

КОМИСИЈИ ЗА СТУДИЈЕ II СТЕПЕНА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Комисија за студије II степена, Електротехничког факултета у Београду, на својој седници одржаној 06.09.2022. године именовала нас је у Комисију за преглед и оцену мастер рада дипл. инж. Исидоре Теофиловић под насловом „Reconfigurable all-optical perceptron with learnable activation function“ („Реконфигурабилни свеоптички перцептрон са обучавајућом активационом функцијом“). Након прегледа материјала Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Биографски подаци кандидата

Исидора Теофиловић је рођена 8.10.1998. године у Београду. Завршила је Основну школу „Франце Прешерн“ у Београду као вуковац. Уписала је Тринаесту београдску гимназију у Београду 2013. године, коју је завршила са одличним успехом. Електротехнички факултет уписала је 2017. године. Дипломирала је у септембру 2021. године на Одсеку за Физичку електронику са просечном оценом 9,48. Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за наноелектронику и фотонику, уписала је у октобру 2021. године. Положила је све испите са просечном оценом 10. У току мастер академских студија учествовала је на две научне конференције. У новембру 2021. године је презентовала резултате научног истраживања под насловом „An all-optical perceptron for binary classification“ на конференцији „2021 29th Telecommunications Forum (TELFOR)“ (Београд, Србија, 2021). У априлу 2022. је учествовала као коаутор на научној конференцији „Lasers, Optics and Photonics World Forum“ (Порто, Португал, 2022) са темом „Implementation of Injection-Locked Fabry-Perot Lasers as Activation Units in Photonic Neural Networks“.

2. Извештај о студијском истраживачком раду

Кандидат Исидора Теофиловић је као припрему за израду мастер рада урадила истраживање релевантне литературе која се односи на област неуроморфне фотонице. Конкретно, анализирана су у литератури предложена решења за хибридне (оптоелектронске) и свеоптичке реализације перцептрона за бинарну и мултиномијалну класификацију. У склопу прегледа литературе, као најважније издвојене су следеће референце:

- [1] I. A. D. Williamson et al., “Reprogrammable electro-optic nonlinear activation functions for optical neural networks,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, pp. 1–12, 2020.
- [2] M. M. P. Fard et al., “Experimental realization of arbitrary activation functions for optical neural networks,” *Optics Express*, vol. 28, pp. 12138, 2020.
- [3] X. Xu et al., “Photonic perceptron based on a Kerr microcomb for high-speed, scalable, optical neural networks,” *Laser Photonics Review*, pp. 2000070, 2020.
- [4] L. De Marinis et al., "A Codesigned Integrated Photonic Electronic Neuron," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 1-10, Oct. 2022.
- [5] M. Miscuglio et al., “All-Optical Nonlinear Activation Function For Photonic Neural Networks”, *Optical Materials Express*, vol. 8, no. 12, pp. 3851-3863, 2018.
- [6] G. Mourgias-Alexandris et al., “Neuromorphic photonics with coherent linear neurons using dual-IQ modulation cells,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 4, pp. 811-819, 2020.
- [7] A. Jha, C. Huang and P. R. Prucnal, “Reconfigurable all-optical nonlinear activation functions for neuromorphic photonics,” *Optics Letters*, vol. 45, no. 17, pp. 4819-4822, 2020.

Истраживање је указало на изазове у постизању адекватне форме нелинеарности погодне за реализацију активационе функције у оптичком домену, са хардверском имплементацијом у интегрисаној технологији. Изазов представља и обезбеђивање реконфигурације активационе јединице у току рада, подешавањем нелинеарне трансфер функције, тако да се максимизује прецизност мреже у класификацији различитих сетова података.

У циљу предлагања перспективног решења које може одговорити на наведене изазове, за предмет мастер рада је одабрана анализа свеоптичких перцептронских мрежа са активационом јединицом предложеном у референци:

- [8] J. Crnjanski, M. Krstić, A. Totović, N. Pleros, and D. Gvozdić, "Adaptive sigmoid-like and PReLU activation functions for all-optical perceptron," *Optics Letters*, vol. 46, pp. 2003-2006, 2021.

3. Опис мастер рада

Мастер рад обухвата 34 стране, са укупно 34 слике, 2 табеле и 33 референце. Рад садржи увод (на српском и енглеском језику), 3 поглавља и закључак (укупно 5 поглавља), листу коришћене литературе, листу скраћеница, листу слика и листу табела.

Прво поглавље представља увод у коме је дата мотивација за истраживање неуроморфне фотонике. Описани су предмет и циљ рада и дат је преглед структуре рада.

Друго поглавље даје кратак преглед достигнућа у реализацији свеоптичких активационих јединица. Представљена је структура вештачког неурона и дефинисани су модели перцептрона за бинарну и мултиномијалну класификацију.

У трећем поглављу је детаљно представљен физички модел активационе јединице засноване на инјекционо-спрегнутој Фабри-Перо ласерској диоди. Описан је механизам који обезбеђује нелинеарну оптичку функцију преноса у динамичком режиму, када се у ласерску диоду инјектују оптички импулси фиксног трајања. Анализирано је како на оптичку функцију преноса, односно активациону функцију, утичу операциони параметри ласерске диоде (струја поларизације, фреквенцијска раздешеност улазне светлости и лонгитудиналног мода који је предмет инјекције), као и ширина улазних оптичких сигнала. Анализа је показала да ће ширина излазних оптичких сигнала варирати са снагом улазних оптичких сигнала и предложено је решење како да се ширине излазних сигнала уједначе и омогући реализација вишеслојних свеоптичких перцептрона. За потребе симболичког тренирања и тестирања једнослојних и вишеслојних перцептрона извршено је фитовање комплетних фамилија активационих функција, које се добијају подешавањем операционих параметара.

У оквиру четвртог поглавља описани су детаљи софтверске имплементације предложених перцептрона, која омогућава симболичко тренирање уз обучавање активационе функције. Представљени су резултати симболичког и нумеричког тестирања за једнослојни перцептрон код ког се профил активационе функције контролише подешавањем фреквенцијске раздешености и вишеслојног перцептрона код ког се исто постиже подешавањем струје поларизације ласерске диоде. Анализирани су резултати бинарне класификације података из MNIST базе и мултиномијалне класификације података из MNIST и fashion-MNIST базе.

Пето поглавље је закључак у оквиру ког је дат кратак преглед рада уз издвајање најважнијих резултата.

4. Анализа рада са кључним резултатима

Мастер рад дипл. инж. Исидоре Теофиловић се бави проблематиком реализације свеоптичких перцептрона за бинарну и мултиномијалну класификацију. Предложени перцептрон заснован је на адаптивној активационој јединици која користи инјекционо-спрегнуту Фабри Перо ласерску диоду, што обезбеђује функционалност финог подешавања

профила нелинеарности контролом струје поларизације ласерске диоде и/или фреквенцијске раздешености. Кроз реализацију мастер рада развијен је софтверски алгоритам који омогућава да се контролни параметар за подешавање активационе функције (струја поларизације односно фреквенцијска раздешеност) обучава заједно са тежинским параметрима, што је довело до значајног унапређења класификационе метрике и ефикасности тренирања. Резултати су показали да се у зависности од типа података који чине улазни сет (код мултиномијалне класификације) или парова цифара који се пореде (код бинарне класификације), максимална прецизност класификације постиже за различите профиле активационих функција, што даје на значају реконфигурацији активационе јединице. Додатно, кроз имплементацију вишеслојног перцептрона уочен је и анализиран утицај ширине улазног сигнала на профил активационе функције. Предложено је решење које омогућава да се ширине сигнала на излазу из активационе јединице уједначе, кроз примену оптичког гејта са И логиком. Процес тренирања предложених перцептрона је спроведен симболички, применом уграђених библиотека у програмском пакету Пајтон, коришћењем вршне снаге оптичких сигнала као нумеричке величине. Примена овог метода се показала као веома ефикасна, а поређење са резултатима нумеричког тестирања података кроз софтверску имплементацију физичког модела, је потврдило поклапање у класификацији за 99.4% тестираних узорака.

Основни доприноси рада су: 1) развијена методологија обучавања активационе функције у оквиру адаптивне активационе јединице; 2) верификација значаја реконфигурабилности активационе јединице; 3) анализа утицаја ширине оптичких сигнала на профил активационе функције; 4) реализација свеоптичког вишеслојног перцептрона за мултиномијалну класификацију.

5. Закључак и предлог

Кандидат Исидора Теофиловић је у свом мастер раду успешно реализовала модел реконфигурабилног свеоптичког перцептрона за бинарну и мултиномијалну класификацију. Софтверска имплементација је обухватила тренирање и тестирање неуралне мреже симболички и тестирање кроз нумеричку имплементацију физичког модела. Предложено решење омогућава да се поред тежинских фактора обучава и активациона функција, тако да у зависности од улазног сета података максимизује прецизност класификације.

Кандидат је исказао самосталност и систематичност у свом истраживању, као и иновативне елементе у решавању мултидисциплинарне проблематике овог рада, која је захтевала комбинацију знања из интегрисане фотонике и машинског учења.

На основу изложеног, Комисија предлаже Комисији за студије II степена Електротехничког факултета у Београду да рад дипл. инж. Исидоре Теофиловић прихвати као мастер рад и кандидату одобри јавну усмену одбрану.

Београд, 09.09.2022. године

Чланови комисије:

Др Јасна Црњански, ванредни професор.

Др Дејан Гвоздић, редовни професор.