

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 Самарцић | 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: Душан, Милан, Бортник
2. Датум рођења: 17.10.1996 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: Сигурна клијент-сервер комуникација коришћењем крипточипа и NB-IoT комуникационог модула

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, <i>часопис</i> , 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, тестирано је 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.		
Рад припада проблематици докторске дисертације: ДА НЕ ДЕЛИМИЧНО		

Р. бр.	аутори, наслов рада, <i>часопис</i> , 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 представљено 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 алгорита 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 предложен, 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 приказан 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 представљено 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	категорија
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 донео је бројне нове примене, али је истовремено изложио 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 окружењима у којима потрошња пропусног опсега и рачунарска снага не представљају значајан проблем. 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	категорија
6.	Nikic, 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, уз поштовање свих карактеристика и ограничења ове технологије.

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

Нови приступи употребе машинског учења у естимацији потрошње енергије и локализацији NB-IoT модула на основу параметара радио канала

Предложени наслов тезе је подобан?

[ДА]

НЕ

III.2 предмета (проблема) истраживања

Присуство и употреба Интернета ствари (енг. *Internet of Things*, IoT) у свакодневном животу се значајно повећала у протеклих неколико година. Током последње деценије издвојило се неколико битних фактора који утичу на скалабилност и одрживост таквих система. Неки од њих свакако су у спрези са начином на који се такви системи напајају. Стога, ово наглашава значај не само оптимизације, већ и прецизног предвиђања потрошње оваквих система. Други фактор који се издваја као битан код IoT система јесте локализација самих уређаја. Наиме, локализација IoT уређаја је кључна за оптимизацију перформанси и несметано функционисање већине данашњих система. Ова два концепта представљају главни предмет овог истраживања.

У оквиру првог дела истраживања врши се анализа како потрошње, тако и њене естимације у оквиру *Narrowband Internet of Things* (NB-IoT) серије комуникационих модула. Наиме, у данашњем IoT екосистему већина батеријски напајаних уређаја користи литијумске батерије, чија изузетно заравњена крива пражњења онемогућава поуздану процену преостале енергије на основу излазног напона. Са друге стране, будући да је реч о једном комплексном систему, функционално различити делови IoT уређаја су различити и у погледу њихове потрошње. Код комуникационих модула, који сами по себи представљају интегрални део свих IoT уређаја, квалитет комуникационог канала игра значајну улогу у варијабилности саме потрошње уређаја. Наиме, у NB-IoT модулима уочљиви су карактеристични обрасци потрошње енергије, при чему су иницијалне процедуре повезивања са мрежом најдуготрајније и енергетски најзахтевније, док су касније активације из режима ниске потрошње знатно ефикасније. Након тога, потрошњу енергије доминантно одређује фаза преноса података, на коју утичу параметри радио канала и унутрашњи параметри комуникационог модула. Ови параметри формирају базис овог дела истраживања. Додатно, за разлику од традиционалних метода за процену потрошње енергије које се обично ослањају на различита мерења напона и струје батерије и аналитичко моделовање потрошње, приступ у оквиру овог истраживања подразумева употребу алгоритама машинског учења.

Други битан фактор који утиче на перформансе система јесте могућност локализације уређаја. Традиционалне методе за локализацију најчешће користе Глобални Навигациони Сателитски Систем (GNSS) и остварују тачност до неколико метара. Ипак, ова решења имају неколико недостатака у контексту IoT система. Како GNSS сигнал има слабу пенетрацију кроз зидове, решења која користе GNSS постају неприхватљива у ситуацијама када се уређаји налазе у затвореном простору или мигрирају унутар и изван објеката. Са друге стране, потрошња GNSS пријемника је висока, што драстично скраћује очекивани век трајања батерије. Главни фокус другог дела истраживања јесте усмерен на показивање да се на основу параметара комуникационог канала уз употребу машинског учења, могу донети значајни закључци о локацији самог уређаја који комуницира у склопу NB-IoT мреже.

Предмет истраживања је подобан?

[ДА]

НЕ

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

У оквиру ове докторске дисертације биће спроведен детаљан преглед релевантне литературе из области од интереса за исту. Наведени преглед обухвата следеће тематске целине:

- **Естимација потрошње енергије NB-IoT уређаја**

Обрађена литература обухвата:

- Студије које се баве анализом потрошње енергије NB-IoT комуникационих модула
- Аналитичке и емпиријске приступе за естимацију потрошње енергије
- Приступе засноване на примени техника машинског учења, укључујући:

- Естимацију потрошње енергије применом метода машинског учења
- Естимацију животног века батерије применом метода машинског учења
- **Локализација NB-IoT уређаја**
Разматрана литература обухвата:
 - Аналитичке и емпиријске приступе проблему локализације
 - Приступе локализацији засноване на примени техника машинског учења

У наредних неколико пасуса приказан је преглед тренутног стања и проблема у области од интереса за ово истраживање.

У претходном периоду, одређени број студија се бавио анализом потрошње и снаге NB-IoT технологије [1,2], са циљем естимације животног века уређаја [3], [4] и [5]. Већина ових студија имала је за циљ да изврши детаљну дисекцију рада NB-IoT комуникационих модула, односно да независно анализира сваку фазу и одреди однос између потрошње енергије и различитих временских параметара и параметара који се тичу квалитета комуникационог, радио канала. У раду [6] представљена је посебно дизајнирана NB-IoT платформа, коришћена и у току овог истраживања, која омогућује прецизно мерење потрошње NB-IoT модула током различитих фаза преноса података. У различитим сценаријима, потрошња енергије је разложена и анализирана кроз различите фазе преноса података, и на тај начин одрађено прецизно мерење потрошње енергије по фазама. Свеобухватни преглед LPWAN технологија приказан је у [7], где аутори спроводе изузетно детаљну евалуацију перформанси одређених технологија у реалном окружењу.

Први рад који процењује потрошњу енергије комерцијално доступног NB-IoT уређаја употребом емпиријског приступа дат је у [8]. Аутори упоређују своја мерења са референтним вредностима из 3GPP стандарда, при чему су добијени обећавајући резултати. Наиме, њихов емпиријски модел даје процене са грешком од око 10% у односу на процене које је дао 3GPP. Исти аутори, у свом другом раду [9], дају и аналитички модел, базиран на Марковљевим ланцима. Још једна студија, дата у [10], презентује емпиријску анализу и моделовање потрошње NB-IoT технологије у експерименталном окружењу. Аутори указују да су главни фактори који утичу на потрошњу: тип комуникационог модула, мрежни оператор, квалитет сигнала, као и употреба специјалних режима ниске потрошње које модули поседују. У раду [11], аутори спроводе детаљну анализу профила потрошње енергије у NB-IoT мрежама користећи *Quectel BG96* модул кроз различите фазе *Radio Resource Control (RRC)* протокола. За разлику од овог истраживања, они су користили анализатор снаге за мерење потрошње. Аутори указују да њихов предложени модел процењује потрошњу са грешком у распону од 0,33% до 15,38%. У оквиру рада [12], презентован је још један аналитички приступ у процени потрошње енергије за две различите IoT целуларне технологије: NB-IoT и *Long-Term Evolution for Machines (LTE-M)*, при чему постижу грешку у процени од 5%. У [13], аутори анализирају потрошњу комуникационог модула *Quectel BG77* и дају свој аналитички модел за процену животног века батерије. На крају, у претходним годинама могу се наћи и различита истраживања о процени могућности *Li-Ion* батерија на основу различитих улазних карактеристика као што су напон, струја или температура. Да би ово постигли, неки од њих користе различите технике машинског учења [14], [15].

Један од првих детаљних прегледа различитих техника локализације NB-IoT уређаја дат је у [16]. Аутор износи низ различитих метода и техника локализације, али и метрика које се користе у оцени квалитета локализације. Додатно, аутор даје примере практичне употребе наведених локализационих техника. У раду [17], аутори износе три методе локализације уређаја базираних на индикатору јачине примљеног сигнала унутар једне NB-IoT ћелије. У резултатима показују да овакви приступи дају средњу грешку процене локације између 200m и 340m. Још један рад који се бави сличном тематиком дат је у [18]. Аутори предлажу нову технику за локализацију унутар затворених објеката базирану на јачини примљеног сигнала.

Недавна, свеобухватна студија која се бави тематиком употребе машинског учења за сврхе локализације у IoT системима дата је у [19]. У оквиру ње, аутори на студиозан начин дају преглед различитих радова у периоду између 2020. и 2022. године, класификују их сходно различитим критеријумима, дискутују практичне примене алгоритама машинског учења у локализацији и дају своје виђење будућих трендова. Рад који анализира примену различитих алгоритама машинског учења у локализацији унутар затворених објеката на бази индикатора јачине примљеног сигнала дат

је у [20]. Два детаљна прегледа вертикалних и хоризонталних приступа за унутрашњу локализацију који користе технике машинског учења представљени су у [21] и [22].

Једно од првих истраживања које се бави употребом WKNN модела машинског учења у *range-free* локализацији NB-IoT уређаја представљено је у раду [23]. У оквиру [24], аутори експериментишу са четири различите методе машинског учења у *range-free* локализацији у оквиру NB-IoT мрежа. Евалуација ових техника одрађена је са експериментално добијеним подацима. Коначно, у оквиру [25], аутори се фокусирају на употребу машинског учења за локализацију уређаја који користе SigFox. Суштина њиховог приступа огледа се у стратешком позиционирању малог броја референтних сензорских чворова који поседују GNSS модул, како би се побољшала прецизност локализације других сензорских чворова који немају GNSS модул.

- [1] S. Farrell, *Low-Power Wide Area Network (LPWAN) Overview*, RFC 8376, RFC Editor, May 2018, doi: 10.17487/RFC8376. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc8376>
- [2] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Academic Press, 2013.
- [3] R. K. Singh, P. P. Puluckul, R. Berkvens, and M. Weyn, “Energy consumption analysis of LPWAN technologies and lifetime estimation for IoT application,” *Sensors*, vol. 20, no. 17, Art. no. 4794, 2020.
- [4] S. Duhovnikov, A. Baltaci, D. Gera, and D. A. Schupke, “Power consumption analysis of NB-IoT technology for low-power aircraft applications,” in *Proc. IEEE 5th World Forum Internet of Things (WF-IoT)*, Limerick, Ireland, Apr. 2019, pp. 719–723.
- [5] P. Jörke, R. Falkenberg, and C. Wietfeld, “Power consumption analysis of NB-IoT and eMTC in challenging smart city environments,” in *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Abu Dhabi, UAE, Dec. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644481.
- [6] M. Lukic, S. Sobot, I. Mezei, D. Vukobratovic, and D. Danilovic, “In-depth real-world evaluation of NB-IoT module energy consumption,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Smart Internet of Things (SmartIoT)*, Beijing, China, Aug. 2020, pp. 261–265.
- [7] H. A. H. Alobaidy, M. J. Singh, R. Nordin, N. F. Abdullah, C. G. Wei, and M. L. S. Soon, “Real-world evaluation of power consumption and performance of NB-IoT in Malaysia,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 13, pp. 11614–11632, 2021.
- [8] M. Lauridsen, R. Krigslund, M. Rohr, and G. Madueño, “An empirical NB-IoT power consumption model for battery lifetime estimation,” in *Proc. IEEE 87th Vehicular Technology Conf. (VTC Spring)*, Porto, Portugal, Jun. 2018, pp. 1–5.
- [9] P. Andres-Maldonado, M. Lauridsen, P. Ameigeiras, and J. M. Lopez-Soler, “Analytical modeling and experimental validation of NB-IoT device energy consumption,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 5691–5701, 2019.
- [10] F. Michelinakis, A. S. Al-Selwi, M. Capuzzo, A. Zanella, K. Mahmood, and A. Elmokashfi, “Dissecting energy consumption of NB-IoT devices empirically,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 1224–1242, 2020.
- [11] S. M. Z. Khan, M. M. Alam, Y. Le Moullec, A. Kuusik, S. Päränd, and C. Verikoukis, “An empirical modeling for the baseline energy consumption of an NB-IoT radio transceiver,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 19, pp. 14756–14772, 2021.
- [12] A. Sørensen, H. Wang, M. J. Remy, N. Kjettrup, R. B. Sørensen, J. J. Nielsen, P. Popovski, and G. C. Madueño, “Modeling and experimental validation for battery lifetime estimation in NB-IoT and LTE-M,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 12, pp. 9804–9819, 2022.
- [13] N. Labdaoui, F. Nouvel, and S. Dutertre, “NB-IoT Power Consumption: A Comparison of SFR and Objenious Network Operators,” in *Proc. 17ème Colloque du GDR SoC2*, 2023.
- [14] S. Shen, M. Sadoughi, X. Chen, M. Hong, and C. Hu, “A deep learning method for online capacity estimation of lithium-ion batteries,” *Journal of Energy Storage*, vol. 25, p. 100817, 2019.
- [15] A. G. Olabi, A. A. Abdelghafar, B. Soudan, A. H. Alami, C. Semeraro, M. Al Radi, M. Al-Murisi, and M. A. Abdelkareem, “Artificial neural network driven prognosis and estimation of lithium-ion battery states: Current insights and future perspectives,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, p. 102429, 2024.
- [16] A. Anjali, “NB-IoT for localization and target detection,” in *Principles and Applications of Narrowband Internet of Things (NB-IoT)*, IGI Global, 2021, pp. 105–126.
- [17] T. Janssen, R. Berkvens, and M. Weyn, “RSS-based localization and mobility evaluation using a single NB-IoT cell,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6172, 2020.

- [18] M. N. Amr, H. M. ELAttar, M. H. A. El Azeem, and H. El Badawy, "An enhanced indoor positioning technique based on a novel received signal strength indicator distance prediction and correction model," *Sensors*, vol. 21, no. 3, p. 719, 2021.
- [19] R. Shahbazian, G. Macrina, E. Scalzo, and F. Guerriero, "Machine learning assists IoT localization: A review of current challenges and future trends," *Sensors*, vol. 23, no. 7, p. 3551, 2023.
- [20] M. W. P. Maduraga and R. Abeysekara, "Comparison of supervised learning-based indoor localization techniques for smart building applications," in *Proc. Int. Res. Conf. Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)*, Colombo, Sri Lanka, 2021, vol. 4, pp. 145–148.
- [21] A. Sonny, A. Kumar, and L. R. Cenkeramaddi, "A survey of application of machine learning in wireless indoor positioning systems," arXiv preprint arXiv:2403.04333, 2024.
- [22] I. Ashraf, Y. B. Zikria, S. Garg, S. Hur, Y. Park, and M. Guizani, "Enabling technologies and techniques for floor identification," *ACM Computing Surveys*, vol. 57, no. 1, pp. 1–48, 2024.
- [23] E. Gambi, L. Senigagliesi, A. Barbaresi, M. Mellini, and A. De Santis, "A WKNN-based approach for NB-IoT sensors localization," *Digital Communications and Networks*, vol. 9, no. 1, pp. 175–182, 2023.
- [24] L. De Nardis *et al.*, "Range-free positioning in NB-IoT networks by machine learning: Beyond WkNN," *IEEE Journal of Indoor and Seamless Positioning and Navigation*, vol. PP, pp. 1–18, 2025.
- [25] H. Sallouha, A. Chiumento, S. Rajendran, and S. Pollin, "Localization in ultra-narrow band IoT networks: Design guidelines and tradeoffs," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 9375–9385, 2019.

Избор литературе је одговарајући?

[ДА]

НЕ

III.4 циљева истраживања

Основни домен истраживања ове докторске дисертације јесте проучавање и примена различитих техника машинског учења у циљу естимације потрошње и локализације уређаја у NB-IoT мрежи. У оквиру истраживања предвиђено је креирање хардверско-софтверске експерименталне поставке, која ће представљати основу за даљу анализу. Помоћу ње, извршиће се генерисање обимног и разноврсног скупа података који ће садржати податке о различитим параметрима радио канала и потрошњи уређаја по пренесеном пакету, као и информације о потрошњи самог уређаја. Након тога, биће спроведена детаљна анализа и постпроцесирање добијених података. Ови подаци представљаће основни алат за анализу и увођење нових метода на бази машинског учења у естимацији потрошње и животног века, као и локализацији самог уређаја у NB-IoT мрежи, у реалним оперативним условима.

Очекивани доприноси ове докторске дисертације су:

- Реализација комплетне експерименталне хардверско-софтверске поставке за генерисање скупа података који ће се користити у даљем току истраживања за потребе естимације потрошње енергије и локализације уређаја у NB-IoT мрежи; свеобухватна анализа и обрада генерисаног скупа података који ће укључивати различите параметре радио канала, информацију о потрошњи уређаја, као и информацију о локацији уређаја;
- Анализа могућности и достижности естимације потрошње енергије и животног века уређаја у NB-IoT мрежи на основу параметара радио канала употребом машинског учења; анализа и одређивање оптималних модела машинског учења, као и оптималних скупова улазних параметара за естимацију потрошње енергије и животног века уређаја у NB-IoT мрежи;
- Анализа могућности и достижности локализације уређаја у NB-IoT мрежи на основу параметара радио канала употребом машинског учења; анализа и одређивање оптималних модела машинског учења, као и оптималних скупова улазних параметара за локализацију уређаја у NB-IoT мрежи.

Циљеви истраживања су одговарајући?

[ДА]

НЕ

III.5 очекиваних резултата (хипотезе)

Основна хипотеза овог истраживања јесте да је могуће, на основу параметара радио канала и употребом техника машинског учења, проценити потрошњу енергије и одредити локацију NB-IoT уређаја.

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

Истраживање ће обухватати три фазе: прву фазу која за крајњи циљ има генерисање скупа података који представља основни алат за даље истраживање, другу фазу која се бави естимацијом потрошње код NB-IoT уређаја, и, коначно, трећу фазу која се бави локализацијом уређаја у NB-IoT мрежи.

У првој фази рада биће развијена хардверско-софтверска експериментална платформа као основа за даља истраживања, која ће омогућити генерисање разноврсног скупа података о параметрима радио канала, потрошњи NB-IoT уређаја и његовој локацији путем GNSS-а. Хардвер ће обухватати микроконтролерско језгро, NB-IoT комуникациони модул, коло за мерење струје и додатни хардвер за прикупљање података о локацији. У оквиру ове фазе биће развијен фирмвер који омогућава комуникацију са сервером, мерење потрошње, прикупљање података о квалитету радио канала и локацији, као и прослеђивање података корисничкој апликацији. Поред тога, биће имплементирана серверска страна и GUI апликација за контролу платформе и агрегацију података путем серијских протокола. Након имплементације, биће дефинисани сценарији мерења, прикупљени одговарајући скупови података у различитим радио и географским условима и спроведена њихова детаљна анализа ради обезбеђивања тачности, конзистентности и употребљивости.

У другој фази истраживања фокус је на евалуацији и естимацији потрошње енергије и животног века батерије NB-IoT уређаја на основу параметара радио канала, употребом машинског учења. Први корак подразумева анализу и селекцију најрелевантнијих улазних параметара из прикупљеног скупа података, уз примену различитих метода селекције ради бољег разумевања њихове корелације са потрошњом енергије. Главни циљ фазе је примена и евалуација модела машинског учења за прецизну естимацију потрошње и процену животног века батерије у различитим реалним сценаријима, уз анализу њиховог меморијског отиска и применљивости на уређајима са ограниченим ресурсима. Коначно, биће размотрена достижност интеграције изабраних модела директно на NB-IoT уређај, као и спроведена компаративна анализа предложеног приступа у односу на постојеће методологије из литературе.

У трећој фази истраживања разматра се естимација локације NB-IoT уређаја на основу параметара радио канала, као алтернатива традиционалним GNSS методама које нису увек применљиве. Први корак подразумева детаљну анализу улазних параметара ради избора њиховог оптималног скупа за локализацију, при чему ће GNSS подаци служити као референтне вредности. Главни циљ фазе је примена и евалуација различитих модела машинског учења за процену локације NB-IoT уређаја, уз поређење алгоритама и избор модела са најбољим перформансама. Паралелно ће бити анализиран меморијски отисак предложених модела како би се проценила њихова применљивост на IoT уређајима са ограниченим ресурсима. На крају, биће дефинисани и тестирани различити *indoor*, *outdoor* и комбиновани сценарији, као и извршено поређење предложеног приступа са сродним методологијама из литературе.

Оријентациони садржај докторске дисертације је:

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, класификација, регресија, потрошња енергије локализација NB-IoT уређаја итд.;
3. *Експериментална поставка и прикупљање узорака* – обрада тематике дефинисане у фази 1;
4. *Проблем естимације потрошње NB-IoT модула* – обрада тематике дефинисане у фази 2;
5. *Проблем локализације NB-IoT модула* – 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*

III.7 метода и узорака истраживања

Метод који ће бити примењен у дисертацији обухвата примену стандардних техника развоја софтвера за уграђене системе (у програмском језику *C*), као и израду графичког корисничког интерфејса (*GUI*) у развојном окружењу *Qt* за апликативни део експерименталне поставке.

За потребе машинског учења, симулација и анализе резултата користиће се језици високог нивоа (програмски језик *Python* са његовом колекцијом библиотека намењених машинском учењу), што омогућава флексибилност, реконфигурабилност, аутоматизовану евалуацију и брзо извођење великог броја симулација. Оваквим приступом такође се олакшава и поређење са постојећим решењима из литературе, будући да се у већини радова из ове области користе исте технике евалуације резултата.

За потребе прикупљања скупа података, биће коришћен прототип хардверске платформе који садржи NB-IoT модем и специјализовано коло за мерење потрошње струје. Додатно, експериментална поставка ће бити мобилна, батеријски напајана и повезана са преносивим рачунаром путем кога ће се вршити комуникација са хардверском платформом.

Експеримент је осмишљен са циљем прикупљања података са различитих локација у Научно-технолошком парку у Новом Саду, као и са урбане територије града Новог Сада.

Мерења у згради Научно-технолошког парка ће бити вршена на пет спратова, од приземља до четвртог спрата, при чему ће локације за мерење бити распоређене на приближном растојању од 3,5 метара дуж ходника зграде (>150 мерних локација). Мерења за спољашње сценарије ће бити обављена на отвореним јавним површинама урбаног дела града Новог Сада (>50 мерних локација).

Метод и узорак су одговарајући?

[ДА]

НЕ

III.8 места, лабораторије и опреме за истраживачки рад

Зграда Научно-технолошког парка у Новом Саду и територија града Новог Сада, 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 ове докторске дисертације јесте примена колекције регресионих, класификационих и других релевантних техника машинског учења у циљу естимације потрошње енергије и локализације NB-IoT уређаја. Додатно, главне метрике које ће бити експлоатисане у оквиру истраживања су, између осталих, тачност предикције, R^2 метрика, $F1$ вредност, стандардна девијација, MAE вредност, MSE вредност, меморијски отисак модела и др.

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:

Душан Бортник 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 M21, једног категорије M33, као и коаутор 1 научног рада категорије M22 и 3 научна рада категорије

M33. Има 33 цитата према сервису Google Scholar. На основу свега наведеног комисија сматра да Душан Бортник 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	категиорија
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	M22
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. Stamatis, 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 „Нови приступи употребе машинског учења у естимацији потрошње енергије и локализацији NB-IoT модула на основу параметара радио канала“** подобра за докторску дисертацију, да кандидат Душан Бортник 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 Самарџић, 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.