

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Младена Бановића

Одлуком Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду на својој 907. седници бр. 650/6 од 08.04.2025. године именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Младена Бановића под насловом “Све-оптички резервоар рачунар са временским кашњењем заснован на реконфигурабилној нелинеарности у Фабри-Перо ласеру” (енг. “*Time-delay all-optical reservoir computer based on the reconfigurable nonlinearity in Fabry–Perot laser*”). У складу са предлогом Комисије за студије трећег степена, наслов докторске дисертације је измењен у “**Свеоптички резервоар-рачунар са временским кашњењем заснован на реконфигурабилној нелинеарности у Фабри-Перо ласеру**” (енг. “*Time-delay all-optical reservoir computer based on the reconfigurable nonlinearity in Fabry–Perot laser*”)

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. Подаци о кандидату

#### 1.1. Биографски подаци

Младен Бановић је рођен 10.02.1995. године у Лозници. Завршио је основну школу “Анта Богичевић” у Лозници као носилац Вукове дипломе и ђак генерације. Уписао је гимназију „Вук Караџић“ у Лозници коју је завршио 2014. године као носилац Вукове дипломе. У току основне и средње школе учествовао је на свим нивоима такмичења из физике, математике и биологије.

Електротехнички факултет на Универзитету у Београду уписао је 2014. године. Током основних академских студија је био студент демонстратор на предметима Физичко техничка мерења и Оптичке телекомуникације. Дипломирао је у септембру 2018. године на Одсеку за физичку електронику, модул Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника, са просечном оценом 9,17 и дипломским радом на тему: „Карактеристике шума у фреквенцијским чешљевима добијеним директном модулацијом полупроводничког ласера“ под менторством проф. др Марка Крстића. У току основних академских студија био је на шестомесечној пракси у компанији Elsys Eastern Europe у области валидације силицијумских чипова. Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, на Одсеку за физичку електронику уписао је у

октобру 2018. године. Положио је све испите са просечном оценом 10,00. У септембру 2019. године одбранио је мастер рад на тему: „Моделовање мултимодног полупроводничког ласера применом просторно-временских брзинских једначина“ са оценом 10,00 под менторством проф. др Дејана Гвоздића.

Од јесени 2019. године је студент докторских студија Електротехничког факултета Универзитета у Београду под руководством проф. др Дејана Гвоздића. Све испите на докторским студијама положио је са просечном оценом 10. Фокус тренутног истраживања налази у области неуроморфне фотоники, конкретно резервоар рачунара и моделовању полупроводничких ласера за примене у машинском учењу. Током 2024. године провео је два месеца на Институту *Femto-st* у Безансону у Француској, у оквиру Еразмус стручног усавршавања, где се бавио развојем модела Фабри Перо ласера великих димензија, као и модела инјекционе синхронизације те одзива ласера услед инјекције различитих просторних и временских профила оптичке снаге.

Током студија је био ангажован као студент демонстратор при извођењу лабораторијских вежби на предметима *Физичко техничка мерења* и *Оптичке телекомуникације* на одсеку за Физичку електронику. Од децембра 1.6.2019. године је запослен на Електротехничком факултету у звању сарадника у настави, док је 23.10.2020. унапређен у звање асистента при Катедри за Микроелектронику и техничку физику, где је ангажован на 17 предмета на основним и 1 предмету на мастер академским студијама. На студентским анкетама је оцењен високом просечном оценом (средња вредност 4.85 од почетка запослења до данас). Учествовао је у 9 Комсија за одбрану завршног рада.

Служи се програмским језицима *C* и *Python*, док од осталих софтверских алата добро познаје *Matlab*, *Eagle PCB design*, *Lumerical* и *Optisystem*. Поседује основно знање француског и добро познаје енглески језик.

## 1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Током докторских студија на Електротехничком факултету, Младен Бановић је положио испите:

1. 13Д061ФО – Фуријеова оптика, оцена 10, 9 ЕСПБ
2. 13Д061МПЛ – Моделовање полупроводничких ласера, оцена 10, 9 ЕСПБ
3. 13Д061ОММ – Оптиоелектронске мерне методе, оцена 10, 9 ЕСПБ
4. 13Д061ФК – Фотонске комуникације, оцена 10, 9 ЕСПБ
5. 13Д061ТПНФ – Транспортни процеси у наноелектроници и фотоници, оцена 10, 9 ЕСПБ
6. 19Д061НО – Нелинеарна оптика, оцена 10, 9 ЕСПБ
7. 19Д051НМ – Неуралне мреже, оцена 10, 9 ЕСПБ
8. 19Д061ПИК – Пројектовање интегрисаних кола, оцена 10, 9 ЕСПБ
9. 19Д091ЕЈ – Енглески језик, оцена 10, 6 ЕСПБ
10. 19Д041ПИП – Пројектовање и примена паметних сензора, оцена 10, 9 ЕСПБ

и реализовао обавезе:

1. Студијски истраживачки рад 1 - 15 ЕСПБ, 30.09.2020.
2. Студијски истраживачки рад 1 - 15 ЕСПБ, 30.09.2021.
3. Научно стручни рад – 3 ЕСПБ, 30.09.2021.

30. септембра 2021. године је положио све испите са просечном оценом 10 и завршио обавезе предвиђене програмом докторских студија, остваривши укупно 120 ЕСПБ.

Младен Бановић је коаутор три рада у часописима од међународног значаја са импакт фактором, седам радова презентованих на међународним конференцијама и три рада саопштена на скуповима од националног значаја.

#### Категорија M20: Радови објављени у часописима међународног значаја

- [1] **M. Banović**, J. Crnjanski, M. Krstić, D. Gvozdić, Performance Enhancement of Reservoir Computing Based on Fabry-Pérot Laser as All-Optical Reconfigurable Nonlinear Node, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 42, No. 22, pp. 7785-7794, Nov, 2024. doi: 10.1109/JLT.2024.3422327 Impact factor: 4.7 (M21)
- [2] **M. Banović**, P. Atanasijević, M. Krstić, P. Mihailović, J. Crnjanski, S. Petričević, D. Gvozdić, Reconfigurable all-optical bistability/tristability in dual injection-locked Fabry-Perot laser diodes, OPTICS LETTERS, Vol. 48, No. 15, pp. 4165 - 4168, Aug, 2023. doi: 10.1364/OL.496482 Impact factor: 3.1 (M21)
- [3] M. Krstić, J. Crnjanski, **M. Banović**, I. Vasiljević, D. Gvozdić, Generation of a dual optical frequency comb by large signal modulation of a semiconductor laser, OPTICS LETTERS, Vol. 46, No. 19, pp. 4920 - 4923, 2021. doi: 10.1364/OL.437690 Impact factor: 3.56 (M21)

#### Категорија M30: Зборници међународних скупова

- [1] **M. Banović**, M. Todorović, M. Barjaktarović, L. Barjaktarović, J. Crnjanski, M. Krstić, D. Gvozdić, Adapting All-Optical Activation Functions for Predicting Stock Prices on the Frankfurt Stock Exchange, Treća srpska međunarodna konferencija o primenjenoj veštačkoj inteligenciji (Applied Artificial Intelligence 2024 - AAI2024), 2024. (M34)
- [2] P. Atanasijević, C. Pappas, **M. Banović**, J. Crnjanski, A. Tsakyridis, M. Moralis-Pegios, K. Vysokinos, M. Krstić, P. Mihailović, S. Petričević, N. Pleros, D. Gvozdić, Adaptive all-optical sigmoid activation functions for Photonic Neural Networks using Fabry-Perot laser diodes under optical injection, Optical Fiber Communication Conference 2024, Optica Publishing Group, San Diego, CA, Mar, 2024. (M33)
- [3] P. Mihailović, P. Atanasijević, **M. Banović**, M. Krstić, J. Crnjanski, S. Petričević, D. Gvozdić, Directions in all-optical computing with an emphasis on the Fabry Perot laser-lock-in approach, 17th Photonics Workshop, pp. 16-16, Institute of Physics Belgrade, Kopaonik, Mar, 2024 (M32)
- [4] P. Atanasijević, **M. Banović**, J. Crnjanski, M. Krstić, P. Mihailović, S. Petričević, D. Gvozdić, Reverse sigmoid-like nonlinearity in Fabry-Perot injection-locked lasers, IX International School and Conference on Photonics PHOTONICA 2023, pp. 135-135, Vinča Institute of Nuclear Sciences – National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, Belgrade, Sep, 2023. (M34)
- [5] J. Crnjanski, **M. Banović**, I. Teofilović, M. Krstić, D. Gvozdić, Application of adaptive activation unit based on injection-locked lasers in machine learning tasks, 2023 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM), Sicily, Italy, Jul, 2023. (M34)
- [6] J. Crnjanski, I. Teofilović, **M. Banović**, M. Krstić, D. Gvozdić, Implementation of Injection-Locked Fabry-Perot lasers as Activation Units in Photonics Neural Networks, Lasers, Optic and Photonics World Forum – optics-2022, Book of Abstracts, pp. 31, Porto, Portugal 2022. (M34)
- [7] **M. Banović**, M. Krstić, J. Crnjanski, D. Gvozdić, Analysis of the linewidth

enhancement factor impact on the spectral and noise characteristics of the gain switched laser optical frequency combs, VII International School and Conference of Photonics - PHOTONICA2019, pp. 153-153, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, 2019. (M34)

### Категорија М60: Зборници скупова националног значаја

- [1] I. Vasiljević, M. Krstić, J. Crnjanski, **M. Banović**, D. Gvozdić, Generation of a dual optical frequency comb by pulse of a single semiconductor laser using a step recovery diode, 29<sup>th</sup> Telecommunication Forum (TELFOR), November 2021, pp. 1-4 (M63 – излагала И. Васиљевић)
- [2] I. Teofilović, J. Crnjanski, **M. Banović**, M. Krstić, D. Gvozdić, An all-optical perceptron for binary classification, 29<sup>th</sup> Telecommunication Forum (TELFOR), November 2021, pp. 1-4 (M63 – излагала И. Теофиловић)
- [3] S. Bogojević, **M. Banović**, J. Crnjanski, M. Krstić, D. Gvozdić, Performance Analysis of Optical Reservoir Computer with Two Delayed Inputs, 2022 30<sup>th</sup> Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELFOR56187.2022.9983772 (M63 – излагала С. Богојевић)

Током досадашњег научноистраживачког рад, учествовао је у више **научно-истраживачких и наставно-образованих пројеката**:

- 2020. „*An Integrated Dual-Comb Gas Sensor*“, Фонд за науку Републике Србије – ПРОМИС
- 2020. „Унапређење и дигитализација наставе из Фотонике (*eFOTON*)“, МПНТР Републике Србије, развој високог образовања
- 2021. „Увођење наставе из физике за студенте електротехнике (*ETFizika*)“, МПНТР Републике Србије, развој високог образовања
- 2022. „*All-Optical Reservoir Computer Architecture based on Laser Bistability (ORCA-LAB)*“, Фонд за науку Републике Србије – ИДЕЈЕ

#### 1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Усмена одбрана теме докторске дисертације Младена Бановића је одржана 25.04.2025. године у просторијама Електротехничког факултета пред Комисијом у саставу др Јасна Црњански, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет, др Небојша Ромчевић, научни саветник, Универзитет у Београду - Институт за физику, др Пеђа Тадић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет, др Слободан Петричевић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет, др Марко Крстић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет.

Комисија је излагање кандидата оценила оценом **задовољно**.

Кандидат је успешно завршио све обавезе предвиђене наставном програмом докторских студија. Досадашње научноистраживачке активности кандидата су верификоване публикацијама у међународним часописима са SCI листе, у зборницима међународних скупова и скупова националног значаја као и кроз практичну имплементацију на истраживачким пројектима.

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада, оствареног искуства и узимајући у обзир целокупну документацију, Комисија сматра да је кандидат Младен Бановић подобан за рад на предложеној теми.

## 2. Предмет, циљ и значај истраживања

**Предмет истраживања** предложене докторске дисертације је теоријска студија и експериментална реализација све-оптичког резервоар рачунара са реконфигурабилном нелинеарном јединицом реализованом применом полупроводничког ласера у режиму дисперзионе бистабилности.

Резервоар рачунари (РР) су посебан рачунарски концепт из класе рекурентних неуронских мрежа, који се показао као изузетно ефикасан за секвенцијалну обраду података, као што је предикција временских серија са нагласком на хаотичне системе [1], препознавање говора, навигација робота [2], детекција аномалија [3], па чак и обрада слике [4]. Архитектура резервоар рачунара се тополошки састоји од 3 дела: улазног слоја, слоја резервоара у оквиру ког су нелинеарне јединице (чворови) рекурентно повезани и трећег, линеарног излазног слоја који садржи тежинске факторе за обучавање [5]. Захваљујући чињеници да се обучавају само излазни тежински фактори, обучавање РР је много једноставнији и динамички ефикаснији процес заснован на линеарној регресији [6]. РР имају већу скалабилност и адаптивност [7], ризик од преобучавања је мањи, конвергенција је бржа, а потребни рачунарски, односно енергетски ресурси мањи у односу на стандардне неповратне неуронске мреже, као што су вишеслојни перцептрони. Додатно поједностављење архитектуре РР постиже се увођењем временског кашњења кроз повратну петљу у оквиру које се формирају такозвани виртуелни чворови и коришћењем само једног елемента за извршавање нелинеарне трансформације [5, 8]. Број виртуелних чворова мреже одређен је односом времена потребног за пропагацију сигнала кроз повратну петљу и временског интервала додељеног појединачним чворовима, који је већи или једнак дужини трајања сигнала. Резултат прорачуна добија се сумирањем дела снаге виртуелних чворова након њиховог пондерисања тежинама у излазном слоју мреже, док се преостали део сигнала враћа у мрежу ради очувања меморије, која током времена постепено ишчезава [9]. Испоставља се да резервоар има боље перформансе ако се спрезање реализује у десинхронизационој шеми [10] која уводи додатно закашњење између спрегнутих стања.

У оквиру предложене тезе комплетан резервоар рачунар биће имплементиран у оптичком домену – повратну петљу обезбедиће оптичко влакно, а нелинеарну трансформацију полупроводнички Фабри-Перо ласер у режиму дисперзивне бистабилности [11]. Досадашњи концепти све-оптичких РР са полупроводничким ласерима као нелинеарним елементима, ослањали су се на конкавне профиле нелинеарности који, слично као и код полупроводничких оптичких појачавача, проистичу из ефекта сатурације снаге. Како се овакви профили нису показали довољно ефикасним за поједине класе задатака, од интереса је обезбедити и конвексне нелинеарне профиле, што у случају полупроводничких ласера као нелинеарних јединица није могуће постићи у произвољном режиму рада. У зависности од типа задатка, од интереса може бити да РР обезбеди изражену нелинеарну трансформацију или линеарно памћење претходних улазних секвенци. Како су ови захтеви међусобно контрадикторни, од значаја испитати могућност реконфигурације нелинеарних јединица тако да се, кроз обезбеђивање комплетне фамилије нелинеарних профила који се могу динамички селектовати, постигне унапређење перформанси задате архитектуре РР и прилагођење конкретном задатку од интереса.

Предмет истраживања предложене дисертације је примена реконфигурабилног нелинеарног елемента у реализацији архитектура РРa различитих степена сложености, са циљем унапређења рачунарских перформанси, конкретно тачности, меморије (линеарне и квадратне), брзине рада и енергетске ефикасности доминантно исказане преко минималног броја виртуелних чворова, неопходних за реализацију задатка.

Истраживање ће се фокусирати на избор оптималне нелинеарне функције из фамилије доступних функција тако да се постигну максималне перформансе РР у датој архитектури за конкретне задатке који се уобичајено користе за упоредну процену, као што су NARMA10, SantaFe предикциони скуп ласерских података, нелинеарно уједначавање канала (Nonlinear Chanell Equalization, NCE) и препознавање изоловано изговорене цифре (Isolated spoken digits, ISD), уз анализу квалитета и капацитета меморије. Нелинеарна јединица ће бити реализована као полупроводнички Фабри-Перо ласер који при оптичкој инјекцији у динамичком режиму, захваљујући ефекту бистабилности, омогућава генерисање различитих нелинеарних профила излазне оптичке снаге. Биће испитана могућност реконфигурације кроз варијацију струје поларизације, фреквенцијске раздешености између инјектованог сигнала и бочног мода Фабри-Перо ласера у чију околину се врши инјекција тј. варијацију радне температуре или кроз подешавање параметара оптичког филтрирања излазног сигнала. Посебна пажња биће усмерена на унапређење брзине рада и енергетске ефикасности предложене реконфигурабилне нелинеарне јединице.

**Циљ истраживања** је да се спроведе детаљно испитивање утицаја нелинеарних профила које може обезбедити иновативна реконфигурабилна нелинеарна јединица на перформансе РР за случај различитих архитектура и задатака намењених за упоредну процену. У случају да постоји значајан допринос профила нелинеарности на перформансе РР, биће одређене оптималне форме нелинеарности које доприносе максималном повећању перформанси, за сваку од архитектура и врсту задатака, као и квантитативне мере овог повећања. Истраживање ће обухватити анализу потенцијала реконфигурабилног нелинеарног чвора и нових архитектура РР у постизању енергетски ефикасне неуралне мреже, која ће у оквиру теоријске и експерименталне варијанте обезбедити минимални број виртуелних чворова уз одржавање мале грешке предвиђања, као и велике брзине рада.

**Значај истраживања** предложене докторске дисертације произилази из потребе за развојем нових, енергетски ефикасних и напредних технолошких решења у домену вештачке интелигенције, чему је придата посебна пажња и кроз Стратегију за развој вештачке интелигенције за период од 2025. до 2030. године у Републици Србији. Концепт предложеног рачунарског система ослања се на хардвер који почива на фотоници, а која је као једна од кључних развојних технологија препозната и у Стратегији паметне специјализације у Републици Србији за период од 2020-2027 године.

Све-оптичка реализација РР нуди низ значајних предности у односу на дигитална хардверска и софтверска решења, пре свега у погледу енергетске ефикасности и паралелизације. То отвара перспективу примене све-оптичких хардверских акцелератора као основе будућих *Green AI* технологија, које ће у погледу брзине обраде и енергетске ефикасности превазићи зид ефикасности постојеће фон Нојманове и њој сличних архитектура, дефинисан Кумијевим законом. Дисертација ће понудити револуционарни приступ у погледу фотонских акцелератора на бази РРа, будући да примена реконфигурабилне нелинеарне јединице може омогућити избор оптималних нелинеарних профила и сходно томе, значајно већу тачност рада РР, смањење броја неопходних виртуелних чворова, као и повећање брзине рада на више од 5 Gb/s.

### 3. Полазне хипотезе

Предложено истраживање се заснива на следећим хипотезама:

1. Конвергенција, тачност рада и предикције, као и број неопходних виртуелних чворова РР у великој мери зависи од профила нелинеарне активационе јединице. Нелинеарност коју обезбеђује полупроводнички ласер у стандардном режиму

инјекционе синхронизације није у потпуности дефинисана имајући у виду да може да зависи од предисторије система, док је са друге стране за очекивати да њихова излазна оптичка снага подсећа на конкавну монотону растућу карактеристику, која се среће код полупроводничких оптичких појачавача. Други уређаји који одговарају све-оптичким активацијама, као што су сатурациони апсорбери, обезбеђују слабо нелинеаран одзив.

2. Реконфигурабилност нелинеарне јединице омогућава да се подеси оптималан нелинеарни профил за различите конфигурације и врсте задатака РРа, чиме нелинеарна јединица може компензовати потребе за повећањем броја виртуелних чворова или њихове диверзификације, које су кључне за постизање брзе конвергенције и високе тачности.
3. Дисперзиона бистабилност ласера у динамичком режиму оптичке инјекције и делимичне синхронизације може да обезбеди реконфигурабилни нелинеарни оптички одзив, који се може успоставити контролом фреквенцијске раздешености упадног оптичког сигнала и њему фреквенцијски блиског бочног мода ласера, струјом поларизације ласера, температуром и ширином и позицијом оптичког филтра. Променом ових параметара могуће је у великој мери утицати на профил нелинеарности, позиционирати праг највећег нагиба или прилагодити област сатурације. На тај начин може се генерисати комплетна фамилија функција различитих конкавних и конвексних облика и то од оних који иду од облика хиперболе, преко сигмоиде до функције попут PreLU.
4. Применом двоструке оптичке инјекције могуће је убрзати динамички одзив рада ласера и повећати брзину рада нелинеарне јединице на изнад 5 Gb/s.
5. Ефекти поларизационе дисперзије у оптичком влакну у коме се налазе виртуелни чворови, немају значајан утицај на перформансе РР и могу се иницијално занемарити.
6. Сложене архитектуре са вишеструко закаснелим поворкама виртуелних чворова могу да помогну у повећању квалитета и капацитета меморије и реализације сложених задатака који имају потребу за појачаним меморијским перформансама.

#### 4. Методе истраживања

Методе истраживања се у основи могу поделити на теоријске и експерименталне. Теоријски модели ће бити ослоњени на методе симулације реконфигурабилне нелинеарне јединице и њеног одзива, методе пропагације виртуелних чворова кроз оптичко влакно у присуству слабљења, хроматске дисперзије и кохерентног спрезања постојећих и нових виртуелних чворова, методе обучавања тј. подешавања тежинских коефицијената, методе за тестирање РР и упоредну анализу постигнутих перформанси. Применом ових метода биће симулиран рад РР-а у дигиталном и физичко-аналогном домену. У наставку су дати детаљи поменутих теоријских метода:

1. Реконфигурабилна нелинеарна јединица биће моделована применом мултимодних брзинских једначина по: концентрацији фотона за лонгитудиналне модова и за мод у режиму оптичке инјекције, фази мода у режиму инјекције и концентрацији носилаца у активном слоју ласера. У зависности од потребе, биће искоришћен и модел брзинских једначина на бази путујућег таласа, који ће уместо концентрације фотона и фазе користити комплексну форму електричног поља за оба правца пропагације таласа и једначину по концентрацији носилаца.
2. Пропагација виртуелних чворова кроз оптичко влакно биће моделована применом сплит-степ методе или импулсног одзива влакна, уз занемаривање нелинеарних

ефеката у оптичком влакну који при малим снагама сигнала и на кратким растојањима немају значајан допринос.

3. Одређивање тежинских фактора у излазном слоју РР засниваће се на методи линеарне регресије.
4. Тестирање РР спроводиће се преко независних тестних метода за испитивање сепарационих особина, квалитета кернела, особине генерализације, капацитета меморије и квалитета меморије. Упоредна анализа перформанси спроводиће се на основу специјализованих тестова NARMA, Santa Fe, NCE и препознавање изоловано изговорене цифре.

Експерименталне методе ће обухватити мерења временског и спектралног одзива реконфигурабилне нелинеарне јединице уз анализу утицаја оптичког филтра, карактеризације пропагације виртуелних чворова кроз оптичко влакно и тестирање РР архитектура различитог степена сложености које укључују реконфигурабилну нелинеарну јединицу. Опис тестова под тачком 4 биће спроведен како на теоријском тако и на експерименталном нивоу.

## **5. Очекивани научни доприноси**

1. Експериментална верификација иновативне реконфигурабилне нелинеарне јединице са брзином рада изнад 5 Gb/s.
2. Доказ утицаја нелинеарног профила генерисаног нелинеарном јединицом на конвергенцију и тачност реализације неспецифичних тестова и тестова за упоредну анализу.
3. Демонстрација примене и значаја реконфигурабилног подешавања нелинеарног профила у циљу постизања тачности предикције, класификације и других типова међусобно различитих задатака и скупова података употребом исте архитектуре.
4. Унапређење архитектуре РР кроз комбинацију реконфигурабилне нелинеарне јединице са двоструким или вишеструким линијама кашњења у циљу повећања квалитета и капацитета меморије.
5. Унапређење архитектуре РР са циљем минимизације броја виртуелних чворова уз очување квалитета и брзине рада.

## **Литература**

- [1] X. Guo et al., "Short-term prediction for chaotic time series based on photonic reservoir computing using VCSEL with a feedback loop," *Photon. Res.* 12, 1222-1230 (2024).
- [2] M. Yan, C. Huang, P. Bienstman, et al., "Emerging opportunities and challenges for the future of reservoir computing," *Nat. Commun.* 15, 2056 (2024).
- [3] J. Kato, G. Tanaka, R. Nakane and A. Hirose, "Proposal of Reconstructive Reservoir Computing to Detect Anomaly in Time-series Signals," 2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Padua, Italy, pp. 1-6 (2022).
- [4] T. Yamaguchi, K. Arai, T. Niiyama, et al., "Time-domain photonic image processor based on speckle projection and reservoir computing," *Commun. Phys.* 6, 250 (2023).
- [5] L. Appeltant et al., "Information processing using a single dynamical node as complex system," *Nat. Commun.* 2, 468 (2011).
- [6] M. Cucchi et al., "Hands-on reservoir computing: a tutorial for practical implementation," *Neuromorph. Comput. Eng.* 2 032002 (2022).

- [7] K. Kitayama et al., "Novel frontier of photonics for data processing-Photonic accelerator," APL Photon 4(9) (2019).
- [8] D. Brunner, M. C. Soriano, C. R. Mirasso, and I. Fischer, "Parallel photonic information processing at gigabyte per second data rates using transient states," Nature Commun., vol. 4, Art. no. 1364 (2013).
- [9] Y. Paquot et al., "Optoelectronic reservoir computing," Sci. Rep. 2, 287 (2012).
- [10] S. Sugiura, R. Ariizumi, T. Asai and S. -I. Azuma, "Nonessentiality of Reservoir's Fading Memory for Universality of Reservoir Computing, " IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems 35, 16801-16815 (2024).
- [11] J. Crnjanski, M. Krstić, A. Totović, N. Pleros, and D. Gvozdić, "Adaptive sigmoid-like and PReLU activation functions for all-optical perceptron," Opt. Lett. 46, 2003–2006 (2021).

## **6. План истраживања**

1. Свеобухватни преглед литературе све-оптичких и оптоелектронских реализација резервоар рачунара.
2. Развој нумеричког модела и софтверског пакета, симулација и експериментална демонстрација реконфигурабилне нелинеарне јединице засноване на Фабри-Перо полупроводничком ласеру.
3. Дефинисање и развој софтверских модула за различите механизме обучавања попут обучавања у серијама или континуалног обучавања.
4. Реализација софтверских модула за пре-процесирање података зарад нормализације и расподеле у скупове за иницијализацију, обучавање и тестирање.
5. Развој нумеричког модела и софтверског модула за симулацију у дигиталном и физички-аналогном домену основне архитектуре све-оптичког РР са временским кашњењем и реконфигурабилном нелинеарном јединицом. Евалуација перформанси РР применом независних тестних метода, специјализованих тестова у дигиталном и физичком домену и путем експеримента.
6. Реализација нумеричког модела, софтверског модула, симулација и евалуација напредне архитектуре РР са временским кашњењем са најмање два међусобно закашњена улазна сигнала.
7. Оптимизација параметара резервоара зарад максимизације метрике успешности предвиђања.

## **7. Закључак и предлог**

На основу достављене документације и увида у досадашњи научни рад кандидата Младена Бановић, Комисија је закључила да:

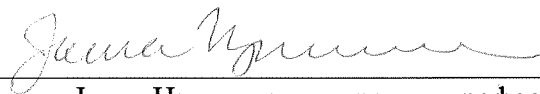
- Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за израду докторске дисертације.
- Предложена тема јесте научно заснована, а резултати који ће проистећи израдом ове докторске дисертације представљаће значајан и оригиналан допринос у предметној области истраживања.

Комисија констатује да предложена тема припада ужој научној области Физичка електроника и да је Електротехнички факултет у Београду матичан за ову научну област, те за ментора израде докторске дисертације предлага др Дејана Гвоздића, редовног професора Електротехничког факултета у Београду. На основу претходно изложеног, Комисија предлага Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Младену Бановићу, мастер инжењеру електротехнике и рачунарства, одобри израду докторске дисертације на тему: "Свеоптички резервоар-рачунар са временским кашњењем заснован на реконфигурабилној нелинеарности у Фабри-Перо ласеру" (енг. "Time-delay all-optical reservoir computer based on the reconfigurable nonlinearity in Fabry-Perot laser").

29.04.2025.

Београд

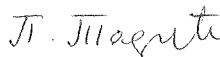
#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



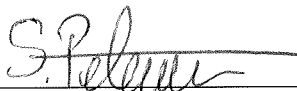
др Јасна Црњански, ванредни професор  
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



др Небојша Ромчевић, научни саветник  
Универзитет у Београду - Институт за физику



др Предраг Тадић, ванредни професор  
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



др Слободан Петричевић, редовни професор  
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



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