

# КОМИСИЈИ ЗА СТУДИЈЕ II СТЕПЕНА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Комисија за студије II степена, Електротехничког факултета у Београду, на својој седници одржаној 08.09.2026 године именовала нас је у Комисију за преглед и оцену мастер рада дипл. инж. Сара Бабић под насловом „Моделовање дискретних извора с меморијом помоћу трансформер архитектуре у системима за аритметичко кодовање“. Након прегледа материјала Комисија подноси следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. Биографски подаци кандидата

Сара Бабић је рођена 24.05.2001. године у Краљеву. Завршила је основну школу „Бане Миленковић“ у Новом Селу као вуковац и добитник Ђинђићеве награде. Уписала је Гимназију у Врњачкој Бањи, општи смер, коју је завршила као вуковац и такође добитник Ђинђићеве награде. Матурски рад из предмета Географија, радила је на тему „Вулкани и земљотреси“, Електротехнички факултет у Београду уписала је 2020. године. Дипломирала је са просечном оценом 8,21 на одсеку за Телекомуникације и информационе технологије. Дипломски рад из предмета Архитектура Интернета, на тему „Хијерархијски модел LAN мрежа“, одбранила 2024. године са оценом 10. За време студирања била је део тима H-Bridges на факултету, са којим је освојила четврто место у финалу IFEC такмичења у Тексасу које организује IEEE. Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за информационо комуникационе технологије, уписала је у октобру 2024. године. Положила је све испите са просечном оценом 10,0. Запослена је од јула 2026. године као видео инжењер.

### 2. Извештај о студијском истраживачком раду

Кандидаткиња Сара Бабић је као припрему за израду мастер рада урадила преглед релевантне литературе из области теорије информација, дискретних извора са меморијом, трансформер архитектуре, аритметичког кодовања и савремених великих језичких модела. Посебна пажња посвећена је условним вероватноћама и ентропији извора са меморијом, као и могућности да се softmax излаз трансформера тумачи као процена целе условне расподеле наредног симбола на основу претходног контекста.

Практични део рада реализован је у програмском језику Python, уз коришћење библиотеке PyTorch. Развијени су модули за емпиријску анализу статистике извора, припрему и кодирање текстуалних података, тренинг и евалуацију малог ауторегресивног трансформер модела, као и целобројни аритметички кодер и декодер са ренормализацијом интервала. Извршени су експерименти на једноставном бинарном извору са меморијом првог реда и на тексту на енглеском језику. Добијене вероватноће коришћене су најпре за статистичко поређење, а затим и као модел извора у аритметичком кодовању, при чему је посебно проверено да декодер користи искључиво већ реконструисане симболе и да нема приступ будућим подацима.

### 3. Опис мастер рада

Мастер рад обухвата 56 страна, са укупно 22 слике и 12 табела. Рад садржи увод, шест централних поглавља и закључак (укупно 8 поглавља), списак литературе, списак скраћеница, спискове слика и табела. У првом поглављу су описани предмет и циљ рада. Објашњена је основна идеја да се трансформер може посматрати као модел извора који из претходног контекста процењује расподелу вероватноће наредног симбола.

У другом поглављу описани су дискретни извори информација, условне и здружене вероватноће, ентропија и условна ентропија. Као илустративни примери разматрани су бинарни Марковљев извор и природни говорни језик.

Треће поглавље садржи опис трансформер архитектуре. Обрађени су embedding и позиционе репрезентације, self-attention и multi-head attention механизми, feed-forward слојеви, каузално маскирање и softmax излазна расподела, са нагласком на ауторегресивно моделовање.

У четвртном поглављу приказана је примена трансформера за статистичку анализу извора са меморијом. Описани су припрема података, израчунавање емпиријских вероватноћа, архитектура и тренинг модела, као и поређење емпиријских и трансформерских расподела помоћу средње апсолутне грешке.

Пето поглавље се бави применом трансформера у аритметичком кодовању. Приказани су експерименти са

бинарним извором првог реда и са текстом на енглеском језику, уз поређење модела без меморије, модела првог реда и трансформера.

У шестом поглављу исти пробабилистички принцип повезан је са великим језичким моделима. Размотрени су токенизација, предикција наредног токена, претренирање, скалирање и генерисање текста, као и разлика између малог карактерског трансформера и великих ауторегресивних модела.

Седмо поглавље посвећено је четбот системима заснованим на великим језичким моделима. Описани су развој четбот система, управљање контекстом и историјом разговора, коришћење спољних алата и основна ограничења савремених система.

Осмо поглавље садржи закључак са освртом на добијене резултате, ограничења и могуће правце даљег рада.

#### **4. Анализа са кључним резултатима**

Мастер рад дипл. инж. Саре Бабић се бави применом трансформера за статистичко моделовање извора са меморијом и коришћењем добијених условних вероватноћа у аритметичком кодовању. У првом делу практичне анализе развијен је трансформер на нивоу карактера, трениран од почетка на конкретном тексту, без коришћења унапред истренираног језичког модела. Поређењем емпиријских условних расподела и softmax расподела трансформера добијена је средња апсолутна грешка  $MAE = 0,006436$ , што показује да је модел успешно апроксимирао статистичке зависности у анализираном извору.

Примена трансформера у компресији испитана је најпре на бинарном Марковљевом извору првог реда, а затим и на тексту на енглеском језику. Код бинарног извора трансформер је веома прецизно реконструисао познате условне вероватноће, док је стварним аритметичким кодовањем 1.000 симбола добијено 0,4590 бит/симбол уз потпуно тачно декодовање. Код текстуалног извора, на одвојеном тест скупу, модел без меморије захтевао је 4,9618 бит/симбол, модел првог реда 4,1183 бит/симбол, док је трансформер са контекстом до 16 карактера постигао 3,2822 бит/симбол. Стварним аритметичким кодовањем добијено је 3,2667 бит/симбол, при чему је декодирани текст био у потпуности идентичан оригиналном.

Посебна пажња посвећена је услову да кодер и декодер у сваком тренутку користе исту расподелу вероватноћа. Током кодовања трансформер користи само претходне симболе оригиналне секвенце, а током декодовања искључиво већ реконструисане симболе, чиме је потврђено да може да функционише као заједнички пробабилистички модел извора на обе стране аритметичког кодера. Истовремено су размотрена и практична ограничења оваквог приступа, пре свега већа рачунарска сложеност и величина самог модела.

## 5. Закључак и предлог

Кандидаткиња Сара Бабић је у свом мастер раду успешно повезала теоријски опис дискретних извора са меморијом са практичном применом трансформер архитектуре. Развијен је програмски систем за емпиријску анализу вероватноћа, тренинг и евалуацију трансформера и аритметичко кодовање, а добијени резултати показали су да трансформер може прецизно да апроксимира статистику једноставног извора првог реда и да код природног језика искористи шири контекст за смањење просечног броја бита по симболу. У оба практична теста потврђено је потпуно тачно декодовање без коришћења будућих симбола. Рад је додатно поставио добијене резултате у шири контекст великих језичких модела и савремених четбот система.

Кандидаткиња је показала добро разумевање разматране материје, способност повезивања теорије информација, машинског учења и компресије података, као и способност реализације и анализе експерименталног програмског решења.

На основу изложеног, Комисија предлаже Комисији за студије II степена Електротехничког факултета у Београду да рад кандидаткиње Саре Бабић прихвати као мастер рад и да се кандидаткињи одобри јавна усмена одбрана.

Београд, 11.09.2026. године

Чланови комисије:

---

др Предраг Иваниш Редовни професор  
сагласан, 11.09.2026.

---

др Весна Благојевић Ванредни професор  
сагласан, 11.09.2026.