

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Илије Танасковића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета, Универзитета у Београду бр. 777/24 од 21.4.2026 године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Илије Танасковића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства под насловом

**Карактеризација кардиографских сигнала методама статистичке анализе и машинског учења**  
(енг. *Characterization of cardiographic signals using methods of statistical analysis and machine learning*)

После прегледа достављене докторске дисертације (у даљем тексту: Дисертације) и других пратећих материјала, као и после разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Илија Танасковић је уписао докторске академске студије школске 2021/2022. године на Универзитету у Београду – Електротехничком факултету на Модулу за Управљање системима и обраду сигнала. Положио је све испите са просечном оценом 10,00 и испунио све обавезе везане за студијски истраживачки рад, а које су предвиђене планом и програмом.

Кандидат је 10.6.2024. године пријавио тему докторске дисертације под насловом „Развој метода за карактеризацију кардиографских сигнала”. На 899. седници, одржаној 2.7.2024. године, Наставно-научно веће Електротехничког факултета, Универзитета у Београду донело је одлуку (бр. 1275/23 од 2.7.2024. године) о именовању Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у следећем саставу:

1. Др Томислав Шекара, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
2. Др Ненад Филиповић, редовни професор, Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука,
3. Др Лазар Сарановац, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
4. Др Вељко Папић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
5. Др Ана Гавровска, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

За ментора је одређена др Надица Миљковић, редовни професор, запослена на Универзитету у Београду – Електротехничком факултету.

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације одржана је 26.8.2024. године на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду уз присуство свих чланова Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације. Комисија је једногласно закључила да је кандидат Илија Танасковић добио оцену „задовољно”. Додатно, на усменој одбрани је одлучено да се назив теме докторске дисертације преформулише из „Развој метода за карактеризацију кардиографских сигнала” у „Карактеризација кардиографских сигнала методама статистичке анализе и машинског учења” уз сагласност ментора и свих чланова Комисије.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета, Универзитета у Београду је на 900. седници, одржаној 10.9.2024. године, усвојило Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације (одлука бр. 1575/34 од 10.9.2024. године). Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на Одлуку Наставно-научног већа Електротехничког факултета, Универзитета у Београду о прихватању теме докторске дисертације Илије Танасковића, под називом „Карактеризација кардиографских сигнала методама статистичке анализе и машинског учења” и одређивања др Надице Миљковић, редовног професора Електротехничког факултета, Универзитета у Београду за ментора докторске дисертације (одлука бр. 61206-3866/2-24 од 21.10.2024. године).

Кандидат је 20.3.2026. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену. Наставно-научно веће Електротехничког факултета, Универзитета у Београду је на својој седници бр. 928. одржаној 21.4.2026. године именовало Комисију за оцену докторске дисертације (одлуком бр. 777/24 од 21.4.2026.) у следећем саставу:

1. Др Томислав Шекара, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
2. Др Вељко Папић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
3. Др Ненад Филиповић, редовни професор, Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука,
4. Др Ана Гавровска, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
5. Др Љиљана Б. Лазаревић Валерјев, научни саветник, Институт за психологију, Универзитет у Београду – Филозофски факултет.

Провера оригиналности Дисертације је извршена на основу Правилника о поступку провере оригиналности докторске дисертације, које се бране на Универзитету у Београду и на основу Извештаја из програма *iThenticate* је констатовано подударане од 12%. Наведени степен сличности у великој мери је последица тога, да је списак референци ушао у рачунање индекса сличности, а преостали степен сличности потиче од различитих термина – што је све у складу са чланом 9. Правилника о поступку провере оригиналности докторске дисертације, које се бране на Универзитету у Београду. У складу са тим, Комисија је заузела став да теза представља оригинални научни рад кандидата Илије Танасковића.

## 1.2. Научна област дисертације

Истраживање приказано у Дисертацији припада области Техничке науке – Електротехника за коју је Електротехнички факултет матичан, а обухвата теме из биомедицинског инжењерства и обраде сигнала. Дисертација се бави карактеризацијом кардиографских сигнала, односно кардиограма, при чему су остварени и приказани научни доприноси у сваком од кључних корака обраде: претпроцесирању са циљем елиминације шума, издвајању информације од интереса и методама одлучивања, односно алгоритмима за доношење одлука. Конкретно, рад обухвата развој робусних алгоритама за филтрирање кардиографских сигнала у условима

неповољног односа сигнал-шум, издвајање временских обележја за карактеризацију кардиограма, примену статистичке анализе за поређење перформанси различитих скупова обележја, као и примену модела машинског учења за доношење одлука у задацима биометријске идентификације, уз очување могућности тумачења резултата модела, тј. интерпретабилности (енг. *interpretability*) и могућности објашњења принципа рада, тј. објашњивости (енг. *explainability*) читавог поступка.

Ментор, др Надица Миљковић, редовни професор, поседује одговарајуће научне и стручне компетенције за вођење ове докторске дисертације. Њена стручност је потврђена публикацијама које се првенствено односе на анализу биомедицинских сигнала. Професорка Миљковић има научноистраживачко искуство у раду са кардиограмима, као и са другим биомедицинским сигнаlima и сликама. Компетенције проф. Миљковић се огледају и у дугогодишњој наставној делатности на свим нивоима студија (основне, мастер и докторске академске студије), чиме се у потпуности покрива научна област Дисертације. Ови предмети обухватају широк спектар тема, од клиничке инструментације и развоја мерних система заснованих на примени рачунара, до савремених метода анализе електрофизиолошких сигнала.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Илија Танасковић је рођен 2. децембра 1997. године у Чачку. Основну школу и Гимназију је завршио у Чачку као носилац дипломе „Вук Караџић”. Основне студије на Универзитету у Београду - Електротехничком факултету је уписао 2016. године и дипломирао 2020. године са просеком 9,20 на смеру Сигнали и системи. Дипломски рад под насловом: „Анализа мишићне активности са циљем откривања замора мишића надлактице” је одбранио под менторством др Надице Миљковић, редовног професора. Мастер академске студије је уписао 2020. године на Универзитету у Београду - Електротехничком факултету, на смеру Сигнали и системи и завршио наредне године са просечном оценом 10,00 и са одбрањеним мастер радом под насловом „Методе анализе биосигнала за детекцију срчаног ритма фетуса” под менторством др Надице Миљковић, редовног професора.

Докторске академске студије, уписао је 2021. године на Универзитету у Београду - Електротехничком факултету, на смеру Управљање системима и обрада сигнала, где је положио све испите са просечном оценом 10,00. У свом научноистраживачком раду, бавио се анализом биомедицинских сигнала и слика, примењујући напредне методе обраде сигнала, алгоритме машинског учења и статистичку анализу. Посебан акценат истраживања Илије Танасковића је на карактеризацији кардиографских сигнала, са циљем да се резултати истраживања учине применљивим у клиничком окружењу и системима за праћење здравственог стања у свакодневном животу.

Од 1. априла 2021. године до 31. марта 2022. године, Илија Танасковић је радио у компанији *Abbott Medical Balkan d.o.o.* на позицији техничког консултанта за уградњу имплантибилних пејсмејкера и кардиовертер дефибрилатора у Београду. Од 1. априла 2022. године је запослен у Истраживачко-развојном институту за вештачку интелигенцију Србије, где је 7. маја 2022. изабран у звање истраживач-сарадник. У институту, Илија Танасковић је ангажован у групи „Вештачка интелигенција у здравству и биомедицини”, где се бави развојем алгоритама заснованих на методама машинског учења за подршку у дијагностици и доношењу одлука. Његов рад обухвата примену метода машинског учења и анализе биомедицинских сигнала, слика и података из електронских здравствених регистара, као и истраживања усмерена на идентификацију предиктивних маркера у циљу бољег разумевања болести, процене ризика и унапређења персонализованог приступа у медицини. Такође, у периоду од јуна 2022. до марта 2023. године, био је ангажован у компанији *Mainflux Labs d.o.o.* као консултант на истраживању пристрасности (енг. *bias*) у федеративним системима машинског учења на пројекту програма Хоризонт 2020 (*Horizon 2020*).

Илија Танасковић је аутор четири рада у часописима са *SCI* листе (од којих је на два рада први аутор), једног рада у часопису од националног значаја и 10 радова са међународних

конференција. Такође, члан је организационог одбора конференције „Примена слободног софтвера и отвореног хардвера” (ПССОХ) и члан је Заједнице отворене науке Србије (OSCS, енг. *Open Science Community Serbia*).

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Карактеризација кардиографских сигнала методама статистичке анализе и машинског учења” је написана на српском језику на 192 странице и садржи 89 слика, 20 табела и 266 референци наведених по редоследу појављивања у дисертацији. Структура дисертације обухвата следеће целине:

1. Увод
2. Претпроцесирање кардиограма
3. Издвајање информација од интереса из кардиограма
4. Алгоритми за доношење одлука
5. Закључак

Прилог А – Протоколи за мерење механичких кардиограма

Прилог Б – План управљања подацима у оквиру Докторске дисертације

Прилог В – План управљања софтвером у оквиру Докторске дисертације

Прилог Г – Контролна листа за употребу модела машинског учења у медицини

Текст Дисертације садржи и: 1) насловне стране на српском и енглеском језику, 2) податке о ментору и члановима Комисије за оцену докторске дисертације, 3) захвалницу, 4) сажетак на српском и енглеском језику, 5) садржај, 6) листу слика, 7) листу табела, 8) предговор, 9) списак референци, 10) биографију кандидата, 11) изјаву о ауторству, 12) изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и 13) изјаву о коришћењу.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

**1.0 Увод** – У првом поглављу дата је дефиниција кардиографије, као и краћи преглед примене кардиографских сигнала у савременом биомедицинском инжењерству. Поглавље обухвата и преглед електричних и механичких сигнала срца, са посебним освртом на електрокардиографски (ЕКГ) сигнал, импедансно кардиографски (ИКГ) сигнал и абдоминални ЕКГ (аЕКГ) сигнал. Описане су основне карактеристике ових сигнала и могућности примене у клиничкој пракси, истраживању и развоју. Поред тога, приказани су инструментација и протоколи за мерење електричних и механичких кардиограма. На крају поглавља, дат је кратак осврт на базу података *CardioPRINT*, која представља један од доприноса Дисертације и која је коришћена у оквиру истраживања приказаних у Дисертацији.

**2.0 Претпроцесирање кардиограма** – У другом поглављу су разматране методе за претпроцесирање кардиограма са циљем ефикасне елиминације шума. На почетку поглавља су описане карактеристике појединих врста кардиограма, као и најчешћи облици шума и артефаката, који утичу на њихов квалитет, при чему су посебно издвојени физиолошки и нефизиолошки шумови. Затим су приказани параметри за процену квалитета сигнала, са нагласком на специјализоване параметре за процену квалитета аЕКГ сигнала. У наставку су описане методе дигиталног филтрирања, посебно на примеру ЕКГ и ИКГ сигнала, као и преглед напредних метода претпроцесирања у случају преклапања сигнала и шума у фреквенцијском домену. Посебна целина овог поглавља је посвећена модификованом Пан-Томпкинсу (мПТ, енг. *Pan-Tompkins*) алгоритму, који представља један од научних доприноса Дисертације и користи се за процену срчаног ритма фетуса из аЕКГ сигнала на бази оптимизације реда разломљеног извода (у даљем тексту: фракциони извод, као термин устаљен у пракси) и ширине усредњавања сигнала на покретном прозору (енг. *Moving Average* – *MA* филтар). На крају поглавља приказани су резултати и дискусија са посебним освртом на даљу примену предложеног мПТ алгоритма.

**3.0 Издвајање информација од интереса из кардиограма** – У првом делу поглавља описан је поступак одређивања карактеристичних тачака, тј. делинеације кардиограма, најпре на примеру ЕКГ и ИКГ сигнала, а затим и на примеру других кардиограма. Разматране су постојеће методе за издвајање обележја из кардиограма, где је најпре дат преглед различитих домена обележја, укључујући обележја у временском, фреквенцијском, временско-фреквенцијском домену, домену декомпозиције, као и обележја заснована на вештачким неуралним мрежама. Потом је формиран кохерентан методолошки оквир који омогућава објективну анализу и поређење различитих стратегија за карактеризацију кардиографских сигнала. Истакнут допринос представља дефинисање два специфична скупа временских обележја издвојених из фидуцијалних, тј. карактеристичних тачака, који су директно коришћени за развој модела машинског учења са могућношћу тумачења резултата, у сврху поуздане биометријске идентификације појединаца.

**4.0 Алгоритми за доношење одлука** – У четвртном поглављу су приказани алгоритми за доношење одлука, које су примењене на претходно издвојене подскупове кардиографских обележја. Поглавље започиње прегледом експертских система, а затим су детаљно описане примењене методе статистичке анализе. Посебно су разматрани случајеви поређења две и више група података на конкретним примерима анализе кардиограма. Такође је приказана и крос-корелациона анализа (енг. *cross-correlation analysis*), која је коришћена за испитивање мултиколинearности унутар скупа кардиограмских обележја.

Посебна пажња у Дисертацији је посвећена методама машинског учења, при чему је ова целина подељена на два дела. Први део је фокусиран на предиктивни приступ, при чему је примарни задатак биометријска идентификација заснована на обележјима издвојеним из *CardioPRINT* базе података. Првим делом обухваћена је целовита методологија развоја — од избора модела машинског учења и евалуације перформанси до оптимизације хиперпараметара, док је робусност предложеног приступа посебно анализирана у условима различитих емоционалних стања испитаника. Други део поглавља посвећен је увиду у истраживање, са тежиштем на методама за процену значаја и одабир обележја. Предложен је ансамбл приступ за избор кардиограмских обележја, са крајњим циљем успостављања оквира машинског учења са могућношћу тумачења резултата. Такав приступ омогућава јасније тумачење и образлагање одлука модела, као и њихово директно повезивање са релевантним физиолошким феноменима, што је од кључне важности за клиничку примену. У овом делу је утицај емоција додатно испитан и на нивоу појединачних обележја применом метода статистичке анализе, чиме је заокружено испитивање стабилности предложених биометријских параметара.

**5.0 Закључак** – Пето поглавље садржи закључке истраживања у оквиру Дисертације, који су формулисани као одговори на хипотезе постављене у Предговору. На овај начин, сумирани су најважнији резултати истраживања, истакнути научни доприноси и указано је на ограничења предложених приступа. Као један од најзначајнијих доприноса ове Дисертације, представљен је методолошки оквир за анализу кардиограма, који се састоји од четири палете метода контекстуализованих у форми стабала одлучивања. Овакав приступ омогућава систематичан одабир одговарајућих метода анализе кардиографских сигнала путем низа једноставних да/не питања. Развијене палете покривају основне кораке у обради кардиограма: претпроцесирање, издвајање информација од интереса и алгоритми за доношење одлука, при чему су у оквиру сегмента доношења одлука формиране две засебне палете усмерене ка предиктивном приступу, као и увиду у истраживање. Такође су наведени и могући правци даљег истраживања у области карактеризације кардиографских сигнала, са посебним освртом на унапређење робусности, могућности тумачења резултата и практичне применљивости предложених метода.

**Прилог А** – У првом Прилогу су дати протоколи за мерење механичких кардиограма, који нису у фокусу истраживања у оквиру Дисертације. Овај прилог обухвата протоколе за мерење фонокардиограма, сеизмокардиограма и фотоплетизмограма.

**Прилог Б** – Други Прилог садржи План управљања истраживачким подацима у оквиру докторске дисертације. У њему су описани начини прикупљања, чувања, организације, дељења и дугорочног очувања података насталих током истраживања.

**Прилог В** – У трећем Прилогу је представљен је План управљања истраживачким софтвером развијеним и коришћеним у оквиру докторске дисертације. Овим прилогом су обухваћени организација програмског кода, услови коришћења, одржавање, управљање верзијама програмског кода и доступност софтверских решења насталих током истраживања.

**Прилог Г** – У последњем Прилогу, представљена је модификација контролне листе за процену решења на бази вештачке интелигенција за употребу у медицини. Овај прилог служи као допунски оквир за процену поузданости, применљивости и могућности образлагања (енг. *transparency*) предложених модела у клиничком контексту. Додатно, описани су и елементи попуњене контролне листе за истраживање биометријске идентификације, које је спроведено у оквиру ове Дисертације, чиме је омогућено објективно испитивање предложеног приступа према релевантним препорукама.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Савременост теме у првом делу Дисертације се огледа у развоју метода за потпуно неинвазивну процену феталног пулса из аЕКГ сигнала, без уношења енергије у организам труднице или плода. Такав приступ је посебно значајан, јер отвара могућност безбедног, једноставног и чешћег праћења стања фетуса (у односу на тренутно заступљену ултразвучну дијагностику), укључујући и потенцијалну примену ван строго контролисаног клиничког окружења. Оригиналност предложеног мПТ поступка се огледа у примени фракционог извода као подесивог високопропусног филтра, у комбинацији са *MA* филтром, чиме је омогућено робусно истицање феталних *QRS* комплекса у условима израженог шума. У односу на сложеније приступе, као што су методе засноване на анализи независних компоненти (енг. *Independent Component Analysis - ICA*) или метода на бази вештачких неуралних мрежа, предложени поступак је рачунски једноставнији, погоднији за хардверску реализацију и самим тим перспективан за развој преносивих система за дуготрајни надзор феталне срчане активности.

Савременост другог дела Дисертације утемељена је у разматрању кардиографских сигнала као основе за биометријску идентификацију, што је посебно значајно у условима развоја телемедицине, носивих (енг. *wearable*) уређаја и система за континуалну аутентификацију. За разлику од класичних биометријских карактеристика, кардиографске сигнале је знатно теже фалсификовати, копирати или изгубити, што им даје посебну вредност у савременим безбедносним и медицинским применама. Према доступној литератури, ово истраживање је прво које испитује ИКГ сигнал као самосталан биометријски модалитет, као и у комбинацији са ЕКГ сигналом у оквиру мултимодалног приступа, чиме се истовремено обухватају електрична и механичка активност срца. Додатна оригиналност огледа се у томе што је, према доступној литератури, по први пут систематски испитан утицај емоције беса и на предиктивне перформансе биометријског система и на ниво појединачних обележја, чиме у Дисертацији представљен важан корак ка разумевању интеракције човек–рачунар и развоју емоционално осетљивих, односно афективних, рачунарских система.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације, кандидат је проучио и користио обимну, актуелну и тематски разноврсну литературу, која обухвата укупно 266 библиографских јединица. Коришћена литература укључује фундаменталне књиге и монографије из области кардиологије, биомедицинске инструментације и обраде сигнала, које су послужиле као теоријска и методолошка основа истраживања. Поред тога, анализирани су бројни научни радови из области абдоминалне и феталне електрокардиографије, који су представљали полазиште за развој метода за неинвазивну процену феталног пулса.

Листа референци обухвата и литературу из области биометрије, како општу, тако и литературу посвећену биометријској идентификацији на основу кардиографских сигнала, укључујући ЕКГ сигнале и сродне модалитете. Поред тога, коришћени су и радови који разматрају примену кардиограма у другим областима, нарочито у дијагностици, праћењу физиолошких стања и анализи кардиоваскуларне функције.

На основу детаљног увида у досадашња истраживања и актуелне правце развоја области, кандидат је поставио јасну и добро утемељену основу за своје истраживање. Квалитетан преглед литературе омогућио је прецизно издвајање отворених питања и недовољно истражених аспеката проблема, чиме су циљеви и научни доприноси дисертације јасно образложени.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања, у оквиру ове докторске дисертације, укључује следеће активности:

- формулисање полазних хипотеза и дефинисање методолошког оквира истраживања;
- полуаутоматско означавање *QRS* комплекса труднице (*mQRS*) у аЕКГ сигнаlima, у циљу формирања поуздане референтне основе за даљу анализу;
- развој нових и примена постојећих параметара за квантитативну процену квалитета аЕКГ сигнала, ради издвајања сегмената сигнала најбољег квалитета;
- развој, оптимизација и провера успешности мПТ алгоритма за процену феталног пулса;
- припрема и дељење базе података *CardioPRINT* за издвајање кардиографских обележја и спровођење биометријске идентификације;
- примена одговарајућих метода за одређивање карактеристичних тачака кардиографских сигнала и издвајање обележја, те формирање скупа обележја за потребе биометријске идентификације;
- развој и евалуација модела машинског учења за биометријску идентификацију, укључујући примену процедуре за избор најбољег модела машинског учења и оптимизацију хиперпараметара;
- испитивање различитих подскупова обележја и анализа утицаја емоционалних стања на перформансе система;
- спровођење одабира и анализе значаја обележја ради идентификације најважнијих биометријских маркера – кардиограмских индикатора јединствених индивидуалних карактеристика;
- спровођење статистичке анализе у циљу идентификације обележја, која су статистички значајно осетљива на промене емоционалног стања.

Комисија сматра да примењене научне методе чине заокружен и добро утемељен методолошки приступ. Начин на који су методе повезане и употребљене указује да су оне правилно одабране у односу на циљеве дисертације и природу анализираних кардиографских сигнала.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати ове Дисертације имају непосредну научну и потенцијалну практичну примену. Предложени мПТ алгоритам представља основу за развој једноставних и носивих система за неинвазивно праћење феталног пулса, укључујући и примене ван клиничког окружења, што би потенцијално довело до испитивања феталног пулса у релативно дугим временским интервалима (налик Холтер мерење у трајању од 24 сата). Резултати у области испитивања индивидуалних карактеристика кардиографских сигнала, могу се применити у системима за биометријску идентификацију и указују на могућност примене у системима континуалне аутентификације, посебно у телемедицини и на носивим платформама. Поред тога, добијени

налази о утицају емоционалних стања на кардиографска обележја могу бити од значаја за даљи развој система за интеракцију човек–рачунар, као и за развој афективног рачунарства. На крају, допринос основним истраживањима се огледа и у томе да су резултати Дисертације указали на постојање кардиографских обележја, која су неосетљива на промену емоција, као и да њихова јединственост највероватније потиче од анатомских карактеристика срца, што је од значаја и за шира истраживања у медицини и физиологији. Посебна вредност ових резултата што су добијени у оквиру приступа са могућношћу тумачења резултата модела, који није ограничен само на биометријску примену, већ се може прилагодити и другим задацима анализе кардиограма, као што је дијагностика, где може допринети већем поверењу медицинског особља у моделе машинског учења кроз јасније разумевање основе одлука које доноси систем.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледа Дисертације, Комисија оцењује да је кандидат Илија Танасковић показао висок степен оспособљености за самостални научноистраживачки рад. Кандидат је темељно проучио фундаменталну инжењерску и медицинску литературу из области кардиограма, овладао постојећим концептима њихове анализе и критички сагледао њихова ограничења, што му је омогућило да у оквиру Дисертације предложи унапређења у свим кључним корацима обраде, од претпроцесирања, преко издвајања информација од интереса, до поступка доношења одлука над издвојеним обележјима. Посебно се истиче то што су предложени приступи, иако развијени и испитани на конкретним задацима, постављени довољно опште да се уз минимална прилагођавања могу применити и у другим задацима анализе кардиограма. На основу таквог методолошког приступа, као и начина на који су резултати тумачени и повезани са ширим контекстом области, Комисија закључује да кандидат поседује научну зрелост и самосталност неопходну за даљи успешан научноистраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Најзначајнији научни доприноси који су остварени у оквиру ове Дисертације огледају се у следећем:

- развој мПТ алгоритма за неинвазивну процену пулса фетуса из аЕКГ сигнала применом фракционог извода и *MA* филтра, чиме је предложено рачунски једноставно и ефикасно решење;
- предлог нових и модификација постојећих параметара за процену квалитета аЕКГ сигнала, прилагођених специфичностима овог типа мерења и потребама поуздане процене феталне срчане активности;
- развој методологије за биометријску идентификацију, која је заснована на кардиографским сигналима и која обухвата одређивање карактеристичних тачака сигнала, формирање скупа кардиограмских обележја и примену метода машинског учења и статистичке анализе;
- испитивање импедансне кардиографије као самосталног биометријског модалитета, као и у комбинацији са електрокардиографским сигналом у оквиру мултимодалног приступа, чиме је проширен скуп обележја кардиографских сигнала, обухвативши електричну и механичку активност срца;
- утврђивање утицаја емоције беса на кардиографске параметре и успешност идентификације испитаника на нивоу предиктивних перформанси система и на нивоу појединачних обележја, чиме је остварен допринос истраживања стабилности кардиографских параметара у условима емоционалних промена;
- успостављање оквира са могућношћу тумачења резултата за анализу идентификацију испитаника, заснованог на методама за избор и процену значаја обележја, са циљем

идентификације физиолошки значајних кардиографских параметара, који највише доприносе индивидуалним разликама;

- дискусија о кардиографским обележјима која представљају стабилне носиоце индивидуалних разлика, као и о обележјима осетљивим на емоционалне промене са становишта њиховог физиолошког значења, уз разматрање могућности примене добијених сазнања и изван оквира биометријске идентификације;
- дефинисање прототипа генерализованог оквира за анализу кардиограма, организованог кроз четири палете метода: претпроцесирање, издвајање информација од интереса, алгоритми за доношење одлука (које обухвата експертске системе, статистичку анализу и машинско учење) и увид у примену машинског учења са тумачењем резултата, чиме је успостављен методолошки костур за систематично вођење анализе кардиографских сигнала на основу низа једноставних одлука у складу са циљем истраживања;
- јавно дељење *CardioPRINT* скупа података и пратећег истраживачког софтвера, чиме се доприноси репродуцибилности истраживања и омогућава употреба у будућим истраживањима шире научне заједнице.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу увида у садржај Дисертације, постављене хипотезе, циљеве истраживања и остварене резултате, Комисија констатује да је кандидат успешно одговорио на кључна истраживачка питања докторске дисертације. Научни доприноси наведени у тачки 4.1 представљају унапређење постојећег стања у области анализе кардиографских сигнала, јер обухватају развој нових методолошких решења прилагођених конкретним проблемима претпроцесирања, издвајања информација од интереса и доношење одлука над кардиограмима, уз посебан акценат на одабране методе статистичке анализе и машинског учења. Посебна вредност дисертације огледа се у дефинисању генерализованог оквира за анализу кардиограма, заснованог на палетама метода које обухватају претпроцесирање, издвајање информација од интереса и доношење одлука, као и у увођењу тумачења резултата у алгоритме за доношење одлука, чиме је показано да је предложена методологија применљива и изван две приказане студије, уз минимална прилагођавања другим биомедицинским сигналима и задацима.

У области неинвазивне процене феталног пулса, Дисертација доноси унапређење кроз развој мПТ алгоритма и нових параметара за процену квалитета абдоминалног ЕКГ сигнала, чиме је предложено рачунски једноставно и практично решење за анализу сигнала у условима израженог шума. Почетни доказ концепта (енг. *proof of concept*) мПТ алгоритма, којим је показано да се подешавањем реда фракционог извода може успешно спровести детекција феталног *QRS* комплекса, а самим тим и процени феталног пулса, представљен је у саопштењу са међународног скупа штампаног у целини из 2022. године (М33). Потпуно развијен прототип методе, са двостепеном оптимизацијом реда фракционог извода и ширине *MA* филтра на већем скупу података, приказан је и у раду објављеном у међународном часопису (М22).

У области биометријске идентификације, Дисертација доноси унапређење кроз систематско вредновање ЕКГ и ИКГ сигнала као појединачних и мултимодалних биометријских извора, уз избор одговарајућих модела, оптимизацију хиперпараметара и процену утицаја емоције беса на предиктивне перформансе система. Ови резултати су представљени анализом сигнала из *CardioPRINT* базе и објављени су у међународном часопису (М21а). Додатни научни искорак остварен је кроз увид у истраживање, у оквиру кога је дефинисан проширени скуп кардиографских обележја и успостављен оквир за тумачење резултата за идентификацију стабилних биометријских маркера, као и за анализу утицаја емоција на нивоу појединачних обележја. Доказ концепта овог приступа објављен је у саопштењу са међународног скупа штампаног у изводу из 2025. године (М34), док је детаљан приказ истраживања представљен у облику препринта, а планирано је његово објављивање.

Додатан истраживачки допринос кандидата огледа се у испитивању одабира обележја за класификацију биомедицинских слика применом комбинованог приступа, који обухвата

претпроцесирање, метода за повећање скупа података (енг. *data augmentation*), статистичку анализу и машинско учење. На тај начин је показано да се унапређење класификационих перформанси не заснива само на избору модела, већ и на пажљивој припреми података и избору репрезентативних обележја. Овај резултат представљен је у саопштењу са међународног скупа, штампаном у изводу, из 2024. године (М34).

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Према члану 45. Правилника о докторским студијама Универзитета у Београду – Електротехничког факултета, кандидат је остварио 7,86 ефективних *EBM20* бодова, на основу једног рада категорије М22 са укупно 2 аутора и једног рада категорије М21а са укупно 7 аутора, при чему је на оба рада кандидат први аутор.

Основни резултати истраживања приказаног у овој Дисертацији публиковани су у следећим радовима:

#### Категорија М21а:

1. **I. Tanasković**, L. B. Lazarević, G. Knežević, N. Milosavljević, O. Dubljević, B. Vjekojević, N. Miljković, *CardioPRINT: Biometric identification based on the individual characteristics derived from the cardiogram*, Expert Systems with Applications, vol. 265, pp. 126018, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.126018> (ISSN: 0957-4174, IF2024 = 7.8)

#### Категорија М22:

1. **I. Tanasković**, N. Miljković, *A new algorithm for fetal heart rate detection: Fractional order calculus approach*, Medical Engineering & Physics, vol. 118, pp. 104007, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2023.104007> (ISSN: 1350-4533, IF2023 = 1.7)

#### Категорија М33:

1. **I. Tanasković**, N. Miljković, *Fractional order calculus for fetal pulse detection*, Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), pp. 1-5, IEEE, Jahorina, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2022, ISBN 978-1-6654-3778-3. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH53737.2022.9751327>

#### Категорија М34:

1. **I. Tanasković**, L. B. Lazarević, G. Knežević, N. Milosavljević, O. Dubljević, B. Vjekojević, N. Miljković, *Unlocking cardiographic-based biometric potential: Insights from feature selection*, Book of Abstracts for The Fourth Serbian International Conference on Applied Artificial Intelligence (SICAAI), pp. 47, University of Kragujevac, Zlatibor, Serbia, 2025, ISBN 978-86-81037-88-1
2. Đ. D. Nešković, **I. Tanasković**, N. Miljković, *Feature selection for lying posture classification*, Book of Abstracts of The Third Serbian International Conference on Applied Artificial Intelligence (SICAAI), pp. 78-79, University of Kragujevac, Kragujevac, Serbia, 2024, ISBN 978-86-81037-79-9

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

Докторска дисертација под називом „Карактеризација кардиографских сигнала методама статистичке анализе и машинског учења” (енг. *Characterization of cardiographic signals using methods of statistical analysis and machine learning*) кандидата Илије Танасковића представља оригинално и заокружено научноистраживачко дело у области биомедицинског инжењерства и обраде сигнала. У Дисертацији су предложене и испитане нове методе за претпроцесирање, издвајање информација од интереса и анализу кардиограма, са посебним освртом на неинвазивну процену феталног пулса и биометријску идентификацију засновану на ЕКГ и ИКГ сигналима. Посебну вредност рада представља увођење оквира за тумачење резултата услед примене машинског учења код анализе кардиографских обележја, као и испитивање

утицаја емоција на стабилност индивидуалних карактеристика применом метода статистичке анализе, које се могу користити као биометријски параметри.

Остварени резултати представљају значајан допринос у области обраде биомедицинских сигнала, а и имају потенцијалну примену у пракси, пре свега у домену неинвазивног феталног мониторинга, телемедицине и континуалне аутентификације. Предложени оквир за тумачење резултата модела машинског учења директно доприноси повећању поузданости и медицинских система и лакшем образлагању донесених одлука. Даље, развијена методологија отвара врата за будућу хардверску реализацију ових алгоритама на носивим (енг. *wearable*) уређајима, док развој и коришћење отворене *CardioPRINT* базе података, као и подељених програмских кодова, представља трајан ресурс од значаја за ширу научноистраживачку заједницу.

Израдом Дисертације, Кандидат је показао да поседује висок ниво техничке и истраживачке зрелости, као и способности да самостално проучава релевантну литературу, развија и имплементира сложене алгоритме, примењује одговарајуће научне приступе и добијене налазе тумачи на јасан и аргументован начин. На основу свега наведеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду – Електротехничког факултета да се Дисертација под називом „Карактеризација кардиографских сигнала методама статистичке анализе и машинског учења” кандидата Илије Танасковића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 12.5.2026. године


#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



Др Томислав Шекара, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



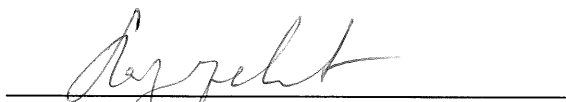
Др Вељко Папић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Ненад Филиповић, редовни професор  
Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука



Др Ана Гавровска, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Љиљана Б. Лазаревић Валерјев, научни саветник  
Институт за психологију, Универзитет у Београду – Филозофски факултет