

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ПОДОБНОСТИ ТЕМЕ, КАНДИДАТА И МЕНТОРА ЗА
ИЗРАДУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

Орган који је именовао комисију: Наставно-научно веће Факултета техничких наука

Датум именовања комисије: 25.12.2025.

Састав комисије именоване у складу са *Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду*:

- | | | | |
|----|------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 1. | др Наташа Самарџић | Ванредни професор | Електроника |
| | презиме и име | звање | ужа научна област |
| | Факултет техничких наука, Нови Сад | председник | |
| | установа у којој је запослен-а | функција у комисији | |
| 2. | др Татјана Николић | Редовни професор | Електроника |
| | презиме и име | звање | ужа научна област |
| | Електронски факултет, Ниш | члан | |
| | установа у којој је запослен-а | функција у комисији | |
| 3. | др Драгана Бајовић | Ванредни професор | Телекомуникације и обрада сигнала |
| | презиме и име | звање | ужа научна област |
| | Факултет техничких наука, Нови Сад | члан | |
| | установа у којој је запослен-а | функција у комисији | |
| 4. | др Дејан Вукобратовић | Редовни професор | Телекомуникације и обрада сигнала |
| | презиме и име | звање | ужа научна област |
| | Факултет техничких наука, Нови Сад | члан | |
| | установа у којој је запослен-а | функција у комисији | |
| 5. | др Вук Врањковић | Ванредни професор | Електроника |
| | презиме и име | звање | ужа научна област |
| | Факултет техничких наука, Нови Сад | члан | |
| | установа у којој је запослен-а | функција у комисији | |

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме: Владимир, Радомир, Никић
2. Датум рођења: 30.09.1996 Место и држава рођења: Нови Сад, Република Србија

II.1 Основне или интегрисане студије

Година уписа: Година завршетка: Просечна оцена током студија:

Универзитет: Универзитет у Новом Саду

Факултет: Факултет техничких наука

Студијски програм: Енергетика, електроника и телекомуникације

Стечено звање: Дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства

II.2 Мастер или магистарске студије

Година уписа: Година завршетка: Просечна оцена током студија:

Универзитет: Универзитет у Новом Саду

Факултет: Факултет техничких наука

Студијски програм: Енергетика, електроника и телекомуникације

Стечено звање: Мастер инжењер електротехнике и рачунарства

Научна област: Електроника

Наслов завршног рада: Реализација Bootloader-а за бежично ажурирање апликација путем НБ-ИОТ комуникације

II.3 Докторске студије

Година уписа:

Универзитет: Универзитет у Новом Саду

Факултет: Факултет техничких наука

Студијски програм: Енергетика, електроника и телекомуникације

Број ЕСПБ до сада остварених: Просечна оцена током студија:

II.4 Приказ научних и стручних радова кандидата

Р. бр.	аутори, наслов рада, часопис, волумен (година) странице од-до, DOI или ISBN/ISSN	категорија
1.	Bortnik, D., Nikic, V. , Sobot, S., Vukobratovic, D., Mezei, I., Lukic, M., “Evaluation of Machine Learning Algorithms for NB-IoT Module Energy Consumption Estimation Based on Radio Channel Quality”. In: IEEE Access 13 (2025), pp. 2389–2408. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3523864	M21
<i>кратак опис садржине:</i> У овој студији предложена је метода за процену потрошње енергије у батеријски напајаним Narrowband Internet of Things (NB-IoT) уређајима коришћењем података доступних из NB-IoT модема, чиме се избегава потреба за додатним колима за мерење напона батерије или потрошње струје. Развијен је <i>edge</i> уређај са NB-IoT модулом и интегрисаним колом за мерење струје, који је коришћен за генерисање означеног скупа података. Свака тачка података, генерисана приликом слања UDP пакета, укључује метаподатке као што су параметри квалитета радио-канала, временски параметри (TX и RX време), снага преноса и пријема, као и режим проширења покривености. Селекција карактеристика кроз анализу варијансе показала је да режим проширења покривености и временски параметри значајно корелишу са потрошњом енергије. Користећи ове карактеристике, тестирали смо 11 модела машинског учења за процену потрошње енергије, оцењујући њихове перформансе и меморијски отисак, који су кључни фактори за уграђене системе са ограниченим ресурсима. Најбољи модели постигли су до 93,8% слагања са измереним вредностима, уз меморијски отисак мањи од 100 KB, а неки чак и до 3 KB. Овај приступ нуди практично решење за процену потрошње енергије у NB-IoT уређајима без хардверских измена, чиме се омогућава енергетски ефикасно управљање уређајима.		
<i>Рад припада проблематици докторске дисертације:</i> ДА НЕ ДЕЛИМИЧНО		

Р. бр.	аутори, наслов рада, часопис, волумен (година) странице од-до, DOI или ISBN/ISSN	категорија
2.	Nikić, V. , Bortnik, D., Lukić, M., Vukobratović, D., Mezei, I., “Lightweight Digit Recognition in Smart Metering System Using Narrowband Internet of Things and Federated Learning”. In: Future Internet 16.11 (2024), p. 402. DOI: https://doi.org/10.3390/fi16110402	M22
<i>кратак опис садржине:</i> Замена механичких бројила дигиталним је од кључног значаја због бројних предности које она доноси, укључујући већу временску резолуцију мерења потрошње, могућности даљинског надзора ради повећања оперативне ефикасности, као и интеграцију са паметним електроенергетским мрежама. Све ово доприноси бољем корисничком искуству, смањењу расипања енергије и напретку у погледу еколошке одрживости. Међутим, трошкови повезани са заменом механичких бројила њиховим дигиталним панданима представљају кључни фактор који доприноси релативно спором увођењу оваквих уређаја. У овом раду представљано је нискобуџетно и енергетски ефикасно решење за надоградњу постојеће мерне инфраструктуре, засновано на савременим комуникационим и технологијама вештачке интелигенције. Развијени <i>edge</i> уређај садржи камеру за снимање слика бројчаника механичког бројила, 32-битни микроконтролер способан за извршавање алгоритма за препознавање цифара, као и NB-IoT модул са (E)GPRS резервном опцијом, који омогућава готово свеприсутну повезаност чак и у тешким радио-условима. У раду је приказана и оптимизација конволуционе неуронске мреже (<i>engl. Convolutional Neural</i>		

Networks, CNN) за примену на хардверу са ограниченим ресурсима, као и тренирање CNN модела на *edge* уређајима. Наша методологија препознавања цифара, заснована на обуци и извршавању модела директно на уређају, уз примену федеративног учења, постиже висок ниво тачности (97,01%) уз минималну потрошњу енергије и пратећи комуникациони трошак (у просеку 87 μ Wh дневно).

Рад припада проблематици докторске дисертације: **ДА** НЕ ДЕЛИМИЧНО

Р. бр.	аутори, наслов рада, часопис, волумен (година) странице од-до, DOI или ISBN/ISSN	категорија
3.	Sobot, S., Lukic, M., Bortnik, D., Nikic, V. , Lima, B., Beko, M., Vukobratovic, D., “Two-Tier UAV-based Low Power Wide Area Networks: A Testbed and Experimentation Study”. In: 2023 6th Conference on Cloud and Internet of Things (CIoT). 2023, pp. 85–90. DOI: https://doi.org/10.1109/CIoT57267.2023.10084912	M33

кратак опис садржине:

У овом раду предлажен, пројектован, имплементиран и демонстриран је двослојни Low Power Wide Area Network (LPWAN) систем заснован на беспилотним летелицама (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) као базним станицама, погодан за динамичко распоређивање у руралним подручјима. Предложена LPWAN мрежа заснована на UAV платформама проширује постојећу макроћелијску LPWAN мрежу (ниво 1) додатним слојем мобилних базних станица (ниво 2), такође заснованих на LPWAN технологији.

Мобилне LPWAN базне станице другог нивоа обезбеђују повезивање статичке или мобилне LPWAN корисничке опреме распоређене у областима без директног покривања LPWAN мрежом првог нивоа. Предложени сценарио двослојне LPWAN мреже погодан је за различите пољопривредне, шумарске и еколошке примене, као што су праћење стоке или дивљих животиња. У овом експерименталном раду приказуан је прототип који је успешно постављен и употребљен у руралном окружењу без покривености LPWAN мрежом првог нивоа.

Рад припада проблематици докторске дисертације: ДА НЕ **ДЕЛИМИЧНО**

Р. бр.	аутори, наслов рада, часопис, волумен (година) странице од-до, DOI или ISBN/ISSN	категорија
4.	Nikic, V. , Bortnik, D., Lukic, M., Danilovic, D., Mezei, I., “Comparisons of firmware delta updates over the air using WLAN and LPWAN technologies”. In: 2022 30th Telecommunications Forum (TELFOR). 2022, pp. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/TELFOR56187.2022.9983677	M33

кратак опис садржине:

Број *edge* уређаја у оквиру Internet of Things екосистема доживео је експоненцијални раст током последњих година. У таквим околностима, њихово одржавање постаје све значајније, посебно када је реч о могућности даљинског измене понашања *edge* уређаја путем ажурирања фирмвера. Ради уштеде енергије, LPWAN технологије представљају комуникациони медијум са ниским брзинама преноса података, што је погодно за пренос релативно малих количина података у дугим временским интервалима, али истовремено може представљати уско грло за пренос релативно великих фирмвер слика.

У овом раду представљано је проширење претходног истраживања, у којем је приказана ефикасна имплементација диференцијалних (*delta*) ажурирања фирмвера и анализиране њене перформансе у сценаријима употребе са бежичним комуникационим технологијама које припадају WLAN и LPWAN класама.

Рад припада проблематици докторске дисертације:	ДА	НЕ	[ДЕЛИМИЧНО]
---	----	----	--------------------

Р. бр.	аутори, наслов рада, часопис, волумен (година) странице од-до, DOI или ISBN/ISSN	категирија
5.	Bortnik, D., Nikić, V. , Lukić, M., Mezei, I., “Secured by hardware client-server communication based on NB-IoT technology”. In: 2021 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC). 2021, pp. 48–53. DOI: https://doi.org/10.1109/ZINC52049.2021.9499263	M33

кратак опис садржине:

Значајан раст броја уграђених система повезаних са *cloud* сервисима током последњих година изложио је IoT екосистем новим претњама и изазовима у домену безбедности. Добро познати и широко коришћени безбедносни протоколи, као што су SSL и TLS, успешно одговарају на ове изазове. Међутим, они су првенствено дизајнирани за заштиту веб саобраћаја у ресурсно богатим окружењима. У случајевима где је неопходна масовна IoT повезаност, од критичне је важности оптимизовати употребу пропусног опсега, без угрожавања укупног нивоа безбедности.

У овом раду представљено је решење које комбинује комуникациони NB-IoT модул мале потрошње пропусног опсега са хардверским безбедносним елементом, како би се обезбедила сигурна повезаност са *cloud* сервисима, уз истовремено смањење комуникационог оптерећења и пребацивање рачунарски захтевних безбедносних алгоритама са главног MCU-а. Применом најновије верзије TLS протокола (v1.3) са ECC-базираном шемом размене кључева, постигнуто је смањење комуникационог оптерећења током фазе успостављања везе од 60% у поређењу са широко коришћеним RSA-базираним TLS имплементацијама.

Рад припада проблематици докторске дисертације:	ДА	НЕ	[ДЕЛИМИЧНО]
---	----	----	--------------------

Р. бр.	аутори, наслов рада, часопис, волумен (година) странице од-до, DOI или ISBN/ISSN	категирија
6.	Nikić, V. , Bortnik, D., Lukic, M., Mezei, I., “Firmware Updates Over The Air Using NB-IoT Wireless Technology”. In: 2021 29th Telecommunications Forum (TELFOR). 2021, pp. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/TELFOR52709.2021.9653383	M33

кратак опис садржине:

Брз раст броја умрежених уграђених уређаја доноси нове проблеме и изазове. Савремена комуникациона решења, као што је NB-IoT, омогућавају повезивање и до 50.000 *edge* уређаја по ћелији. Међутим, у оваквим сценаријима масовне повезаности, одржавање уређаја постаје све захтевније. За свако скалабилно и одрживо IoT решење, безбедно и ефикасно ажурирање фирмвера унутар *edge* уређаја постало је неопходност. У пракси, пакети за ажурирање фирмвера обично морају бити преношени коришћењем истог комуникационог медијума (NB-IoT) као и редовни преноси података.

У овом раду представљено је функционално Firmware-Over-The-Air (FOTA) решење за ажурирање фирмвера специјално дизајнираних *edge* уређаја, као саставних делова NB-IoT тест инфраструктуре. FOTA тестови ажурирања користе предложене нешифроване и шифроване протоколе. Први резултати показују да време потребно за оба протокола остаје конзистентно у сценаријима са малим бројем чворова.

Рад припада проблематици докторске дисертације:	ДА	НЕ	[ДЕЛИМИЧНО]
---	----	----	--------------------

III ОЦЕНА ПОДОБНОСТИ ТЕМЕ

Оцена:

III.1 формулације наслова тезе

Оптимизација архитектура конволуционих неуронских мрежа и примена федеративног учења у системима са ограниченим ресурсима за препознавање цифара

Предложени наслов тезе је подобан?

[ДА]

НЕ

III.2 предмета (проблема) истраживања

Обрачунавање потрошње енергената заснива се на подацима добијеним мерењем помоћу бројила, која се, са становишта комуникационих могућности, деле на традиционална и паметна. Традиционална бројила не поседују могућност даљинског читавања, што захтева значајан мануелни рад и доводи до већих трошкова и потенцијалног нарушавања приватности. Насупрот томе, паметна бројила користе савремене бежичне технологије и нископотрошне режиме рада, омогућавајући ефикасније прикупљање података и дуг век трајања батерије.

Кључни изазов у примени паметних бројила представља успостављање стабилне бежичне везе, посебно због њиховог смештаја у затвореним просторима са неповољним радио условима. Због тога се као исплативо решење често примењује NB-IoT технологија, која припада групи нископотрошних мрежа великог домета и ослања се на постојећу 4G LTE инфраструктуру. Њене предности укључују добру пробојност сигнала, подршку за велики број уређаја, ниску потрошњу енергије и оптимизацију за повремени пренос малих количина података.

Циљ овог истраживања је развој и имплементација система за „опамећивање“ постојећих традиционалних бројила применом алгоритама машинског учења на платформама ограничених ресурса. Посебан акценат стављен је на минимизацију хардверских компоненти, потрошње енергије и укупних трошкова система. У том контексту, истраживање је усмерено на примену TinyML модела, који се извршавају на уређајима са ограниченим меморијским, рачунарским и енергетским ресурсима, али су погодни за задатке као што је препознавање цифара на сликама бројила.

Један од главних изазова масовне примене оваквих система јесте велика разноликост традиционалних бројила, што захтева адаптацију модела на конкретну инстанцу уређаја. Ова адаптација се остварује додатним тренирањем модела након инсталације, уз настојање да се време прилагођавања минимизује. Даље унапређење система постиже се применом федеративног учења, које омогућава размену знања између више уређаја и формирање општијег модела који боље генерализује и убрзава адаптацију будућих инстанци.

Предмет истраживања је подобан?

[ДА]

НЕ

III.3 познавања проблематике на основу изабране литературе са списком литературе

У оквиру ове дисертације биће извршен преглед тренутног стања и проблема у областима неопходним за ово истраживање. То су:

- истраживања на тему унапређења и „опамећивање“ традиционалних бројила, са фокусом на решења заснована на комуникационим технологијама ниске потрошње;
- решења за унапређење традиционалних бројила;
- анализа концепата готових паметних бројила која замењују постојећа традиционална;
- примери примене оптимизационих алгоритама за одређивање најбоље архитектуре неуронских мрежа;
- употреба федеративног учења у IoT системима.

Бројила

Тренутно је у току велики број истраживања која се баве унапређивањем и „опамећивањем“ традиционалних бројила. Додавање интелигентних функционалности традиционалним бројилима омогућено је применом и имплементацијом модела машинског учења на хардверу са ограниченим

ресурсима [1,2]. Велики напори су уложени у процес унапређења бројила за надгледање потрошње, па је тако у раду [3] представљен систем за унапређење традиционалних бројила где је вредност приказана помоћу седам цифара. Систем је базиран на Raspberry Pi платформи, која не спада у групу нископотрошних система, док се комуникација успоставља путем Wi-Fi технологије.

Робустан систем базиран на фотографисању бројила, детекцији и препознавању цифара представљен је у раду [4]. Вредно је напоменути да се у овом раду аутори нису ограничили са становишта ресурса. За детекцију и препознавање цифара употребљавају савремену графичку јединицу NVIDIA Titan V GPU. Још један систем базиран на фотографисању бројила представљен је у раду [5]. Истражене су могућности употребе различитих стандардних библиотека као што су OpenCV и TensorFlow2 у циљу реализације различитих модела машинског учења (R-CNN, YOLOv3, SSD). Иако веома моћне, ове библиотеке нису применљиве на уређаје ограничених ресурса. Такође, сличан закључак се може изнети и за решење представљено у раду [6], које је намењено мобилним телефонима.

Једно од првих решења проблема унапређења и „опамећивања“ бројила приказано је у раду [4]. Концепт решења је базиран на конволуционим неуронским мрежама за препознавање цифара у аутоматском читавању бројила. Уобичајен систем за аутоматско читавање бројила састоји се од три фазе - детекције бројача, сегментације цифара и коначно препознавања цифара. Приказани систем није користио фазу сегментације цифара, што га чини једним од иницијалних решења. Такође, ово решење је базирано на сложеним, скупим и енергетски неефикасним платформама попут AMD Ryzen Threadripper 1920X процесора и NVIDIA Titan Xp графичке јединице.

Иако је MobileNet архитектура модела машинског учења развијена за потребе мобилних телефона, у раду [7] су истражене могућности употребе ове архитектуре на уређајима ограничених ресурса као што су микроконтролери. Резултати су приказани за све MobileNet верзије као и за две ShuffleNet архитектуре. Коначно, TinyML оквири, попут TensorFlow Lite, омогућавају ефикасно процесирање података употребом модела машинског учења на IoT уређајима [8].

Алгоритми за претрагу простора архитектура неуралних мрежа

Прегледи разноврсних метода претраге простора архитектура неуралних мрежа представљени су у радовима [9] и [10]. Концепт претраге простора архитектура заснован на ћелијама је предложен у раду [11], и популарно се назива *NASNet* простор претраге.

Алгоритам за претрагу архитектура конволуционих неуронских мрежа заснован на оптимизацији рођењем честица базиран на Интернет протокол адресама, IPPSO, представљен је у [12]. Употребљава нову шему кодовања за ефективну репрезентацију мрежа и прилагодљив број слојева. У раду је предложен и метод оцењивања модела помоћу делова скупа података ради убрзања еволутивног процеса.

Следећи алгоритам, psoCNN [13], унапређује претрагу архитектура конволуционих неуронских мрежа омогућавањем неограниченог раста честица. Уводи нови начин кодирања, операције сабирања и одузимања, као и прилагођен метод одређивања брзине честица, што убрзава проналажење оптималне мрежне архитектуре.

Алгоритам представљен у [14] уводи кодирање честица помоћу група, где свака садржи барем један конволуциони слој, а последњи слој у групи може бити агрегациони. Број група зависи од величине улазне слике, чиме се ограничава број агрегационих слојева, а самим тим и група. Представљени су нови механизми за ажурирање брзине и позиције честица, побољшавајући оптимизацију архитектура.

Сви приступи засновани на генетичким алгоритмима генеришу популацију могућих архитектура, над којом се примењују селекција, мутација и рекомбинација. У контексту алогитама за претрагу простора архитектура неуронских мрежа, ове операције укључују додавање/уклањање слојева, варирање хиперпараметара и додавање *skip* конекција. Селекција се врши методом такмичења [15, 16, 17]. Модели се из популације уклањају на основу перформанси [15] или старости [16], док неки приступи искључују елиминацију [17]. Већина метода иницијализује нове мреже насумично, без рекомбинације. Док у раду [18], NEAT алгоритам омогућава рекомбинацију два модела у један.

Федеративно учење

У претходној деценији, значајан број истраживања је спроведен у области федеративног учења FL (*engl. Federated Learning*, FL) у IoT што је приказано у прегледном раду [19]. Такође, у радовима [20] и [21] систематично су представљене различите имплементације FL на платформама ограничених ресурса. Студија која елаборира разлоге употребе FL на микроконтролерима и тренинга на самим уређајима представљена је у раду [22]. Употреба FL у области паметних бројила врло често је неопходна за реализацију предвиђања потрошње, што, иако је другачија функција од оне која се истражује у оквиру овог рада, и даље има значај јер захтева реализацију FL за потребе паметних бројача. Ова решења представљена су у радовима [23] и [24]. Прегледни рад [25] описује велики број истраживања у којима су примењиване комбинације веома малих модела машинског учења и FL.

- [1] R. R. David *et al.*, “TensorFlow Lite Micro: Embedded Machine Learning for TinyML Systems,” in *Proc. Mach. Learn. Syst.*, vol. 3, 2021, pp. 800–811.
- [2] J. Lin, L. Zhu, W.-M. Chen, W.-C. Wang, C. Gan, and S. Han, “On-device training under 256KB memory,” in *Proc. 36th Int. Conf. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS’22)*, New Orleans, LA, USA, 2024, Art. no. 1667, pp. 1–14.
- [3] A. K. Lall, K. Vaid, R. Yadav, K. Sharma, R. Varma, and P. Chaurasia, “Making analog water meter smart using ML and IoT-based low-cost retrofitting,” in *Proc. 2021 8th Int. Conf. Future Internet Things Cloud (FiCloud)*, 2021, pp. 157–162, doi: 10.1109/FiCloud49777.2021.00030.
- [4] R. Laroca, J. F. Silva, F. Baldo, A. S. Britto, and R. Minetto, “Towards image-based automatic meter reading in unconstrained scenarios: A robust and efficient approach,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67569–67584, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077415.
- [5] Y. Liang, Y. Liao, S. Li, Y. Zhang, S. Peng, and Z. Tang, “Research on water meter reading recognition based on deep learning,” *Scientific Reports*, vol. 12, p. 12861, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-17255-3.
- [6] J. Ktari, T. Frikha, M. Hamdi, H. Elmannai, and H. Hmam, “Lightweight AI framework for Industry 4.0 case study: Water meter recognition,” *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 6, p. 72, 2022, doi: 10.3390/bdcc6030072.
- [7] S. Brockmann and T. Schlippe, “Optimizing convolutional neural networks for image classification on resource-constrained microcontroller units,” *Computers*, vol. 13, no. 7, Art. no. 173, 2024, doi: 10.3390/computers13070173.
- [8] N. Schizas, A. Karras, C. Karras, and S. Sioutas, “TinyML for ultra-low power AI and large-scale IoT deployments: A systematic review,” *Future Internet*, vol. 14, no. 12, p. 363, 2022.
- [9] M. Wistuba, A. Rawat, and T. Pedapati, “A survey on neural architecture search,” *arXiv preprint arXiv:1905.01392*, 2019.
- [10] H. Benmeziane, K. E. Maghraoui, H. Ouarnoughi, S. Niar, M. Wistuba, and N. Wang, “A comprehensive survey on hardware-aware neural architecture search,” *arXiv preprint arXiv:2101.09336*, 2021.
- [11] B. Zoph, V. Vasudevan, J. Shlens, and Q. V. Le, “Learning transferable architectures for scalable image recognition,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, 2018, pp. 8697–8710.
- [12] B. Wang, Y. Sun, B. Xue, and M. Zhang, “Evolving deep convolutional neural networks by variable-length particle swarm optimization for image classification,” in *Proc. IEEE Congr. Evol. Comput. (CEC)*, 2018, pp. 1–8.
- [13] F. E. Fernandes Junior and G. Yen, “Particle swarm optimization of deep neural networks architectures for image classification,” *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 49, pp. 62–74, 2019, doi: 10.1016/j.swevo.2019.05.010.
- [14] T. Lawrence, L. Zhang, C. P. Lim, and E.-J. Phillips, “Particle swarm optimization for automatically evolving convolutional neural networks for image classification,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 14369–14386, 2021.
- [15] E. Real, S. Moore, A. Selle, S. Saxena, Y. L. Suematsu, J. Tan, Q. V. Le, and A. Kurakin, “Large-scale evolution of image classifiers,” in *Proc. Int. Conf. Mach. Learn. (ICML)*, 2017, pp. 2902–2911.
- [16] E. Real, A. Aggarwal, Y. Huang, and Q. V. Le, “Aging evolution for image classifier architecture search,” in *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell.*, vol. 2, 2019, pp. 2–8.
- [17] H. Liu, K. Simonyan, O. Vinyals, C. Fernando, and K. Kavukcuoglu, “Hierarchical representations for efficient architecture search,” *arXiv preprint arXiv:1711.00436*, 2017.
- [18] K. O. Stanley and R. Miikkulainen, “Evolving neural networks through augmenting topologies,” *Evolutionary Computation*, vol. 10, no. 2, pp. 99–127, 2002.

- [19] L. U. Khan, W. Saad, Z. Han, E. Hossain, and C. S. Hong, "Federated learning for Internet of Things: Recent advances, taxonomy, and open challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, no. 3, pp. 1759–1799, 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3090430.
- [20] A. Imteaj, U. Thakker, S. Wang, J. Li, and M. H. Amini, "A survey on federated learning for resource-constrained IoT devices," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–24, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3095077.
- [21] L. G. Ferreira da Silva, D. F. H. Sadok, and P. T. Endo, "Resource optimizing federated learning for use with IoT: A systematic review," *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 175, pp. 92–108, 2023, doi: 10.1016/j.jpdc.2023.01.006.
- [22] N. Llisterri Giménez, M. Monfort Grau, R. Pueyo Centelles, and F. Freitag, "On-device training of machine learning models on microcontrollers with federated learning," *Electronics*, vol. 11, no. 4, Art. no. 573, 2022, doi: 10.3390/electronics11040573.
- [23] N. Abdulla, M. Demirci, and S. Ozdemir, "Smart meter-based energy consumption forecasting for smart cities using adaptive federated learning," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 38, p. 101342, 2024, doi: 10.1016/j.segan.2024.101342.
- [24] A. Duttagupta, J. Zhao, and S. Shreejith, "Exploring lightweight federated learning for distributed load forecasting," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun., Control, and Comput. Technol. Smart Grids (SmartGridComm)*, Glasgow, U.K., 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/SmartGridComm57358.2023.10333889.
- [25] P. Qi, D. Chiaro, and F. Piccialli, "Small models, big impact: A review on the power of lightweight federated learning," *Future Generation Computer Systems*, vol. 162, p. 107484, 2025, doi: 10.1016/j.future.2024.107484.

Избор литературе је одговарајући?

[ДА]

НЕ

III.4 циљева истраживања

Циљ истраживања ове докторске дисертације јесте развој нових и оптимизованих архитектура и модела машинског учења, као и развој и евалуација процедура за примену техника федеративног учења за системе са ограниченим ресурсима чији је задатак препознавање цифара. Пример примене овог истраживања је „опамећивање“ традиционалних бројила. У оквиру истраживања биће развијена експериментална поставка која ће омогућити прикупљање обимног и разноврсног скупа фотографија бројила, што ће служити као основа за даљу анализу и развој модела.

За генерисање овог скупа слика цифара биће дизајниран и имплементиран систем за читавање вредности на бројилима, чиме ће бити обезбеђен висок ниво варијабилности и прилагођеност реалним условима. Након тога, биће развијени алгоритми за обраду и оптимизацију прикупљених слика, с циљем њихове ефикасније употребе као улазних инстанци у моделима машинског учења на уређајима са ограниченим ресурсима.

Даљи корак истраживања подразумева развој система за локалну обуку и прилагођавање модела машинског учења директно на уређају, чиме ће бити омогућена њихова оптимизација у складу са специфичним карактеристикама различитих типова бројила. Овим приступом омогућава се адаптација глобалног модела машинског учења на конкретан тип бројила, чиме се повећава тачност његовог препознавања цифара у конкретној примени. Такође, кроз примену метахеуристичких алгоритама биће генерисане оптималне архитектуре модела које ће подржавати како њихову практичну примену, тако и њихов процес обуке.

Коначно, како би се обезбедила ефикаснија иницијализација нових уређаја, биће предложен систем за дистрибуцију стеченог знања између постојећих и нових уређаја, чиме ће бити омогућено брже и прецизније прилагођавање модела у реалним оперативним условима.

Очекивани доприноси ове докторске дисертације су:

- 1) Пројектовање и реализација експерименталне поставке, уз генерисање репрезентативног скупа слика цифара, који представља основу за евалуацију у будућим фазама истраживања.
- 2) Развој и имплементација новог алгоритамског решења за аутоматизовано генерисање, проширивање и обраду разноврсног скупа слика цифара бројила, у циљу повећања општости модела.
- 3) Истраживање, пројектовање и оптимизација нових архитектура модела машинског учења, уз примену метахеуристичких алгоритама, пре свега еволутивних алгоритама и алгоритама на бази

интелигенције ројења, за ефикасну детекцију цифара на бежичним уређајима са ограниченим ресурсима, са акцентом на компромис између што веће тачности и што мањег заузимања меморије и потрошње енергије.

- 4) Анализа и евалуација метода федеративног учења, са циљем ефикасног преноса стеченог знања између постојећих и нових инстанци уређаја, кроз сценарије који укључују разнолике скупове слика и динамичке услове рада, у сврху повећања скалабилности оваквих система.

Циљеви истраживања су одговарајући?

[ДА]

НЕ

III.5 очекиваних резултата (хипотезе)

Главна хипотеза овог истраживања јесте претпоставка да је могуће развити архитектуре и моделе машинског учења за препознавање цифара на сликама које одликује висока тачност и оптималне процедуре федеративног учења за платформе изузетно ограничених ресурса (меморије, перформанси, комуникација) применом оптимизационих алгоритама.

Очекивани резултати представљају значајан научни допринос?

[ДА]

НЕ

III.6 плана рада (на основу фаза истраживања и оријентационог садржаја дисертације из Обрасца 1)

Истраживање је организовано у три фазе на следећи начин.

Прва фаза усмерена је на формирање експерименталне основе кроз аутоматско генерисање и обраду скупа слика цифара са бројила. У оквиру ове фазе развија се систем који омогућава прикупљање, означавање и претпроцесирање слика (сегментација, нормализација, бинаризација и елиминација шума), као и алгоритам за детекцију промена цифара, чиме се обезбеђује разноврстан и квалитетан скуп података оптимизован за тренирање модела машинског учења на уређајима са ограниченим ресурсима.

Друга фаза фокусирана је на развој и оптимизацију архитектура конволуционих неуронских мрежа (*engl. Convolutional Neural Networks, CNN*) прилагођених ресурсно ограниченим уређајима. Она обухвата анализу хардверских ограничења, имплементацију флексибилног CNN система са подршком за обуку, чување и реконструкцију модела, као и развој механизма за аутоматску оптимизацију архитектуре. Оптимизација се спроводи применом метахеуристичких алгоритама, при чему се перформансе модела и меморијска ограничења користе као кључни критеријуми евалуације. Кроз дефинисане експерименталне сценарије врши се анализа и поређење добијених архитектура ради избора најефикаснијих решења.

Трећа фаза усмерена је на примену федеративног учења ради омогућавања дељења знања између више уређаја без размене сирових података. У овој фази истражују се и евалуирају различите FL методе у комбинацији са оптимизованим CNN архитектурама из претходне фазе. Посебан акценат стављен је на анализу комуникационе потрошње и утицаја различитих стратегија агрегације и тренирања, са циљем идентификације комбинација које обезбеђују најбољи однос између тачности модела и ресурсних ограничења у реалним условима примене.

Оријентациони садржај докторске дисертације:

- 1) Увод – представљање проблематике, формулисање истраживачке хипотезе и циљева истраживања, као и преглед актуелног стања у области
- 2) Теоријске основе – обрада основних теоријских принципа од интереса за ово истраживање као што су: машинско учење, CNN, алгоритми за претрагу простора архитектура CNN-ова, FL итд.
- 3) Експериментална поставка и прикупљање узорака – обрада тематике дефинисане у Фази 1
- 4) Проблем оптимизације архитектуре CNN-а за уређаје ограничених ресурса – обрада тематике дефинисане у Фази 2
- 5) Проблем оптимизације архитектуре CNN-а и евалуација метода FL за уређаје ограничених ресурса – обрада тематике дефинисане у Фази 3
- 6) Резултати и дискусија – приказ и тумачење добијених резултата, поређење са постојећим методама и литературом.
- 7) Закључак и будући рад – у овом поглављу налазиће се завршни коментари у погледу остварених резултата током писања рада као и могуће идеје за даље истраживање.
- 8) Прилози

9) Литература

План рада је одговарајући?**[ДА]****НЕ****III.7 метода и узорака истраживања**

Метод истраживања обухвата развој програмске подршке за циљану хардверску платформу у програмском језику *C*, са функцијом генерисања, аквизиције, обраде и складиштења слика које ће служити као скуп података за даљи развој.

На основу овог скупа реализује се систем који имплементира CNN у програмском језику *C*, што омогућава интеграцију са фирмвером и независно извршавање на рачунару ради симулирања. Алгоритми за оптимизацију архитектуре CNN развијају се у програмском језику *Python*, док се евалуација архитектура спроводи у развијеном *C* окружењу.

Систем за FL такође се реализује у програмском језику *Python*, са могућношћу размене параметара модела између уређаја и поновног тренирања ажурираних модела на локалним скуповима података. Обука се извршава у *C* имплементацији, што обезбеђује потпуну интеграцију и прилагођеност ограничењима уграђених уређаја.

Експеримент ће бити изведен коришћењем тест поставке у којој је хардверска платформа са камером фиксирана испред механичког бројача. Бројач ће бити повезан са платформом која ће управљати његовим сукцесивним увећавањем генерисањем електричних импулса, док ће истовремено бити вршено складиштење фотографија самог бројача. На тај начин, познавањем почетне вредности бројача и броја генерисаних импулса, биће могуће аутоматски формирати означен скуп података, који ће бројати неколико хиљада фотографија цифара бројача.

Експеримент ће бити спроведен у контролисаним лабораторијским условима, при слабом осветљењу (да би се симулирао реалан сценарио, као што је, на пример, шахт), при чему ће свако фотографисање бити осветљено помоћу ЛЕД осветљења.

Метод и узорак су одговарајући?**[ДА]****НЕ****III.8 места, лабораторије и опреме за истраживачки рад**

Лабораторије катедре за електронику Факултета техничких наука у Научно-технолошком парку у Новом Саду, Република Србија.

Услови за истраживачки рад су одговарајући?**[ДА]****НЕ****III.9 методе статистичке обраде података и осталих релевантних података**

Основни алат машинског учења, а самим тим и статистичке обраде података који се користи у оквиру докрске дисертације јесте примена конволуционих неуронских мрежа, оптимизационих алгоритама за претрагу простора неуронских мрежа и федеративног учења за одређивање најбољих архитектура неуронских мрежа у околностима ограничених ресурса. Додатно, главне метрике које ће бити експлоатисане у оквиру истраживања су тачност предикције и стандардна девијација.

Предложене методе су одговарајуће?**[ДА]****НЕ****IV ОЦЕНА ПОДОБНОСТИ КАНДИДАТА**

Услови дефинисани за кандидата студијским програмом:

Студент који је положио све испите одређене студијским програмом и одбранио Теоријске основе стиче право да пријави тему докторске дисертације.

Образложење:

Владимир Никић је редовни студент докторских академских студија Енергетика, електроника и телекомуникације на Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду. Положио је све испите предвиђене планом и програмом и одбранио Теоријске основе докторске дисертације. Кандидат је аутор једног научног рада категорије М22, два категорије М33, као и коаутор 1 научног рада категорије М21 и 2 научна рада категорије М33. Има 33 цитата према сервису Google Scholar. На основу свега наведеног комисија сматра да Владимир Никић испуњава услове за израду докторске дисертације.

Да ли кандидат испуњава дефинисане услове?

[ДА]

НЕ

V ОЦЕНА ПОДОБНОСТИ ПРЕДЛОЖЕНОГ МЕНТОРА

V.1 Биографија ментора (до 500 речи):

Др Иван Мезеи је редовни професор на Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду где је и докторирао 2012. године. Објавио је 1 уџбеник, 1 књигу, 2 поглавља у монографијама међународног значаја и 2 практикума. Аутор је 13 радова у међународним часописима индексираним у оквиру ИСИ листе, и преко 40 радова презентованих на међународним скуповима. Др Мезеи има више од 20 година искуства у пројектовању и раду са ембедед системима. Учествовао је на преко 20 међународних и националних пројеката, на којима је имао улогу руководиоца пројекта, руководица радног пакета, супервизора, руководиоца тима, као и сениор истраживача. Учествовао је у рецензирању за преко 20 часописа, као и пројеката у оквиру Horizon Europe. Др Мезеи има преко 650 цитата према сервису Google Scholar. Сениор члан је ИЕЕЕ организације.

V.2 Референце ментора из научне области којој припада тема докторске дисертације:

Р. бр.	аутори, наслов, <i>часопис</i> , волумен (година) број страница од-до, DOI или ISBN/ISSN	категорија
1.	A. Tanović, I. Mezei , "Lightweight Anomaly Detection in Digit Recognition using Federated Learning", Future Internet, MDPI, 17(8), 343, 2025, ISSN: 1999-5903, doi: 10.3390/fi17080343	M22
2.	D. Bortnik, V. Nikić, S. Šobot, D. Vukobratović, I. Mezei , and M. Lukić "Evaluation of Machine Learning Algorithms for NB-IoT Module Energy Consumption Estimation based on Radio Channel Quality", IEEE Access, 13, 2025, eISSN: 2169-3536, pp. 2389 – 2408, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3523864	M21
3.	V. Nikić, D. Bortnik, M. Lukić, D. Vukobratović, I. Mezei , "Lightweight Digit Recognition in Smart Metering System Using NB-IoT and Federated Learning", Future Internet, MDPI, 16(11), 402, 2024, ISSN: 1999-5903, doi: 10.3390/fi16110402	M21
4.	G. Bravos, A.J. Cabrera, C. Correa, D. Danilović, N. Evangeliou, G. Ezov, Z. Gajica, D. Jakovetić, L. Kallipolitis, M. Lukić, J. Mascolo, D. Masera, R. Mazo, I. Mezei , A. Miaoudakis, N. Milošević, W. Oliff, J. Robin, M. Smyrlis, G. Sakellari, G. Stamatias, D. Stamenković, S. Škrbić, C. Souveyet, S. Vantolas, G. Vasiliadis, D. Vukobratović, "Cybersecurity 4.0 Industrial Internet of Things: Architecture, Models and Lessons Learned", IEEE Access, Vol. 10, 2022., IEEE, eISSN 2169-3536, pp. 124747-124765, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3225074	M21
5.	I. Mezei , M. Lukić, L. Berbakov, B. Pavković, B. Radovanović, "Grapevine downy mildew warning system based on NB-IoT and energy harvesting technology", Electronics, MDPI, 11(3):356, pp. 1-19, 2022, ISSN: 2079-9292, doi: 10.3390/electronics11030356	M22

6.	J. Stanulovic, N. Mitton, I. Mezei "Routing with Face Traversal and Auctions Algorithms for Task Allocation in WSRN", Sensors, MDPI, 21(18):6149, pp. 1-23, 2021, ISSN: 1424-8220, doi: 10.3390/s21186149	M21
7.	M. Savic, M. Lukic, D. Danilovic, Z. Bodroski, D. Bajovic, I. Mezei , D. Vukobratovic, S. Skrbic, D. Jakovetic, "Deep Learning Anomaly Detection for Cellular IoT with Applications in Smart Logistics", IEEE Access, Vol. 9, 2021., IEEE, eISSN 2169-3536, pp. 59406-59419, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072916	M21
8.	I. Mezei "Evolution of an educational microprocessor", Computer Applications in Engineering Education, 28(5), 2020, Wiley, ISSN 1099-0542, pp. 1265-1277, doi: 10.1002/cae.22300	M22
9.	S. Tomić, I. Mezei , "Improvements of DV-Hop Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks", Telecommunication Systems 61(1), 2016, Springer, ISSN 1018-4864, pp. 93-106, doi: 10.1007/s11235-015-0014-9	M22
10.	M. Lukic, I. Mezei , "Localized Querying and Location Update Service in Wireless Sensor and Robot Networks with Arbitrary Topology", Int. J. Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2016, Vol. 22, No. 1, Inderscience, ISSN 1743-8233, pp.48–61, doi: 10.1504/IJAHUC.2016.076593	M23

V.3 Услови дефинисани за ментора у складу са *Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду* за област којој припада докторска дисертација:

За ментора може бити именован наставник односно научни радник са датог студијског програма докторских студија који има најмање 5 научних радова објављених или прихваћених за објављивање у научним часописима са ISI листе из одговарајуће области студијског програма, у последњих 10 година.

Образложење: Др Иван Мезеи је редовни професор, наставник докторских академских студија Енергетика, електроника и телекомуникације на Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду и има 10 (десет) научних радова објављених или прихваћених за објављивање у часописима са ISI листе из одговарајуће области студијског програма, у последњих 10 година.

Да ли ментор испуњава услове?

[ДА]

НЕ

VI ЗАКЉУЧАК

Тема је подобра	[ДА]	НЕ
Кандидат је подобра	[ДА]	НЕ
Ментор је подобра	[ДА]	НЕ

Образложење о подобности теме, кандидата и ментора (до 500 речи):

На основу увида у формулацију теме, предмета и циља истраживања, показаног познавања проблематике и очекиваних резултата, као и до сада објављених радова, Комисија сматра да је предложена **тема** „Оптимизација архитектура конволуционих неуронских мрежа и примена федеративног учења у системима са ограниченим ресурсима за препознавање цифара“ **подобра** за докторску дисертацију, да кандидат **Владимир Никић** испуњава **све законске услове за рад на предложеној теми** и да је др **Иван Мезеи** **подобра** за **ментора** предложене докторске дисертације.

Место и датум: Нови Сад, 31.12.2025.

1. др Наташа Самарцић, ванредни професор,
председник

2. др Татјана Николић, редовни професор, члан

3. др Драгана Бајовић, ванредни професор, члан

4. др Дејан Вукобратовић, редовни професор, члан

5. др Вук Врањковић, ванредни професор, члан

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај и да исти потпише.