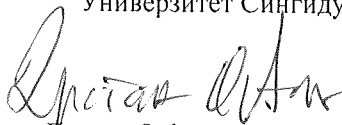
др Милан Илић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



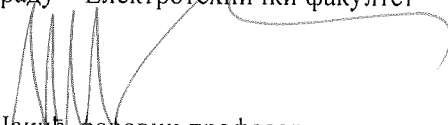
др Бранко Колунџија, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Братислав Миловановић, редовни професор  
Универзитет Сингидунум



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



др Ненад Цакић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет