

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **Павла Петровића**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства.

Одлуком бр. 650/7 од 08.04.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **Павла Петровића** за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **Решавање једнодимензионих електромагнетских проблема специјалне релативности методом коначних елемената** (енгл. *Solving One-Dimensional Electromagnetic Problems in Special Relativity Using the Finite Element Method*).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Павле Петровић је рођен у Београду 1994. године. Завршио је Средњу електротехничку школу „Никола Тесла“ у Београду. У току школовања освојио је награду на републичком такмичењу из електронике.

Дипломске академске студије и мастер академске студије завршио је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2018. и 2019. године, респективно. Уписао је докторске академске студије на истом факултету 2019. године.

Од 2018. до 2023. године радио је у Vlatasom институту високих технологија у Београду као истраживач специјализован за радарске системе, а 2023. године преселио се у Абу Даби, Уједињени Арапски Емирати, где тренутно ради у компанији Vlatasom Technology.

Главне области интересовања Павла Петровића укључују примењену електромагнетику, са фокусом на електромагнетику покретних средина, антене и антенске системе, као и обраду сигнала, са фокусом на обраду радарског сигнала и сигнала са антенских система.

Током свог ангажовања у Vlatasom институту и компанији Vlatasom Technology, радио је на бројним истраживачким и комерцијалним мултидисциплинарним пројектима у областима савремених радарских и комуникационих система. Решења која је развио као део неколико тимова активно се користе у више земаља широм света. Његов допринос обухвата и хардверска решења у облику антенских система и микроталасних компонената, као и софтверска решења у виду алгоритама за обраду сигнала у реалном времену и софтвера за праћење и контролу система.

Коаутор је 19 научних радова у часописима и на конференцијама, као и 2 техничка решења.

Два пута, 2020. и 2021. године, био је део тимова Електротехничког факултета који су учествовали у студентском такмичењу Друштва за Антене и Простирање (AP-S) Института Инжењера Електротехнике и Електронике (IEEE). У оквиру тих тимова студенти из целог света такмичили су се у дизајну и изради различитих антенских система. Оба пута тимови Електротехничког факултета су се пласирали међу 6 најбољих тимова на глобалном нивоу.

Добитник је неколико стипендија и студентских награда:

- Награда „Блажо Мирчевски“ за најбољи рад младог аутора на конференцији TELFOR 2023;
- IEEE AP-S „C.J. Reddy“ стипендија за путовање, 2022;
- Стипендија града Београда, 2012;
- Стипендија Доситеја Фонда за младе таленте Републике Србије, 2012.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат Павле Петровић је 11.10.2019. године уписао докторске студије на Електротехничком факултету у Београду на Смеру за микроталасну технику. Током докторских академских студија испунио је све предвиђене обавезе и положио све испите са просечном оценом 10:

Назив испита или обавезе	Оцена	ЕСПБ
Микроталасна електроника (13Д071МЕ)	10	9
Напредне технике за микроталасно формирање слике (13Д071НТМ)	10	9
Просторно-временска обрада сигнала (13Д031ПВО)	10	9
Електромагнетика (19Д071ЕМ)	10	9
Увод у научни рад (19Д091УНР)	10	6
Микроталасна техника (19Д071МТ)	10	9
Електромагнетска компатибилности и интегритет сигнала (19Д071ЕКИ)	10	9
Антене и простирање радиоталаса (19Д071АПР)	10	9
Метод коначних елемената у електромагнетици (19Д071МКЕ)	10	9
Интегрисана кола за комуникационе и радарске системе (19Д041ИКР)	10	9
Студијско истраживачки рад I		15
Научно стручни рад		3
Студијско истраживачки рад II		15

Активности по предметима на докторским студијама су:

- **Микроталасна електроника:** упознавање са релевантном литературом (*Steve C. Cripps "RF Power Amplifiers for Wireless Communications"*), консултације и пројекат. Задатак пројекта је било пројектовање микроталасних компоненти FMCW (*eng. Frequency Modulated Continuous Wave*) радара: миксера, појачавача за предајни и референтни сигнал, и пратећих пасивних компонената.
- **Напредне технике за микроталасно формирање слике:** упознавање са релевантним научним радовима, консултације, два пројектна задатка на тему формирања микроталасне слике методом холографије у блиском пољу антенског низа, и развоја методе примарне обраде сигнала и детекционог алгорита за FMCW радар на учестаности од 77 GHz.
- **Просторно-временска обрада сигнала:** упознавање са релевантном литературом (*Harry L. Van Trees "Optimum Array Processing"*), консултације и пројекат. Пројектни задатак је био из области имплементације RFoF (*eng. Radio Frequency over Fiber*) линка у OTHR (*eng. Over-the-Horizon Radar*) и утицаја RFoF линка на обраду сигнала добијених помоћу OTHR.
- **Електромагнетика:** упознавање са релевантном литературом (*Бранко Поповић „Електромагнетика“*), консултације и пројекат. Тема пројектног задатка је била

анализа електромагнетског поља равног таласа који наилази на слојевити, једнодимензиони диелектрични расејач. Пројекат је обухватао извођење аналитичких израза за расејано поље директним решавањем, као и итеративном методом.

- **Увод у научни рад:** упознавање са релевантном литературом (*Зоран В. Поповић „Како написати и објавити научно дело“*), консултације и пројекат. Пројектни задатак је био форматирање научног рада по узору на пример датом у обрађеној литератури.
- **Микроталасна техника:** упознавање са релевантном литературом, консултације и пројекат. Задатак пројекта био је пројектовање, израда и мерење активне, електрички кратке антене у краткоталасном опсегу (од 3 MHz до 30 MHz).
- **Електромагнетска компатибилност и интегритет сигнала:** упознавање са релевантном литературом (*Howard W. Johnson, Martin Graham “High-speed of digital design – a handbook of black magic”*), консултације и пројекат. Пројекат је обухватао тестирање отпорности комерцијалне електронике на електромагнетско зрачење и електростатичко пражњење које превазилази нивое дефинисане цивилним стандардима електромагнетске компатибилности.
- **Антене и простирање радиоталаса:** упознавање са релевантном литературом (*Constantine A. Balanis “Antenna Theory: Analysis and Design”*), консултације, писмено и усмено испитивање.
- **Метод коначних елемената у електромагнетици:** упознавање са релевантном литературом (*Milan Ilić, “Higher order hexahedral finite elements for electromagnetic modeling,” PhD thesis*) консултације и два пројектна задатка. Пројектни задаци су били рачунање карактеристичних модова тродимензионог савршено проводног шупљег квадра методом коначних елемената са базисним функцијама вишег реда, и решавање дводимензионих магнетостатичких проблема методом коначних елемената са базисним функцијама првог реда.
- **Интегрисана кола за комуникационе и радарске системе:** упознавање са доступном документацијом LimeSDR софтверски дефинисаног радија, консултације и пројектни задатак. Пројектни задатак био је реализација Доплеровог радара помоћу LimeSDR Mini софтверски дефинисаног радија.

Библиографија кандидата:

Рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком (M24)

- [1] D. Nikolić, N. Stojković, **P. Petrović**, N. Tošić, N. Lekić, Z. Stanković, and N. Dončov, "The High Frequency Surface Wave Radar Solution for Vessel Tracking Beyond the Horizon," *FU Elec Energ*, vol. 33, no. 1, pp. 37-59, March 2020. doi: 10.2298/FUEE2001037N

Рад у часопису националног значаја (M52)

- [1] **P. Petrović**, B. Džolić, N. Lekić, N. Grbić, A. Ćupurdija, V. Orlić, and M. Erić, "Testing RFoF Link for Transmitting HF-OTHR Signal Between Transmitter and Receiver Shelters," *Telfor Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 13-18, 2021. doi: 10.5937/telfor2101013P

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

- [1] **P. Z. Petrović**, S. V. Savić, A. Ž. Ilić, and M. M. Ilić, "FEM Analysis of 1-D Electromagnetic Problems Containing Relativistically Moving Media," in *Proc. 31st Telecommunications forum TELFOR 2023*, Belgrade, Serbia, November 21-22, 2023, pp. 298-301. doi: 10.1109/TELFOR59449.2023.10372726

- [2] **P. Z. Petrović**, N. R. Grbić, N. Lekić, M. Perić, and S. V. Savić, "Aircraft Detection Range for HF Radar," in *Proc. 31st Telecommunications forum TELFOR 2023*, Belgrade, Serbia, November 21-22, 2023, pp. 294-297. doi: 10.1109/TELFOR59449.2023.10372733
- [3] N. R. Grbić, **P. Z. Petrović**, N. Lekić, M. Perić, and S. V. Savić, "Radar Cross Section for a Ship with Masts in the High-Frequency Band," in *Proc. 31st Telecommunications forum TELFOR 2023*, Belgrade, Serbia, November 21-22, 2023, pp. 278-281. doi: 10.1109/TELFOR59449.2023.10372745
- [4] **P. Z. Petrović**, D. Đokić, N. R. Grbić, N. Milenić, S. V. Savić, and M. M. Ilić, "Design and Manufacturing of C-Band FMCW Radar," in *Proc. 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, Denver, CO, USA, July 10-15, 2022, pp. 79-80. doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886341
- [5] A. Đ. Čupurdija, **P. Z. Petrović**, O. Z. Jakovljević, V. J. Janković, S. V. Savić, and M. M. Ilić, "SDR Platform Implementation of DoA Detection Algorithm for Wireless Security Applications," in *Proc. 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, Denver, CO, USA, July 10-15, 2022. doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886050
- [6] **P. Z. Petrović**, S. V. Savić, and M. M. Ilić, "Electromagnetic Modelling of Micro-Doppler Signatures of Commercial Airborne Drones," in *Proc. 29th Telecommunications forum TELFOR 2021*, Belgrade, Serbia, November 23-24, 2021. doi: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653308
- [7] **P. Petrović**, B. Džolić, N. Lekić, N. Grbić, A. Čupurdija, V. Orlić, and M. Erić, "Testing RFoF Link for Transmitting HF-OTHR Signal Between Transmitter and Receiver shelters," in *Proc. 28th Telecommunications Forum TELFOR 2020*, Belgrade, Serbia, November, 24-25, 2020, pp. 1-4. doi: 10.1109/TELFOR51502.2020.9306559
- [8] N. Grbić, **P. Petrović**, A. Čupurdija, N. Lekić, and S. V. Savić, "The Influence of Different Realization of Ground Plane on a Characteristic of HFSWR Transmitter Monopole Array," in *Proc. 7th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2020*, Belgrade, Serbia, September 28-29, 2020, pp. 119-123. Available: https://www.etrans.rs/2020/IcETRAN/Conference_Proceedings/
- [9] N. Stojkovic, D. Nikolic, **P. Petrovic**, N. Tosic, I. Gluvacevic, N. Stojiljkovic, and N. Lekic, "An Implementation of DBF and CFAR Models in OTHR Signal Processing," in *Proc. IEEE 15th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications, IEEE CSPA 2019*, Penang, Malaysia, March, 8-9, 2019, pp. 7-11. doi: 10.1109/CSPA.2019.8695974
- [10] D. Nikolic, N. Tosic, B. Dzolic, N. Grbic, **P. Petrovic**, A. Djurdjevic, and N. Lekic, "Tailoring OTHR Deployment in Order to Meet Conditions in Remote Equatorial Areas," in *Proc. IEEE 15th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications, IEEE CSPA 2019*, Penang, Malaysia, March, 8-9, 2019, pp. 12-15. doi: 10.1109/CSPA.2019.8696093
- [11] S. Puzovic, Z. Cica, I. Gluvacevic, **P. Petrovic**, and D. Nikolic, "HFSWR Performance Analyses in a Typical Equatorial Environment," in *Proc. 14th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2019*, Niš, Serbia, October, 23-25, 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/TELSIKS46999.2019.9002013
- [12] **P. Petrović**, N. Grbić, N. Stojković, D. Nikolić, and N. Lekić, "Implementation of algorithm for excision of point targets from distributed radar detections," in *Proc. 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2019*, Srebrno jezero, Serbia, June, 03-06, 2019, pp. 1000-1004. Available: https://etrans.rs/2019/Proceedings_IcETRAN_ETRAN_2019.pdf
- [13] N. Grbić, **P. Petrović**, D. Nikolić, N. Stojković, and V. Orlić, "Analysis of different window function effects on DBF in HFSWR signal processing," in *Proc. 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2019*, Srebrno jezero, Serbia, June, 03-06, 2019, pp. 1005-1008. Available: https://etrans.rs/2019/Proceedings_IcETRAN_ETRAN_2019.pdf

- [14] **P. Petrović**, N. Grbić, B. Džolić, N. Lekić, and M. Perić, "Software for Monitoring of Direct Path Test Data for HFSW Over the Horizon Radar," in *Proc. 5th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2018*, Palić, Serbia, June 11-14, 2018, pp. 1244-1247. Available: https://www.etrans.rs/2018/IcETRAN/Conference_Proceedings/

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34)

- [1] **P. Z. Petrović**, N. R. Grbić, N. Lekić, M. Perić, and S. V. Savić, "Aircraft Detection Using HF Radar," in *Proc. 2022 Global Electromagnetics Conference (GlobalEM)*, Abu Dhabi, UAE, November 13-17, 2022. Available: <https://www.globalem2022.com/assets/images/papers/29.pdf>, <https://www.globalem2022.com/program.php>
- [2] N. R. Grbić, **P. Z. Petrović**, N. Lekić, M. Perić, and S. V. Savić, "Influence of mast positioning on ship RCS in HF band," in *Proc. 2022 Global Electromagnetics Conference (GlobalEM)*, Abu Dhabi, UAE, November 13-17, 2022. Available: <https://www.globalem2022.com/assets/images/papers/14.pdf>, <https://www.globalem2022.com/program.php>

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини (M63)

- [1] N. Grbić, **P. Petrović**, N. Stevanović, B. Džolić, D. Nikolić, and N. Lekić, "Simulacija radarske površine brodova u kratkotalasnom frekvencijskom opsegu," in *Proc. 62. Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ETRAN 2018*, Palić, 11-14 jun, 2018, pp. 126-129. Available: https://www.etrans.rs/2018/ETRAN/Zbornik_radova/

Битно побољшано техничко решење на међународном нивоу (M83)

- [1] **P. Petrović**, N. Grbić, A. Ćupurdija, B. Džolić, V. Orlić, N. Lekić, and M. Erić, "Unapređenje robusnosti prenosa predajnog signala radara za posmatranje izvan linije horizonta," Vlatacom d.o.o., Bitno poboljšano tehničko rešenje na međunarodnom nivou (M83) 2020.

Ново техничко решење у фази реализације (M85)

- [1] D. Marjanović, B. Džolić, N. Lekić, N. Grbić, **P. Petrović**, M. Perić, and V. Orlić, "Softverski alat za projektovanje i vizualizaciju sistema za pomorski nadzor," Vlatacom Institut Visokih Tehnologija, Novo tehničko rešenje u fazi realizacije (M85) 2021.

Кандидат је 15.04.2025. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду јавно усмено бранио предложену тему докторске дисертације пред Комисијом у саставу:

1. др Милан Илић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
2. др Анђелија Илић, научни саветник, Институт за физику Универзитета у Београду,
3. др Марко Крстић, ванредни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

На јавној усменој одбрани предложене теме, Комисија је закључила да је кандидат Павле Петровић добио оцену задовољно и да испуњава потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу резултата које је кандидат постигао у свом досадашњем стручном и научном раду, од којих бисмо издвојили следеће:

- сакупио је сто двадесет (120) ЕСПБ (полагањем испита на докторским студијама и обављањем научно истраживачких обавеза),
- јавно је одбранио тему докторске дисертације 15.04.2025. године, пред Комисијом (др Милан Илић, др Анђелија Илић и др Марко Крстић) формираном од стране Наставно-

научног већа Електротехничког факултета у Београду на седници број 907. одржаној 08.04.2025. године,

- публиковао је укупно деветнаест радова, од којих су два публикована у домаћим часописима, четрнаест у саопштењима са међународних научних скупова штампаних у целини, два у саопштењима са међународних научних скупова штампаних у изводу, и један у саопштењу са скупа националног значаја штампаног у целини, као и два техничка решења, што га квалификује за научни рад,
- остварио је практично искуство у области коју покрива предложена тема докторске дисертације,

можемо закључити да кандидат **Павле Петровић** у сваком погледу **испуњава** суштинске и формалне услове који га квалификују да приступи изради докторске дисертације са предложеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Последњих више од пет деценија сложеност електромагнетских (ЕМ) проблема које решавамо непрестано расте. У почетку, фокус је био на решавању релативно једноставних ЕМ проблема са временски непроменљивим пољима и једноставним параметрима средине [1]. Савремене технике нумеричке електромагнетике напредовале су до тачке да се данас могу решавати врло сложени ЕМ проблеми који укључују брзо-променљива ЕМ поља и сложене параметре средине [2]. Међутим, упркос огромном напретку, нумеричке технике развијене до сада и даље нису у стању да реше опште ЕМ проблеме, укључујући и проблеме са покретним срединама. Модерне нумеричке технике су већином засноване на класичном облику Максвелових једначина [3] у формулацији која не може моделовати ЕМ проблеме покретних средина. Са друге стране, постоје и другачије формулације Максвелових једначина, а једна од њих позната је под називом једначине Максвел-Минковског [3, 4]. Разлог због кога једначине Максвел-Минковског нису постале често коришћене у оквиру метода коначних елемената [5, 6] (енглески: *Finite Element Method – FEM*) је, између осталог, и то што није могуће формирати таласну једначину у облику који се често користи у оквиру FEM-а. Предмет истраживања ове докторске дисертације биће нумеричко моделовање методом коначних елемената ЕМ проблема који садрже средине које се крећу униформно и транслаторно у односу на посматрача.

Развој нумеричке технике која је способна да реши било који ЕМ проблем са покретним срединама представљао би значајан искорак у области нумеричке електромагнетике. Такви проблеми више нису описани класичним Максвеловим једначинама, а за њихово адекватно решавање неопходно је добро познавање теорије специјалне релативности [7-11]. Решавање једнодимензионог (1-D) ЕМ проблема расејања са покретним срединама представља први корак на том путу, а то ће уједно бити и главни циљ истраживања ове докторске дисертације. Додатно, теорија специјалне релативности и пратећи феномени могу бити неинтуитивни за многе инжењере и могу довести до погрешних интерпретација резултата. Циљ ове докторске дисертације биће и решавање нумеричких примера који су илустративни са становишта интерпретације феномена специјалне релативности. За решавање тих примера користиће се метода коначних елемената развијена у оквиру ове докторске дисертације.

Ово истраживање је врло значајно за развој нумеричке електромагнетике и омогућиће прецизно решавање ЕМ проблема са покретним срединама без ограничења по питању правца и смера кретања расејача. Ово не само да је од велике важности за напредак у области нумеричке електромагнетике, већ има и конкретну примену у разним инжењерским дисциплинама где се ефекти кретања не могу занемарити. Један од таквих примера је и систем глобалног позиционирања (енглески: *Global Positioning System – GPS*).

Релевантни радови из области истраживања:

- [1] W. R. Smythe, *Static and Dynamic Electricity*, 3rd revised ed. Bristol, PA: Taylor & Francis, 1989.

- [2] J.-M. Jin, *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*, 1 ed. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2010.
- [3] C.-T. Tai, "A Study of Electrodynamics of Moving Media," *Proc. IEEE*, vol. 52, no. 6, pp. 685-689, June 1964. doi: 10.1109/PROC.1964.3050
- [4] H. Minkowski, V. Petkov, Ed. *Spacetime: Minkowski's Papers on Spacetime Physics*. Minkowski Institute Press, 2020.
- [5] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, *Finite Elements for Electrical Engineers*, 3 ed. New York: Cambridge University Press, 1996.
- [6] J.-M. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- [7] A. Einstein, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper (On the Electrodynamics of Moving Bodies)," *Ann. Phys.*, vol. 322, no. 10, pp. 891-921, June 1905. doi: 10.1002/andp.19053221004
- [8] J. G. Van Bladel, *Relativity and Engineering* (Springer Series in Electrophysics 15). Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [9] D. Morin, *Special Relativity (For the Enthusiastic Beginner)*. CreateSpace, 2017.
- [10] P. Collier, *A Most Incomprehensible Thing: Notes Towards a Very Gentle Introduction to the Mathematics of Relativity*. Incomprehensible Books, 2012.
- [11] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3 ed. New Jersey: Wiley, 1998.
- [12] C. Yeh, "Reflection and Transmission of Electromagnetic Waves by a Moving Dielectric Medium," *J. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 11, pp. 3513-3517, November 1965. doi: 10.1063/1.1703029
- [13] C. Yeh and K. F. Casey, "Reflection and Transmission of Electromagnetic Waves by a Moving Dielectric Slab," *Physical Review*, vol. 144, no. 2, pp. 665-669, April 1966. doi: 10.1103/PhysRev.144.665
- [14] A. Ž. Ilić and M. M. Ilić, "Higher-Order Frequency-Domain FEM Analysis of EM Scattering Off a Moving Dielectric Slab," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 890-893, 10 July 2013. doi: 10.1109/LAWP.2013.2272717
- [15] A. Ž. Ilić, S. V. Savić, and M. M. Ilić, "Finite Element 1-D Solutions in the Presence of Moving Media," in *Proc. 13th International Workshop on Finite Elements for Microwave Engineering, FEM 2016*, Florence, Italy, May 16-18, 2016, pp. 138-138. Available: http://www.fupress.com/redir.ashx?RetUrl=3127_8833.pdf
- [16] P. Z. Petrović, S. V. Savić, A. Ž. Ilić, and M. M. Ilić, "FEM Analysis of 1-D Electromagnetic Problems Containing Relativistically Moving Media," in *Proc. 31st Telecommunications forum TELFOR 2023*, Belgrade, Serbia, November 21-22, 2023, pp. 298-301. doi: 10.1109/TELFOR59449.2023.10372726
- [17] P. Z. Petrović, S. V. Savić, and M. M. Ilić, "Electromagnetic Modelling of Micro-Doppler Signatures of Commercial Airborne Drones," in *Proc. 29th Telecommunications forum TELFOR 2021*, Belgrade, Serbia, November 23-24, 2021. doi: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653308
- [18] C. Yeh, "Brewster Angle for a Dielectric Medium Moving at Relativistic Speed," *J. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 13, pp. 5194-5200, December 1967. doi: 10.1063/1.1709301
- [19] M. M. Ilić and B. M. Notaroš, "Higher order hierarchical curved hexahedral vector finite elements for electromagnetic modeling," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 51, no. 3, pp. 1026-1033, March 2003. doi: 10.1109/tmtt.2003.808680
- [20] E. M. Klopč, N. J. Šekeljić, M. M. Ilić, and B. M. Notaroš, "Optimal Modeling Parameters for Higher Order MoM-SIE and FEM-MoM Electromagnetic Simulations," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 6, pp. 2790-2801, June 2012. doi: 10.1109/TAP.2012.2194669
- [21] M. M. Ilić, A. Ž. Ilić, and B. M. Notaroš, "Continuously Inhomogeneous Higher Order Finite Elements for 3-D Electromagnetic Analysis," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 9, pp. 2798-2803, September 2009. doi: 10.1109/tap.2009.2027350

- [22] 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 2012. doi: 10.1007/s11468-012-9410-0
- [23] 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. doi: 10.1364/JOSAA.30.000007
- [24] S. V. Savić and M. M. Ilić, "Curved Continuously Inhomogeneous and Anisotropic Higher Order Finite Elements for Accurate Large-Domain Electromagnetic Modeling," in *Proc. 24th Telecommunications Forum TELFOR 2016*, Belgrade, Serbia, November 22-23, 2016, pp. 535-542. doi: 10.1109/TELFOR.2016.7818840
- [25] J. A. Kong, *Electromagnetic Wave Theory*. Cambridge, Massachusetts, USA: EMW Publishing, 2008.
- [26] W. C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media* (IEEE Series on Electromagnetic Wave Theory). New York: IEEE Press, 1995.

3. Полазне хипотезе

- У оквиру анализе ЕМ проблема расејања може се спровести декомпозиција ЕМ поља на такав начин да се проблем може решити методом коначних елемената за произвољан правац и смер кретања једнодимензионог расејача.
- Методом коначних елемената може се решити широка група проблема из претходне тачке.
- Метода коначних елемената је у стању да задовољавајуће тачно реши разматране електромагнетске проблеме и адекватно моделује све феномене описане теоријом специјалне релативности.

4. Научне методе истраживања

- Прикупљање и анализа постојећих знања из монографија и научних радова који се баве теоријом специјалне релативности и методом коначних елемената.
- Формулација и имплементација метода коначних елемената за анализу проблема са покретним срединама.
- Спровођење већег броја нумеричких експеримената, обрада добијених резултата, њихова анализа и интерпретација и поређење са раније доступним резултатима.

5. Очекивани научни допринос

У овој дисертацији биће представљена нова универзална метода коначних елемената вишег реда заснована на принципима теорије специјалне релативности. Нумеричка метода ће бити формулисана за решавање једнодимензионих проблема расејања ЕМ таласа. Према нашим тренутним сазнањима, у досадашњој литератури не постоје решења заснована на методи коначних елемената којима се могу решити овакви проблеми у случају униформног трансаторног кретања расејача у произвољном правцу и смеру у простопериодичном режиму. Приступ представљен у овој дисертацији представљаће значајан напредак у односу на решења, методе и примере који се могу наћи у постојећој литератури [12-17]. Такође, биће верификована тачност предложене методе коначних елемената увођењем аналитичког решења једнодимензионог проблема расејања за случај када је расејач део-по-део хомоген.

У оквиру ове дисертације биће анализирано више пажљиво одабраних нумеричких примера са два главна циља. Први циљ је да се покаже да предложена метода коначних елемената прецизно предвиђа све познате ЕМ ефекте предвиђене теоријом специјалне релативности, као и да се оцени укупна тачност приказане нумеричке технике. На тај начин сагледаће се реална ограничења приказане нумеричке методе. Други циљ биће анализа неинтуитивних феномена који проистичу када се узму у обзир сви ефекти теорије специјалне релативности и пружање интерпретација које би могле бити корисне не само инжењерима већ и комплетној заједници која се бави нумеричком електромагнетиком, нарочито у

случајевима где су постојеће интерпретације ретке или могу довести до погрешних закључака. Један такав пример је и анализа и интерпретација Брустеровог угла [18] за једнодимензиони расејач који се креће лонгитудинално (вектор брзине има искључиво компоненту управну на површ расејача).

Биће спроведена студија случаја испитивања конвергенције тачности решења у зависности од одабраних полиномских редова апроксимације поља и нумеричке интеграције [19, 20]. На тај начин биће формиран скуп препорука за одабир ових параметара како би се са становишта рачунарских ресурса што ефикасније добили резултати задовољавајуће тачности.

На крају истраживања, биће предложено неколико потенцијалних праваца за будући рад, укључујући анализу континуирано нехомогених покретних расејача и анализу неизотропних покретних расејача [21-24]. Очекујемо да ће ова дисертација, осим својих директних доприноса, послужити и као темељни корак ка развоју робусне и прецизне методе коначних елемената за решавање широког спектра ЕМ проблема који укључују покретне средине.

6. План истраживања и структура рада

У дисертацији ће бити предложена метода коначних елемената [5, 6] која је дизајнирана за решавање ЕМ проблема расејања са срединама које се крећу транслаторно и униформно у произвољном правцу. Користиће се метод промене координатног система (енглески: *frame hopping*) [8] како би се трансформисало ЕМ поље између два координатна система: једног у којем се средине крећу и другог у којем се средине не крећу у односу на посматрача. Након ове трансформације, ЕМ поље ће се раставити на трансверзалну електричну (ТЕ) и трансверзалну магнетску (ТМ) компоненту [25], што омогућава FEM формулацију преко скаларних величина [26]. Након одређивања ТЕ и ТМ делова ЕМ поља коришћењем метода коначних елемената, та два дела резултата ће се искомбиновати како би се добило комплетно ЕМ поље. Ово поље се потом трансформише назад у оригинални координатни систем, у којем се средине крећу у односу на посматрача, након чега ће се израчунати сви релевантни подаци, укључујући расподелу ЕМ поља у близини расејача, као и коефицијенти рефлексије и трансмисије.

Поред предложене методе коначних елемената, биће развијена и релативно једноставна аналитичка метода за решавање истог једнодимензионог проблема расејања у специфичном случају када је расејач део-по-део хомоген. Аналитичка метода биће заснована на истој ТЕ/ТМ декомпозицији, а на крају требало би да резултује једноставном матричном једначином која се може једноставно аналитички имплементирати. Главна мотивација за развој ове аналитичке методе биће пружање додатног скупа резултата, који су неопходни за валидацију нумеричких резултата добијених методом коначних елемената. Финално, кроз низ нумеричких експеримената, одредиће се препоруке за подешавање степена полиномске апроксимације и нумеричке интеграције у оквиру приказане методе коначних елемената.

У раду ће бити описане основе различитих приступа при решавању електромагнетских проблема који садрже покретне средине. Биће описан и дат пример решавања проблема класичном апроксимацијом, односно без узимања у обзир релативистичких ефеката. Затим ће бити дат преглед аспеката теорије специјалне релативности потребних за разумевање метода из рада. Биће описани аналитички и нумерички методи решавања једнодимензионих проблема електромагнетског расејања. Дискутоваће се квалитет решења у функцији типа и реда функција базиса, као и различити феномени који се јављају при кретању материјала у електромагнетском пољу. На крају, биће дати закључци, и потенцијални смерови даљег истраживања.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидата **Павла Петровића**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за израду докторске дисертације.
2. Предложена тема **„Решавање једнодимензионих електромагнетских проблема специјалне релативности методом коначних елемената“** (енглески: *Solving One-Dimensional Electromagnetic Problems in Special Relativity Using the Finite Element Method*) је научно заснована, а резултати до којих ће се доћи израдом ове дисертације представљаће значајан и оригиналан допринос. Тема припада ужој научној области Електромагнетика, антене и микроталаси.

Докторска дисертација ће бити написана на енглеском језику.

На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату **Павлу Петровићу** одобри израду докторске дисертације под насловом **„Решавање једнодимензионих електромагнетских проблема специјалне релативности методом коначних елемената“** (енглески: *Solving One-Dimensional Electromagnetic Problems in Special Relativity Using the Finite Element Method*), а за ментора предлаже **др Слободана Савића**, ванредног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У Београду,
20.04.2025.

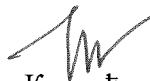
Чланови комисије



др Милан Илић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
(председник комисије)



др Анђелија Илић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за физику



др Марко Крстић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет