

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Марије Новичић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 1120/16 од 27.6.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену дисертације кандидаткиње Марије Новичић под насловом

Препознавање когнитивних компоненти у електроенцефалографским одзивима на соматосензорне електричне стимулусе методама машинског учења

(енг. Detection of cognitive components in electroencephalographic responses to somatosensory electrical stimuli using machine learning methods)

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Марија Новичић је школске 2019/2020. године уписала докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, модул „Управљање системима и обрада сигнала“. Током студија је положила све испите са просечном оценом 10,00 и испунила све обавезе везане за студијски истраживачки рад предвиђене планом и програмом.

Кандидаткиња је 20.06.2024. поднела пријаву теме за израду докторске дисертације под насловом „Препознавање когнитивних компоненти у електроенцефалографским одзивима на соматосензорне електричне стимулусе методама машинског учења“. Комисија за студије трећег степена је на својој седници 25.06.2024. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације упутила Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је на својој седници бр. 899 одржаној 02.07.2024. године именovalo Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације (одлука број 1275/22 од 02.07.2024. године) у следећем саставу:

1. др Милица Јанковић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Оливера Ђорђевић, доцент, Универзитет у Београду – Медицински факултет
3. др Бошко Николић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

4. др Андреј Савић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
5. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

За ментора докторске дисертације је предложен др Горан Квашчев, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације кандидаткиње је одржана на Електротехничком факултету у Београду дана 10.07.2024. пред комисијом у саставу др Милица Јанковић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, др Оливера Ђорђевић, доцент, Универзитет у Београду – Медицински факултет, др Бошко Николић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, др Андреј Савић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет и др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет. Комисија је једногласно закључила да је кандидаткиња Марија Новичић на јавној усменој одбрани предложене теме добила оцену „задовољила“ и поднела Извештај за оцену научне заснованости теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на својој седници бр. 900 одржаној 10.09.2024. године усвојило Извештај за оцену научне заснованости теме докторске дисертације (одлука број 1575/32 од 10.09.2024. године). Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је дало сагласност на одлуку Наставно-научног већа Електротехничког факултета о прихватању докторске дисертације Марије Новичић под насловом „Препознавање когнитивних компоненти у електроенцефалографским одзивима на соматосензорне електричне стимулусе методама машинског учења“ и одређивању др Горана Квашчева, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду за ментора докторске дисертације (одлука број 61206-3867/2-24 од 21.10.2024. године).

Кандидаткиња је 26.05.2025. предала урађену докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена је на својој седници 03.06.2025. године потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на својој седници бр. 911 одржаној 27.06.2025. године именovalo Комисију за оцену докторске дисертације (одлука број 1120/16 од 27.6.2025. године) у следећем саставу:

1. др Милица Јанковић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Бошко Николић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
3. др Оливера Ђорђевић, доцент, Универзитет у Београду – Медицински факултет
4. др Андреј Савић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
5. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Провера оригиналности докторске дисертације је извршена на основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и на основу извештаја из програма *iThenticate* је констатовано подударање текста од 3%, као последица цитата, личних имена, наставних и истраживачких звања, библиографских података о коришћеној литератури и сличних општих места и података, као и претходно публикованих резултата докторантових истраживања, који су проистекли из њене дисертације. У складу с

тим, став Комисије је да докторска дисертација представља оригинални научни рад кандидаткиње Марије Новичић.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Техничке науке – Електротехника и рачунарство за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. У ужем смислу, дисертације припада научној области биомедицинско инжењерство. Прецизније, у докторској дисертацији су описане иновативне методе за изазивање и детекцију промена у могућој активности насталих електричном стимулацијом мешовитих нерава подлактице, у циљу детекције пажње испитаника.

За ментора докторске дисертације одређен је др Горан Квашчев, редовни професор на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду. Ментор има вишегодишње истраживачко и наставно искуство везано за научне области којима припада докторска дисертације кандидаткиње.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Марија Новичић је рођена 14.03.1994. године у Београду. Основну школу и природно-математички смер Земунске гимназије завршила је у Београду. Електротехнички факултет у Београду уписала је 2013. године, где је дипломирала 2017. године на одсеку Сигнали и системи са просечном оценом 9.31/10.00. Дипломски рад на тему "Класификација покрета руке на основу кинематских параметара применом неуралних мрежа" одбранила је под менторством проф. др Милице Јанковић. Током основних студија је учествовала на такмичењу Електријада 2016. и 2017. године, на којима је из области Аутоматика заузела треће, односно друго место у екипној конкуренцији. Године 2017. освојила је награду за најбољи дипломски рад на Електротехничком факултету у Београду коју додељује организација ЕТФ БАФА. Мастер академске студије је завршила 2019. године на одсеку Сигнали и системи са просечном оценом 10.00/10.00. Мастер рад на тему „*Gait analysis of transfemoral amputees with and without feedback*“ одбранила је под менторством проф. др Милице Јанковић, у сарадњи са Институтом "Михаило Пупин" у Београду, у оквиру пројекта *European Research Council* (ERC StG 759998) гранта „*FeelAgain*“. У октобру 2019. године уписује докторске академске студије на Електротехничком факултету где је положила све предмете предвиђене студијским програмом са просечном оценом 10.0/10.0. Марија се током докторских студија фокусира на област неуралног инжењерства, а посебно истраживање у области мозак рачунар (*Brain Computer Interface, BCI*) система заснованих на електричној стимулацији и соматосензорним евоцираним потенцијалима.

Децембра 2017. године се запошљава као сарадник у настави при Катедри за Сигнале и Системе на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. У звање асистента изабрана је у фебруару 2020. године. Ангажована је на 13 предмета на основним и мастер студијама.

Коаутор је уџбеника који у потпуности покрива градиво предмета Практикум из мерно-аквизиционих система: М. Јанковић, М. Барјактаровић, М. Новичић, П. Атанасијевић, Практикум из мерно-аквизиционих система (електронско издање), Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, 2019, ISBN 978 – 86 – 7225 – 073 – 2. Уџбеник је одобрен као електронски уџбеник на 845. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду одржаној 12.11.2019. године.

Марија Новичић је аутор 5 радова у часописима са SCI листе, 3 рада у часописима ван SCI листе, 7 радова са међународних конференција, 1 рада са домаће конференције и 2 уџбеника. Има и једно пријављено техничко решење.

Један је од аутора рада на конференцији IcEtran 2020 који је добио награду за најбољи рад младог аутора под називом "*Feasibility Test of Activity Index Summary Metric in Human Hand Activity Recognition*". Исту награду добија и као коаутор рада "*Detection of LR-DDoS attack based on hybrid neural networks CNN-LSTM and CNN-autoencoder*" 2024. године.

Марија Новичић је ангажована као учесник на неколико научних и међународних пројеката из области биомедицинског инжењерства и вештачке интелигенције.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Препознавање когнитивних компоненти у електроенцефалографским одзивима на соматосензорне електричне стимулусе методама машинског учења“ написана је на српском језику на 100 страница ћириличним писмом и садржи 53 слике, 14 табела и 133 референце наведених по редоследу појављивања у дисертацији. Дисертације обухвата следећих девет поглавља:

1. Увод у *BCI* системе
2. Експериментална поставка
3. Апликација за контролу *BCI* система
4. Анализа сигнала
5. Примена метода машинског учења
6. *sERP* као контролни сигнал *BCI* система
7. Детекција пажње помоћу *sERP* сигнала
8. Клиничка студија изводљивости *online BCI* контроле
9. Закључак

На почетку дисертације су насловна страна на српском и енглеском језику, подаци о ментору и члановима комисије, захвалница на српском језику, сажетак дисертације на српском и енглеском језику, садржај и предговор. Након последњег поглавља се налазе списак слика, списак табела, списак скраћеница и списак референци. На крају тезе се налазе биографија кандидаткиње, изјава о ауторству, изјава о истоветности штампане и електронске верзије и изјава о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дат је увод у мозак-рачунар интерфејс системе (енг. *Brain Computer Interface, BCI*) системе. Поглавље обухвата кратак историјски преглед развоја *BCI* технологија, опис основних компоненти и структуре *BCI* система, као и класификацију ових система према различитим критеријумима. Описана је неинвазивна метода за мерење могуће активности (електроенцефалографија, EEG), која представља један од најчешће коришћених приступа у овом пољу. Поред тога, представљени су различити модалитети контроле који се користе при интеракцији мозга и рачунара, стављајући посебан акценат са соматосензорне потенцијале изазване догађајем (*Somatosensory Event-Related Potentials, sERP*).

У другом поглављу описана је експериментална поставка која је развијена за потребе истраживања у овој докторској дисертацији. Представљена је детаљна архитектура *BCI* система, укључујући систем за електричну стимулацију и систем за аквизицију електрофизиолошких сигнала. Посебна пажња посвећена је детаљном опису процедуре извођења два типа експеримената за изазивање *sERP* одговора применом електричне стимулације. Поред тога, дата је структура и садржај база података које су прикупљене током студије.

Треће поглавље посвећено је опису апликације за контролу *BCI* система која је развијена у оквиру ове докторске дисертације. У секцији 3.1 приказан је део апликације намењен

подешавању параметара *BCI* система, укључујући подешавање електричног стимулатора, аквизиције и експеримента. Затим, у секцији 3.2, описан је део апликације за прикупљање података који ће бити коришћени у каснијој анализи. Секција 3.3 посвећена је делу апликације који врши припрему података за класификацију, укључујући процесе предобраде сигнала, издвајања обележја и тренинг класификатора. У секцији 3.4 представљен је модул за класификацију пажње у реалном времену. На крају поглавља, у секцији 3.5, приказан је начин на који апликација омогућава комуникацију са испитаницима, путем приказивања одговарајућих порука и инструкција током извођења експеримента.

У четвртном поглављу дат је детаљан преглед корака у анализи сигнала. У секцији 4.1 појединачно су објашњени кораци предобраде: филтрирање сигнала, издвајање епоха, корекција помераја базне линије, одбацивање епоха са артефактима, децимација сигнала и усредњавање епоха. Затим је у секцији 4.2 приказан поступак детекције карактеристичних пикова *sERP* сигнала и издвајања параметара. Описан је поступак статистичке анализе ради утврђивања постојања значајне разлике у морфологији *sERP* сигнала за различите експерименталне услове. На крају поглавља, у секцији 4.3, описан је поступак издвајања обележја *sERP* сигнала у циљу препознавања когнитивних компоненти за детекцију пажње испитаника, при чему су представљена два различита приступа: једноканални (издвајање обележја из сваког *EEG* канала засебно) и вишеканални приступ (заједничко издвајање обележја из више канала).

Пето поглавље пружа теоријски преглед алгоритама машинског учења који се користе у овој докторској дисертацији. Поред теоријске основе, описан је и поступак имплементације, оптимизације хиперпараметара и евалуације перформанси класификатора.

У шестом поглављу приказан је утицај задатка просторне пажње на морфологију *sERP* сигнала за исту локацију електричне стимулације. Представљени су резултати статистичке анализе издвојених параметара карактеристичних пикова *sERP* сигнала, за сваки *EEG* канал. Такође, одређени су временски интервали током којих постоје статистички значајне разлике у амплитудама *sERP* сигнала између посматраних експерименталних услова.

Седмо поглавље приказује резултате класификације когнитивних компоненти у циљу детекције пажње испитаника. Секција 7.1.1 садржи резултате добијене класификацијом на основу обележја издвојеним једноканалним приступом, док су у секцији 7.1.2 дати резултати класификације базирани на вишеканалном приступу. У оба приступа тестиран је утицај броја усредњених епоха и типа класификатора на перформансе детекције. На крају поглавља, у секцији 7.2, дата је дискусија у којој су анализирани и упоређени добијени резултати класификације за оба приступа издвајања обележја.

Осмо поглавље представља резултате клиничке студије изводљивости *online BCI* контроле. Приказани су резултати анализе *sERP* образаца забележених код пацијената у субакутној фази након могућег удара, током задатака усмерене тактилне пажње. Поред перформанси класификације пажње, приказани су и резултати статистичких анализа којима је испитан утицај различитих фактора (старост пацијената, локација лезије и клиничка процена) на ефикасност детекције пажње у реалном времену.

На крају дисертације дат је закључак, са наведеним хипотезама и научним доприносима дисертације (секција 9.1) и наведеним смерницама за даљи рад (секција 9.2).

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Мождани удар представља други водећи узрок инвалидитета и смртности у свету. Сензорни дефицити, укључујући и поремећаје у дискриминацији додира, јављају се код чак 50% до 80%

особа које су преживеле мождани удар. У циљу опоравка сензорних функција, осмишљене су бројне методе соматосензорног тренинга, као што су контакт са различитим текстурама, масажа, и различити задаци сензорне дискриминације. Савремена решења сензорне стимулације се заснивају на тактилној стимулацији, тј. вибрационим уређајима и електричној стимулацији. Већина претходних истраживања базирана је на методама које користе електричну соматосензорну стимулацију испод моторног прага, примењујући тзв. *bottom-up* приступ у којем се стимулацијом периферних делова тела подстиче моторичко учење и реорганизација неуронских кругова. Савремени приступи у неурорехабилитацији наглашавају потенцијал тзв. *top-down* приступа ради ефикаснијег изазивања неуропластичности кроз усмеравање пажње током рехабилитационог процеса. Мозак-рачунар интерфејс системи могу омогућити примену управо овог приступа у соматосензорној рехабилитацији путем успостављања неуралне повратне спреге. Тренутно не постоји велики број студија које примењују *BCI* за соматосензорни тренинг након можданог удара, а које су експлицитно усмерене на активацију сензорног кортекса коришћењем вољних механизма пажње. *BCI* системи засновани на *sERP* сигнаlima пружају могућност директне модулације мождане активности кроз примену когнитивних стратегија, чиме би се унапредила ефикасност сензорног тренинга.

Један од главних циљева ове докторске дисертације је идентификовање разлика у морфологији *sERP* одговора изазваних електричном стимулацијом сензорних путева подлактице у зависности од когнитивних задатака усмеравања пажње. Посебно су истражене разлике између стимулуса на који је усмерена пажња (циљани стимулус) и стимулуса који се игнорише (дистрактор), чак и када је вероватноћа њихове појаве једнака, при чему би детектоване разлике биле искључиво последица когнитивног задатка. Додатно, дисертација истражује могућност употребе ових *sERP* сигнала за контролу *BCI* система, са потенцијалном применом у асистивној неурорехабилитацији пацијената након можданог удара.

Први део дисертације је посвећен развоју студије која се примењује за изазивање електрофизиолошког одговора на соматосензорне електричне стимулусе у *BCI* систему. Циљ експеримента је изазивање соматосензорних евоцираних потенцијала током електричне стимулације сензорних путева подлактице на две локације. На овај начин су формирана четири експериментална услова која зависе од локације стимулуса и локације фокуса испитаника. Студија је спроведена у лабораторијским условима над здравим контролама, и у клиничким условима на пацијентима током опоравка од можданог удара на Клиници за рехабилитацију "Др Мирослав Зотовић".

Други део дисертације је посвећен обради ЕЕГ сигнала добијених у првом делу истраживања, и издвајању обележја која ће се даље користити за класификацију тактилне пажње. Ради утврђивања постојања морфолошких разлика између различитих експерименталних услова спроведена је статистичка анализа параметара карактеристичних пикова *sERP* одговора. Добијени резултати указују на постојање карактеристичних компоненти *sERP* одговора, које се јављају током електричне стимулације сензорних путева горњег екстремитета. Статистичка анализа је показала постојање значајних разлика у *sERP* одговорима између различитих експерименталних услова који се односе на исту локацију стимулације. Финални корак овог дела дисертација је издвајање обележја из *sERP* одговора која ће се користити у процесу класификације пажње испитаника. Први, једноканални, приступ подразумева издвајање временских инстанци *sERP* одговора за сваки ЕЕГ канал посебно. Други, вишеканални, приступ издваја најзначајнија обележја сигнала за све ЕЕГ канале заједно применом методе секвенцијалне селекције обележја унапред.

Класификација *sERP* одговора ради детекције усмерене пажње испитаника спроведена је применом два приступа у издвајању обележја - једноканалног и вишеканалног. За оба приступа тестиране су перформансе различитих метода машинског учења, као и утицај различитог броја усредњених епоха на перформансе *BCI* система. Показано је да обе методе дају адекватне резултате, тј. могуће је из ЕЕГ одзива са вероватноћом већом од 70%

детектовати пажњу испитаника на једну од стимулационих локација. Додатно је показано да вишеканални приступ даје боље перформансе класификације за мањи број усредњених *sERP* одговора, што указује на боље перформансе по погледу брзине доношења одлуке. Систем је верификован у клиничкој студији изводљивости класификације пажње у реалном времену, засноване на *top-down* приступу сензорног тренинга. Резултати показују да предложен систем изазива значајне морфолошке разлике у морфологији *sERP* сигнала и код пацијената.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је наведено 133 релевантних библиографских референци. Кандидаткиња је детаљно проучила литературу у области неурорехабилитације, посебно везано за мозак-рачунар интерфејс системе који су засновани на различитом модалитетима генерисања контролних сигнала. Кандидаткиња је показала ширину у сагледавању проблема који је предмет дисертације, цитирајући базичне радове из области докторске дисертације, али и актуелне радове објављене у престижним међународним часописима и зборницима радова међународних конференција. Списак литературе укључује и радове које је кандидаткиња публиковала као аутор верификујући научне доприносе ове дисертације.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У току истраживања које је резултовало овом докторском дисертацијом, коришћене су адекватне инжењерске и научне методе:

- дефинисање експерименталне поставке *BCI* система која ће укључивати уређај за снимање ЕЕГ сигнала и систем за електричну стимулацију, као и формирање протокола експеримента;
- развијање апликације која ће служити за аквизицију ЕЕГ сигнала, управљање електричним симулатором, визуелизацију ЕЕГ сигнала у реалном времену, и обраду и класификацију ЕЕГ сигнала у реалном времену;
- прикупљање података предложеног експеримента на здравим контролама у лабораторијским условима и код особа које су доживеле мождани удар у условима рехабилитационе установе;
- статистичку анализу карактеристика сигнала, као што су амплитуда и латенца пикова у временским интервалима карактеристичним за евоциране потенцијале, ради утврђивања постојања разлика у одзивима на електричне стимулусе које су последица усмеравања пажње на стимулисану локацију;
- издвајање обележја која ће се користити у даљем процесу класификације тактилне пажње заснованом на два приступа: једноканални приступ где се обележја издвајају за сваки ЕЕГ канал посебно, и вишеканални приступ код кога се обележја издвајају здружено за све ЕЕГ канале;
- имплементација више алгоритама машинског учења у циљу детекције пажње испитаника, на основу издвојених обележја;
- тестирање перформанси класификатора у погледу успешности класификације и брзини доношења одлуке.

3.4. Применљивост остварених резултата

Рад на докторској дисертацији је био инспирисан идејом да се превазиђу ограничења постојећих метода соматосензорног тренинга, које се заснивају на *bottom-up* приступу, применом *BCI* система који изазива промене у можданој активности кроз усмеравање пажње током рехабилитационог процеса. Методологија представљена у докторској дисертацији омогућава прецизну детекцију пажње испитаника у реалном времену, што омогућава примену предложеног система у клиничком окружењу. Предложена иновативна парадигма контроле

BCI система, заснована на соматосензорним потенцијалима изазваним електричном стимулацијом просторних локација са подједнаком вероватноћом појаве стимулуса, отвара нове могућности за истраживање у домену примене *BCI* система за неурорехабилитацију и асистивне контролне системе.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња је током докторских студија обавила опсежан преглед релевантне литературе која се бави електричном стимулацијом, карактеристикама соматосензорних потенцијала евоцираних догађајем, методама за детекцију пажње на основу промена у могућој активности, и применом *BCI* система у домену неурорехабилитације сензорних путева. Током докторских студија, показала је методичност у раду и способност да сагледа предности и недостатке постојећих решења, да самостално дефинише хипотезе истраживања и да их на систематичан начин тестира и валидира. Кандидаткиња је резултате истраживања успешно презентовала на међународној конференцији и публиковала у научним часописима. На основу свега наведеног, Комисија констатује да је кандидаткиња достигла ниво самосталности неопходан за даљи научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

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

- предлог нове експерименталне поставке за изазивање електрофизиолошких одговора на соматосензорну електричну стимулацију сензорних путева подлактице која се састоји од комерцијалног појачавача електрофизиолошких сигнала, уређаја за електричну стимулацију и рачунара са развијеном софтверском апликацијом;
- предлог софтверске апликацијом развијене у програмском окружењу MATLAB (MathWorks Inc, САД) за прикупљање, визуелизацију, анализу и класификацију ЕЕГ сигнала у реалном времену, са циљем генерисања контролног сигнала на основу детектоване пажње испитаника;
- предлог нове парадигме управљања *BCI* системом која се заснива на соматосензорним потенцијалима изазваним догађајем, који се јављају као последица електричне стимулације просторно блиских мешовитих нерава подлактице, са једнаком вероватноћом појаве циљаног стимулуса и дистрактора;
- развој методе за издвајање обележја и класификацију ЕЕГ сигнала у циљу детекције когнитивног задатка, при чему се као посебни доприноси дисертације могу навести: предлог и имплементација специфичних техника за издвајање обележја, оптимизација брзине доношења одлуке испитивањем утицаја броја усредњених епоха и систематско поређење различитих класификатора из области машинског учења. Добијене перформансе класификације су упоредиве или значајно боље од тачности метода доступних у литератури, и крећу се од 70-88.1%, за класификаторе базиране на једноканалном приступу за издвајање обележја, и од 83.9-91.3% за класификаторе базиране на вишеканалном приступу за издвајање обележја.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу увида у полазне хипотезе, циљ истраживања и остварене резултате, констатујемо да је кандидаткиња Марија Новичић успешно одговорила на сва релевантна истраживачка питања докторске дисертације. У оквиру докторске дисертације је дефинисан и валидиран систем за препознавање когнитивних компоненти у електроенцефалографским одзивима на соматосензорне електричне стимулусе методама машинског учења.

За потребе ове докторске дисертације развијена је експериментална поставка *BCI* система која укључује електрични стимулатор, уређај за прикупљање електрофизиолошких сигнала и развијену апликацију за контролу осталих уређаја. Предложени *BCI* систем је представљен на међународној конференцији 2021. године (M33).

Нова електротактилна *BCI* парадигма заснована на једнакој вероватноћи појаве стимулуса и просторно блиским локацијама стимулације је показано да је изводљива. Студија које је спроведена на здравим контролама је показала могућност успешне детекције пажње испитаника на основу обележја која су издвојена једноканалним приступом. Резултати овог истраживања су публиковани у међународном часопису 2023. године (M22).

Постојање морфолошких разлика у *sERP* одговорима који су везани за различите експерименталне услове је потврђено применом статистичких тестова. Поређење параметара као што су амплитуда и латенца пика карактеристичних *sERP* компоненти је показало постојање значајних разлика у касним компонентама. Резултати овог истраживања су публиковани у међународном часопису 2023. године (M22).

Повећање тачности класификације пажње испитаник и/или смањивање времена потребног за доношење одлуке је спроведено применом вишеканалног приступа за издвајање обележја *sERP* одговора и представља веома значајан научни допринос ове докторске дисертације. Резултати овог истраживања су публиковани у међународном часопису 2024. године (M21).

Значајан део истраживања представља и спровођење студије изводљивости у клиничким условима на пацијентима током опоравка од можданог удара. Високе тачности класификације у раду у реалном времену указују на могућност примене овог система у клиничкој пракси. Резултати овог истраживања су публиковани у међународном часопису 2024. године (M21).

4.3. Верификација научних доприноса

Главни резултати истраживања који су предмет ове тезе су објављени у радовима у међународним часописима (4 рада) и зборнику са међународне конференције (1 рад).

Категорија M21:

1. **M. Novičić**, O. Đorđević, V. Miler-Jerković, L. Konstantinović & A. M. Savić, Improving the performance of electrotactile brain–computer interface using machine learning methods on multi-channel features of somatosensory event-related potentials, *Sensors*, 24(24), pp. 1–14, 2024. DOI: 10.3390/s24248048, **IF 3.9** (ISSN 1424-8220)
2. A. M. Savić, **M. Novičić**, V. Miler-Jerković, O. Djordjević & L. Konstantinović, Electrotactile BCI for top-down somatosensory training: Clinical feasibility trial of online BCI control in sub-acute stroke patients, *Biosensors*, 14(8), pp. 1–17, 2024. DOI: 10.3390/bios14080368, **IF 5.4** (ISSN 2079-6374)

Категорија M22:

1. **M. Novičić**, A. Savić, Somatosensory Event-Related Potential as an Electrophysiological Correlate of Endogenous Spatial Tactile Attention: Prospects for Electrotactile Brain-Computer Interface for Sensory Training, *Brain sciences*, 13(5), pp. 766-782, 2023, DOI: 10.3390/brainsci13050766 **IF 3.333** (ISSN 2076-3425)
2. A. Savić, **M. Novičić**, O. Đorđević, Lj. Konstantinović, V. Miler-Jerković, Novel electrotactile brain-computer interface with somatosensory event-related potential based control, *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 17, pp. 1-11, 2023, DOI: 10.3389/fnhum.2023.1096814, **IF 3.473** (ISSN 1662-5161)

Категорија M33:

1. **M. Novičić**, V. Miler-Jerković, O. Đorđević, Lj. Konstantinović, A. Savić, Proof of concept platform of an electrotactile Brain Computer Interface, *Proceedings of the 8th IcETRAN conference*, Etno Selo Stanišići, BIH, pp. 1-4, 2021, ISBN 978-86-7466-894-8

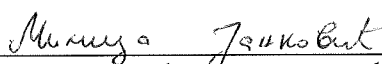
5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

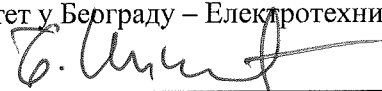
Докторска дисертација Марије Новичић под насловом "Препознавање когнитивних компоненти у електроенцефалографским одзивима на соматосензорне електричне стимулусе методама машинског учења" (енг. „Detection of cognitive components in electroencephalographic responses to somatosensory electrical stimuli using machine learning methods“) испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета. У докторској дисертацији, кандидаткиња је доказала хипотезу да задатак селективне тактилне пажње у форми бројања стимулуса достављених на кожи подлактице испитаника изазива значајне промене у морфологији таласног облика соматосензорних потенцијала изазваних догађајем у односу на експерименталну ситуацију где пажња није усмерена ка стимулусима. Такође је показано да постоје статистички значајне разлике у одзивима на електричне стимулусе које су последица усмеравања пажње на стимулисану локацију у временским интервалима који одговарају карактеристичним пиковима соматосензорних потенцијала изазваним догађајем. Финално, доказано је да је могуће извршити класификацију соматосензорних потенцијала изазваних догађајем за сврху управљања *BCI* системом на основу једноканалних и вишеканалних ЕЕГ мерења, при чему вишеканални приступ повећава перформансе система у погледу тачности класификације и/или брзине преноса информација. У оквиру докторске дисертације је демонстрирана нова експериментална парадигма са две просторно блиске стимулационе локације које стимулишу гране медијалног и радијалног нерва са вероватноћом достављања стимулуса на једну од локација од 50%.

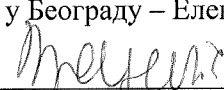
Узимајући у обзир све наведено Комисија сматра да докторска дисертација Марије Новичић садржи оригиналне научне доприносе у области биомедицинског инжењерства као и да је током рада на докторској дисертацији кандидаткиња показала самосталност и зрелост у научно-истраживачким активностима. Стога Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом „Препознавање когнитивних компоненти у електроенцефалографским одзивима на соматосензорне електричне стимулусе методама машинског учења“ кандидаткиње Марије Новичић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

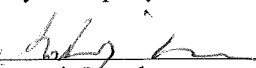
У Београду, 11.7.2025. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Милица Јанковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Бошко Николић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Оливера Ђорђевић, доцент
Универзитет у Београду – Медицински факултет


др Андреј Савић, научни саветник
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Жељко Ђуровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет