

КОМИСИЈИ ЗА СТУДИЈЕ II СТЕПЕНА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Комисија за студије II степена, Електротехничког факултета у Београду, на својој седници одржаној 25.08.2026 године именовала нас је у Комисију за преглед и оцену мастер рада дипл. инж. Александар Цветковић под насловом „Реализација процене стања напуњености батерије коришћењем неуронских мрежа на наменском рачунарском систему.". Након прегледа материјала Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Биографски подаци кандидата

Александар Цветковић је рођен 06.09.2001. године у Стоцкхолму. Основну школу „Др Јован Цвијић – Смедерево" завршио је 2016. године. Средњу школу „Гимназија – Смедерево" завршио је 2020. године. Електротехнички факултет у Београду уписао је 2020. године на одсеку „Електроника и дигитални системи". Дипломирао је 2024. године са просечном оценом 7,96. Дипломски рад одбранио је са оценом 10. Мастер академске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2024. године на модулу „Електроника и дигитални системи".

2. Извештај о студијском истраживачком раду

Кандидат Александар Цветковић је, као припрему за израду мастер рада, спровео истраживање релевантне научне и стручне литературе из области литијум-јонских батерија, естимације стања напуњености (State of Charge, SoC) и примене малих неуронских мрежа на ресурсно ограниченим микроконтролерским платформама (TinyML).

У оквиру истраживања анализиране су карактеристике литијум-јонских ћелија и физички механизми који одређују везу између напона, струје и стања напуњености. Обрађене су традиционалне методе естимације SoC, укључујући бројање кулона и приступе засноване на еквивалентном електричном колу батерије у комбинацији са Калмановим филтером, уз поређење њихових предности и ограничења у односу на приступе засноване на машинском учењу.

Истражене су различите архитектуре неуронских мрежа примењиване у литератури за естимацију SoC, укључујући вишеслојне перцептроне, конволуционе и рекурентне неуронске мреже. Посебна пажња посвећена је области TinyML, поступку квантизације модела у нижу нумеричку прецизност, библиотеци TensorFlow Lite for Microcontrollers и њеном Arduino омотачу MicroTFLite, као и хардверској архитектури ESP32 микроконтролерске платформе.

Кандидат је анализирао јавно доступан скуп података добијен мерењем на Panasonic 18650PF литијум-јонској ћелији током симулираних возних циклуса, укључујући методологију прикупљања података и приступе коришћене у постојећој литератури везаној за исти скуп података. На основу спроведеног истраживања дефинисани су методологија припреме података, критеријуми за одабир улазних обележја, архитектуре модела које ће бити тестиране, као и план експерименталне евалуације на реалном хардверу.

3. Опис мастер рада

Мастер рад обухвата 52 стране, са 23 слике, 9 табела и 19 референци, кроз увод, седам тематских поглавља и закључак (укупно девет поглавља), као и списак литературе.

Прво поглавље представља предмет, циљ и мотивацију рада – анализу примене малих неуронских мрежа за процену SoC батерије на ресурсно ограниченом микроконтролеру, уз мерење стварне цене имплементације. Друго поглавље даје теоријске основе естимације SoC: карактеристике литијум-јонских ћелија, традиционалне методе (бројање кулона, Калманов филтер) и приступе засноване на машинском учењу. Треће поглавље обрађује TinyML и имплементацију неуронских мрежа на микроконтролерима: квантизацију модела, библиотеку TensorFlow Lite for Microcontrollers и ограничења наменских платформи. Четврто поглавље описује скуп података (Panasonic 18650PF) и припрему обележја: обраду сигнала, SoC ознаку, одабир обележја, временске прозоре, поделу на тренинг/тест скуп и нормализацију.

Пето поглавље приказује архитектуре MLP, CNN и TCN, њихово тренирање и резултате на рачунару у float32 облику.

Шесто поглавље описује квантизацију модела у INT8 формат и конверзију у TensorFlow Lite за микроконтролер.

Седмо поглавље приказује хардверску и софтверску реализацију на ESP32 платформи помоћу MicroTFLite библиотеке, укључујући мерење меморије и брзине инференце.

Осмо поглавље даје резултате: поређење тачности на рачунару и микроконтролеру, анализу грешака код регенеративног кочења и преглед меморијских и временских захтева.

Девето поглавље садржи закључна разматрања, критички осврт на резултате, ограничења истраживања и правце даљег рада.

4. Анализа са кључним резултатима

Мастер рад дипл. инж. Александра Цветковића бави се анализом могућности примене малих неуронских мрежа за процену стања напуњености литијум-јонске батерије директно на ресурсно ограниченом микроконтролеру. Тренирана су три архитектуре (MLP, CNN и TCN) на скупу података за Panasonic 18650PF ћелију, квантизоване у 8-битни формат и имплементиране на ESP32 платформи, где су измерени тачност, меморијски захтеви и брзина извршавања.

Сва три модела на рачунару, у float32 облику, постижу сличну тачност, али после квантизације и извршавања на микроконтролеру тачност значајно опада, при чему деградација расте са бројем слојева: TCN, упркос најбољој тачности на рачунару, показује највећи пад тачности, највеће меморијске захтеве и најспорије извршавање. Идентификован је и физички објашњен заједнички образац грешке везан за регенеративно кочење, услед ограниченог временског контекста.

Ниједан модел није неупитно најбољи по свим критеријумима: MLP нуди најбољу просечну тачност и најбржу инференцу, али уз високу максималну грешку, док CNN нуди бољу робусност уз умерен трошак. Основни доприноси рада су:

1. систематско поређење MLP, CNN и TCN архитектура за естимацију SoC батерије, уз мерење тачности, брзине и меморије на микроконтролеру;
2. потврда да се тачност модела у float32 значајно разликује од тачности након квантизације и извршавања на уређају, при чему разлика расте са бројем слојева;
3. идентификација и физичко објашњење обрасца грешке везаног за регенеративно кочење, заједничког за сва три модела;
4. одређивање минималних меморијских захтева и брзине инференце за свако од три модела на ESP32;
5. анализа компромиса тачности, брзине и меморије, са критеријумима за избор архитектуре према приоритетима примене.

5. Закључак и предлог

Кандидат Александар Цветковић је у свом мастер раду успешно реализовао и експериментално испитао три архитектуре неуронских мрежа за процену стања напуњености литијум-јонске батерије, квантизоване и имплементирани на ресурсно ограниченој ESP32 микроконтролерској платформи. Резултати показују да остварена решења, иако не постижу тачност довољну за непосредну комерцијалну примену, поуздано демонстрирају изводљивост TinyML приступа овом проблему, уз јасно идентификован и квантификован ефекат који квантизација и извршавање на реалном уређају имају на деградацију перформанси модела. Посебна вредност рада огледа се у критичком односу кандидата према сопственим резултатима: разлика између тачности на рачунару и на уређају детаљно је проверена пре него што је прихваћена као стваран ефекат, а не грешка у имплементацији, узрок највећих грешака физички је објашњен, а ограничења спроведене методологије јасно су наведена и дискутована.

Кандидат је током израде рада показао самосталност, систематичност и способност повезивања теоријских знања из области естимације стања напуњености батерије, машинског учења и наменских рачунарских система са практичном реализацијом и експерименталном провером на реалном хардверу.

На основу изложеног, Комисија предлаже Комисији за студије II степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду да мастер рад дипл. инж. Александра Цветковића под насловом „Реализација процене стања напуњености батерије коришћењем неуронских мрежа на наменском рачунарском систему” прихвати као мастер рад и кандидату одобри јавну усмену одбрану.

Београд, 11.09.2026. године

Чланови комисије:

др Владимир Рајовић Ванредни професор
сагласан, 11.09.2026.

др Ненад Јовичић Ванредни професор
сагласан, 11.09.2026.

др Харис Туркмановић Асистент
сагласан, 11.09.2026.