

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Драгољуба Гајића, дипломираног инжењера електротехнике.

Одлуком бр. 5035/07-3 од 17.06.2014. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Драгољуба Гајића под насловом

„Детекција епилептиформних активности у ЕЕГ сигнаlima применом статистичког препознавања облика“

„Detection of epileptiform activities in the EEG signals based on statistical pattern recognition“

Након прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала као и разговора са самим кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

07.05.2013. кандидат је пријавио тему за израду докторске дисертације.

09.05.2013. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата и упутила Наставно-научном већу на усвајање.

14.05.2013. године Наставно-научно веће именовало је Комисију о оцени подобности теме и кандидата.

08.10.2013. године Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије о подобности теме и кандидата.

18.11.2013. године Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом "Детекција епилептиформних активности у ЕЕГ сигналима применом статистичког препознавања облика" (број одлуке 61206-5375/2-13 од 18.11.2013. године).

17.06.2014. године Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертација Драгољуба Гајића (број одлуке 5035/07-3 од 23.06.2014. године) у саставу:

- др Жељко Ђуровић, редован професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду
- др Мирјана Поповић, редован професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду
- др Ружица Максимовић, ванредан професор, Медицински факултет Универзитета у Београду
- др Бранко Ковачевић, редован професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду

На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 2944/2 од 11.10.2007. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2007/2008, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета. По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под називом "Детекција епилептиформних активности у ЕЕГ сигналима применом статистичког препознавања облика" припада техничким наукама, ужој научној области дигиталне обраде сигнала за коју је матични Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Ментор докторског рада је проф. др Жељко Ђуровић који је изабран у звање редовног професора за исту научну област и истовремено је аутор већег броја радова у истакнутим међународним часописима.

1.3. Биографски подаци кандидата

Кандидат Драгољуб Гајић је рођен 03.11.1982. у Ваљеву, Србија. Дипломирао је 2007. године на Електротехничком факултету у области управљања системима и обраде сигнала, са темом „Предикција епилептичних напада применом технике таласића“, код ментора проф. др Жељка Ђуровића. Кандидат је 2011. дипломирао и на Машинском факултету Универзитета у Београду, код ментора проф. др Драгутина Љ. Дебељковића а 2010. године специјализирао оптимизацију ланца вредности на Факултету за информационе технологије Панонског Универзитета у Веспрем, Мађарска.

Кандидат поседује преко 6 година професионалног радног искуства на разним позицијама у индустрији, претежно нафтној, петрохемијској, гасној, цементој и индустрији челика. Од марта 2008. године кандидат је студент докторских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду а од јула 2012. године и гостујући докторанд на Универзитету у Лаквили, Италија. Такође, кандидат је од јануара 2013. године *Marie Curie Fellow* у оквиру *Energy-SmartOps* пројекта (www3.imperial.ac.uk/smartops) и тиме веома активан у још једној мултидисциплинарној области истраживања везаној за енергетску ефикасност и оптимизацију производње у енергетски веома интензивним индустријама.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана и на српском и на енглеском језику и обима је 108 страна. Садржи пет поглавља, означених као Увод, Обрада ЕЕГ сигнала, Класификација ЕЕГ сигнала, Нова техника за детекцију епилептиформних активности, Експериментални резултати, Закључак и на крају рада се налази списак коришћене литературе који обухвата 76 референци. Рад, такође, садржи 36 слика и 8 табела.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље је уводног карактера и у њему су представљени основни појмови неопходни за разумевање проблематике везане за епилепсију и детекцију епилептиформних активности у енцефалограмима (ЕЕГ сигналама), као на пример основна физиологија мозга, карактеристике, дијагноза и начини лечења овог поремећаја мождане активности, основне методе за снимање као и карактеристике електроенцефалограмских сигнала. Такође у овом поглављу је предстаљен значај и предмет истраживања докторске дисертације као и преглед неких досадашњих истраживања у овој области. Посебна пажња је посвећена мотивима за израду овакве дисертације. Наведено је да сами епилептични напади нису највећи проблем особа које пате од овог поремећаја с обзиром да они најчешће трају у интервалу од неколико секунди до, у тежим случајевима, неколико минута. Заправо страх од сваког следећег напада и евентуалних последица јесте највећа брига оболелих, као и њихових најближих. Управо је ова чињеница разлог и главни мотив да велики број истраживача већ дуги низ година трага за веродостојним индикаторима наиласка епилептичног напада.

У другом поглављу су представљене основне технике и ограничења у области обраде ЕЕГ сигнала и издвајање одређених обележја из истих а све у циљу касније детекције потенцијално присутних епилептиформних активности. Описане су одређене припремне активности односно предобрада снимљених ЕЕГ сигнала која предходи даљој обради и издавајању обележја. Посебна пажња је посвећена техникама одабирања, односно правилном избору учестаности одабирања, нормализацији сигнала и филтрирању ЕЕГ сигнала. Као главне технике за обраду сигнала наведене су анализа

у временском, фреквенцијском, временско-фреквенцијском домену и такозвана нелинеарна анализа. Из временског домена су углавном издвојени статистички параметри, као што су средња вредност сигнала на узорку, варијанса сигнала на узорку, варијација сигнала као и корелационе и коваријационе функције. У фреквенцијском домену је акценат бачен на процену спектралне густине снаге сигнала и перидограм као његову најједноставнију процену. У одељку о временско-фреквенцијској анализи значајна пажња је посвећена теорији таласића (енг. 'wavelet') која носи информацију и о фреквенцијском садржају сигнала али и о временској појави тог садржаја. Коначно, део о нелинеарној анализи говори о увођењу нелинеарних модела заснованих на теорији хаоса као једној од најпознатијих техника за идентификацију и опис евентуално присутне хаотичности и нелинеарности у сигналу.

У трећем поглављу су представљене основне статистичке технике за пројектовање одговарајућих класификатора и класификацију издвојених обележја. Издвојене су три стратегије које се најчешће користе при пројектовању статистичких класификатора. То су класификатори типа тестирања хипотеза, параметарски и непараметарски класификатори. Јасно су назначене предности и недостаци сваког од ових типова класификационих структура и одговарајућа пажња је посвећена примењивости сваке од њих на проблем који ће бити решаван у каснијем делу дисертације. Наглашено је да примена технике тестирања хипотезе подразумева познавање функција густине вероватноће обележја, док непараметарске методе захтевају врло велики број узорака, па су се природно наметнуле параметарске технике као погодне за процес детекције епилептиформних активности. У циљу формирања целовитог погледа на статистичке алате који су у мањој или већој мери коришћени у овој дисертацији, део овог поглавља је посвећен проблему кластеризације. У најважнијим цртама је дат преглед четири параметарске методе: рекласификација према најближој средњој вредности, метод нормалне декомпозиције, метод грана и граница и кластеризација заснована на приступу максималне веродостојности. Коначно, као алтернатива статистичком приступу у детекцији сигнала и класификацији облика, у кратким цртама су приказани основни елементи приступа заснованих на расплинутој ('fuzzy') логици и примени вештачких неуралних мрежа.

Четврто поглавље је посвећено оригинално развијеној техници за детекцију епилептиформних активности у ЕЕГ сигнаlima. Структура нове технике је представљена блок-дијаграмом на слици 4.1, а резултат је дуготрајног истраживања по питању релевантних карактеристика које носе информацију о наиласку епилептиформних активности у сигналу ЕЕГ-а. Као што је на овом дијаграму назначено, структуру комплетног, предложеног алгоритма чине следећи кључни кораци: аквизиције и предобраде ЕЕГ сигнала, издвајања обележја из пет фреквенцијских подопсега од клиничког интереса (делта 0–4 Hz, тета 4–8 Hz, алфа 8–12 Hz, бета 12–30 Hz и гама 30–60 Hz) и у четири домена (временском, фреквенцијском, временско-фреквенцијском и нелинеарном анализом), редукације димензије простора обележја на две координате и пројектовање више нелинеарних параметарских класификатора који раздвајају следеће три класе ЕЕГ сигнала: неепилептиформне са здравог možданог ткива, неепилептиформне и епилептиформне са оштећеног možданог ткива. Детаљнији приказ појединих активности је дат у следећем, петом поглављу, при чему су искоришћени и експериментално снимљени

сигнали у циљу илустрације појединих проблема или образложења за примену појединих поступака, односно техника.

У петом поглављу је предложена техника тестирана и верификована коришћењем ЕЕГ сигнала снимљених у Центру за епилепсију Универзитета у Бону, Савезна Република Немачка, за време предоперативне фазе код неколико пацијената оболелих од епилепсије као и код неколико потпуно здравих волонтера. Приказани су карактеристични сигнали пре и после предобrade, а на одговарајућим дијаграмима су дати карактеристични периодограми, нормализовани усредњени периодограми, релативне снаге сигнала, спектрограми као и статистички квантификатори. У циљу формирања увида у дискриминаторне способности појединих обележја из разних домена, у табелама 5.1 и 5.2 наведена су обележја и за свако од њих дате су вредности момената првог и другог реда за све три класе сигнала. Дискриминаторно својство обележја је квантификовано кроз нумерички критеријум који је изведен из матрица унутаркласног и међукласног расејања. Како је изабрани почетни вектор обележја високе димензионалности, посебна пажња је посвећена поступку за редукцију димензија. Коришћена су два приступа за редукцију. Први је такозвани Кархунен-Лоеве експанзија, док је други метод изведен из минимизације критеријума који садржи матрице расејања класа. Показало се да је овај други метод много ефикаснији, и да је успешна редукција извршена чак у простор двеју димензија. Коначно, кандидат се одлучио за пројектовање хијерархијског квадратног класификатора. Први класификатор је имао циљ да раздвоји неепилептиформне сегменте са здравог ткива од осталих, док је други извршио раздвајања епилептиформних од неепилептиформних записа са оштећеног ткива. Од 150 узорака који су коришћени за обучавање класификатора грешке су начињене у два случаја. Једном је епилептиформни сигнал класификован као неепилептиформни са оштећеног ткива, док је једном неепилептиформни сигнал са оштећеног ткива класификован као да је епилептиформни. Иако се формално може срачунати тачност у класификацији предложене методе, а она износи 98.7 %, у раду је наведено да овакав закључак није захвално доносити и да ове бројке треба са резервом користити с обзиром да број анализираних узорака није довољно велики. У статистичкој литератури постоји златно, неписано правило по коме се сматра да статистички показатељи постају веродостојни онда ако постоји бар по 30 узорака на сваки непознати параметар који се из тих узорака естимира. У нашем случају постоје два квадратна класификатора од којих сваки у својој структури садржи шест параметара, те би се сходно томе, зарад релевантне статистичке анализе, очекивало бар 360 снимљених ЕЕГ сигнала.

На крају рада се налази закључак који је написан тако да концизно и једнозначно одговори на три важна питања. Прво, образложен је избор теме, дати су аргументи који сведоче о њеној актуелности и истовремено је наведено у којој мери ова тема представља још увек изазов за истраживачке активности широм света. Друго, у закључку је укратко описан резултат којим је ова докторска дисертација резултовала, наведене су научне поставке на којима је реализован нов метод за детекцију епилептоформних активности ЕЕГ сигнала, и описана је структура самог алгоритма. Једнозначно су издвојени резултати рада у овој тези који се могу сматрати оригиналним научним доприносима. Коначно, кроз једну непристрасну компаративну анализу, одређено је место новопредложеног метода у односу на постојеће технике

приказане у доступној литератури. Коментарисани су резултати који произилазе из одговарајућих матрица конфузије, али је истовремено указано на ограничења предложене методе и могућности њене примене у инжињерској и медицинској пракси. На крају је дата и смела идеја да се, поведени позитивним резултатима, слична анализа може применити и у детекцији абнормалних активности повезаних са неким другим поремећајима нервног система, као што су на пример Алцхајмерова болест или шизофренија.

Списак литературе обухвата 76 референци које су у непосредној вези са материјом рада и које су коректно цитиране у дисертацији. Међу њима има и класичних, базичних уџбеника како из области неурофизиологије, тако и из области пројектовања статистичких класификатора и експертских система. Међутим, међу цитираном листом референци има и чланака који сведоче о врло новим, недавним истраживањима на тему детекције епилептоформних сигнала.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

У циљу илустрације савремености и актуелности разматраног проблема, могуће је навести неколико чињеница које сведоче о томе колико је епилепсија заступљена и озбиљна болест савременог света. Данас у свету болује од епилепсије око 65 милиона људи, што чини скоро 1% светске популације, при чему 80% оболелих живи у земљама у развоју. Код особа са епилепсијом је повећан ризик од смрти, док се два до шест пута повећава ризик од суицида. Епилептични напади директно утичу на мерљиве економске трошкове. Податак каже да је у 2004. години епилепсија проузроковала економске трошкове од 15.5 милијарди евра у Европи, док је у Индији тај трошак износио 1.7 милијарди долара. Занимљиво је рећи да ова цифра износи 0.5% бруто националног дохотка Индије, што је самерљиво са средствима која се, рецимо, издвајају за науку. Особе са епилепсијом су под двоструко већим ризиком да буду укључени у судар моторних возила и зато им у многим областима широм света није дозвољено да возе или могу да управљају моторним возилима уколико не испуњавају одређене услове. У неким земљама, као што су Шведска, Данска, Аустрија и Шпанија, су лекари обавезни по закону да надлежним органима пријаве особе које имају епилептичне нападе. Епилепсија је болест која у великој мери ограничава и нарушава квалитет живота оболелих. Отуда су разумљиви напори Светске Здравствене Организације, али и научне заједнице целог света, да се оболелима помогне на што ефикаснији начин. Проблематика аутоматске детекције епилептиформних активности у ЕЕГ сигналима односно предикције и детекције епилептичних напада је веома актуелна и присутна у академским радовима. Крајњи циљ истраживања јесте развој поузданог система који би се у будућности имплантирао у главу пацијената који пате од епилепсије а у циљу аутоматског предвиђања и избегавања надолазаћег епилептичног напада или пак детекције почетка и стављања истог под контролу. Садашњи ниво истраживања и достигнутих резултата још увек није дао методу која обезбеђује довољно мале нивое лажног аларма и пропуштене детекције, робусност у

смислу покривања различитих варијетета оболења и типова епилептичких напада, а да истовремено буде примењива у смислу имплементације у медицински имплант. Сходно томе, ова дисертација представља оригинални допринос великом напору који чини светска академска заједница у области развоја поуздане аутоматске технике за детекцију епилептиформних активности у ЕЕГ сигнаlima.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Приликом израде дисертације коришћена је обимна и релевантна литература. У списку литературе на крају рада се поред општих референци које се односе на обраду сигнала укључујући и ЕЕГ сигнале, даје и списак радова од непосредног интереса за формирање ове конкретне технике за детекцију епилептиформних активности у ЕЕГ сигнаlima. Највећи део те литературе се односи на општи проблем издвајања обележја из различитих домена сигнала, редукције димензије простора обележја и њихове класификације разним статистичким техникама. Међу њима има и радова који на разне друге начине решавају проблем детекције епилептиформних активности у циљу поређења перформанси новоформиране технике са постојећим техникама. Све референце из списка литературе се на коректан начин помињу у раду. По свом садржају као и значају који су имале приликом писања ове дисертације, издвајају се три групе референци. Прва од њих доминантно садржи основе физиолошке феноменологије епилепсије (Kandel, 2000; Kannathal, 2005; Perruca, 2005; Sander 1997)¹ У другој групи коришћених референци се налазе материјали који су посвећени општим техникама обраде временских серија. Међу њима има класичне литературе као што су (Bryson, 1969; Cao, 1997; Dillon, 1984; Hyvarinen, 2001), али и литературе која је тематски посвећена обради ЕЕГ сигнала (Andrzejak, 2001; Gotman, 1999)². Коначно, значајан део наведене литературе је управо посвећен резултатима скоријих истраживања у области детекције или предикције епилептоформних обележја у електроенцефалограмима (Altunay, 2010; Chandaka, 2009; Ghosh-Dastidar, 2008; Guo,

¹

- Kannathal N, Acharya UR, Lim CM, Sadasivan PK, Characterization of EEG-a comparative study, *Comput Methods Programs Biomed*, **80**(1):17-23, 2005.
Kandel E, Schwartz J, Jessell T, Principles of neural science, 4th ed. McGraw Hill Companies, 2000.
Niedermeyer E, Da Silva F, *Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related fields*, 4th ed. Williams and Wilkins, 1999.
Perucca E, An introduction to antiepileptic drugs, *Epilepsia*, **46**(4):31-37, 2005.
Sander J, Hart Y, *Epilepsy: Questions and answers*, Merit Publishing International, 1997.

²

- Andrzejak R, Lehnertz K, Mormann F, Rieke C, David P, Elger C, Indications of nonlinear deterministic and finite-dimensional structures in time series of brain electrical activity: Dependence on recording region and brain state, *Phys Rev E*, **64**(6):061907, 2001.
Bryson AE, Ho Y, *Applied optimal control: optimization, estimation, and control*, Blaisdell Publishing Company, 1969.
Cao L, Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series, *Phys D*, **110**(1-2):43-50, 1997.
Dillon WR, Goldstein M, *Multivariate Analysis: Methods and Applications*, John Wiley and Sons, New York, 1984.
Gotman J, Automatic detection of seizures and spikes, *J Clin Neurophysiol*, **16**(2):130-140, 1999.
Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E, *Independent Component Analysis*, John Wiley and Sons, New York, 2001.

2011; Iscan, 2011; Liang, 2010; Orhan, 2011; Varsavsky, 2011; Wang, 2011)³. Наведена литература је, између осталог, искоришћена и у циљу компаративне анализе добијених резултата у успешности детекције абнормалности у ЕЕГ сигналу.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У раду на дисертацији коришћене су разне технике за издвајање обележја из сва четири домена ЕЕГ сигнала од интереса а са циљем повећања тачности и робусности детекције епилептиформних активности. Дакле, са посебном пажњом су анализирани артефакти у ЕЕГ записима који се на било који начин издвајају и у временском и фреквенцијском, комбинованом као и у домену нелинеарних дескриптора сигнала, а све са циљем издвајања карактеристика које носе информацију о појави девијације у сигналу. Оваквим приступом су покривене све могућности које су коришћене у комплетној доступној литератури. Даље, у циљу обезбеђења визуелне супервизије примењених класификатора, опет су примењени различити поступци редукције димензија података. У првом кораку је то била стандардна процедура КЛ (*Karhunen-Loeve*) експанзије, међутим, у каснијим корацима истраживања је показано да редукција димензија на бази матрица ресајања узима у обзир особености класификационог проблема, и обезбеђује значајно боље резултате. Једини судија и објективна мера успешности спроведених истраживања био је експериментални резултат спроведен коришћењем базе ЕЕГ сигнала снимљених у Центру за епилепсију Универзитета у Бону, Немачка. О адекватности примењених научних метода истовремено говоре и савремена литература посвећена овој теми, али истовремено и резултати класификације добијени на експериментално снимљеној бази података.

3.4. Применљивост остварених резултата

Крајњи циљ рада јесте пројектовање нове технике за детекцију епилептиформних активности као и анализа предности и недостатака исте у смислу тачности и њене даље примене. На свим појединим корацима вршене су одређене

3

-
- Altunay S, Telatar Z, Eroglu O, Epileptic EEG detection using the linear prediction error energy, *Expert Syst Appl*, 37:5661-5665, 2010.
- Chandaka S, Chatterjee A, Munshi S, Cross-correlation aided support vector machine classifier for classification of EEG signals, *Expert Syst Appl*, 36(2):1329-1336, 2009.
- Ghosh-Dastidar S, Adeli H, Dadmehr N, Principal component analysis enhanced cosine radial basis function neural network for robust epilepsy and seizure detection, *IEEE Trans Biomed Eng*, 55(2 Pt 1):512-518, 2008.
- Guo L, Rivero D, Dorado J, Munteanu CR, Pazos A, Automatic feature extraction using genetic programming: An application to epileptic EEG classification, *Expert Syst Appl*, 38:10425-10436, 2011.
- Iscan Z, Dokur Z, Tamer D, Classification of electroencephalogram signals with combined time and frequency features, *Expert Syst Appl*, 38:10499-10505, 2011.
- Liang SF, Wang HC, Chang WL, Combination of EEG complexity and spectral analysis for epilepsy diagnosis and seizure detection, *EURASIP J Adv Sig Pr*, 2010:853434, 2010.
- Orhan U, Hekim M, Ozer M, EEG signals classification using the K-means clustering and a multilayer perceptron neural network model, *Expert Syst Appl*, 38(10):13475-13481, 2011.
- Varsavsky A, Mareels I, Cook M, *Epileptic seizures and the EEG: measurement, models, detection and prediction*, CRC Press, 2011.
- Wang D, Miao D, Xie C, Best basis-based wavelet packet entropy feature extraction and hierarchical EEG classification for epileptic detection, *Expert Syst Appl*, 38(11):14314-14320, 2011.

припреме за повећање тачности и потенцијалну имплементацију у реалном окружењу и у реалном времену аквизиције ЕЕГ сигнала, нпр. пре издвајања обележја извршена је одговарајућа предобрада сигнала, пре класификације квадратним класификаторима извршена је редуција димензије простора обележја, итд. Техника је верификована на ЕЕГ сигналима снимљеним код различитих пацијената што додатно повећава њену евентуалну применљивост у реалном окружењу. Другим речима, имајући у виду нумеричку сложеност предложеног алгоритма, могућност да се овакав алгоритам имплементира на комерцијалним микропроцесорима, робусност предложене методе на варијације настале услед различитих динамичких стимулуса али и особености већег броја особа, добијене резултате у класификацији, мале вероватноће лажног аларма и мале вероватноће пропуштене класификације, применљивост развијене технике је изузетно висока. Наравно, с обзиром на природу уређаја који би реализовао развијени алгоритам, као и потребу за уградњом импланта, у овакав пројекат имплементације би морала да буду укључене и здравствене организације које би са свог станишта морале да дају одговарајућу сагласност.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Драгољуб Гајић је истраживању и изради ове докторске дисертације посветио непуних шест година. Током овог времена значајну пажњу је посветио изучавању тангентних научних дисциплина као што су теорија система, теорија стохастичких процеса, препознавање облика, елементи вештачке интелигенције, анализа и моделирање временских серија, елементи неурологије и физиологије. Изучавајући ове области, а истовремено радећи на својој дисертацији, кандидат је показао систематичност, упорност, креативност, самосталност, зрелост и могућност примене и синергије резултата из различитих научних области. Проблем којим се бави ова дисертација је веома актуелан а добијени резултати у великој мери превазилазе недостатке које постојећа решења показују. Остварени доприноси су оригинални и они сами по себи потврђују способност кандидата за самостални научно-истраживачки рад. Са друге стране, ради се о кандидату који је по својим интересовањима и ентузијазму несвакидашњи. Драгољуб Гајић је осим на Електротехничком, дипломирао и на Машинском факултету Универзитета у Београду, специјализирао на Факултету за информационе технологије Универзитета у Веспрему у Мађарској а има и статус гостујућег докторанда на Универзитету у Лаквили, Италија.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Гледано у целини, у докторској дисертацији је предложена нова техника која представља унапређен метод детекције епилептиформних активности у ЕЕГ сигналима чиме је дат оригинални научни допринос овој, и даље веома актуелној, истраживачкој области. Конкретно, постигнути резултати се могу расчланити у следеће научне доприносе:

- показано је да подела фреквенцијских опсега у пет подфреквенцијских домена омогућава квалитетно издвајање обележја која носе информацију о појави епилептиформних назнака у ЕЕГ сигналу;
- полазећи од претпоставке да сваки домен у дигиталној обради сигнала (временски, фреквенцијски, временско-фреквенцијски и нелинеарни параметарски) са собом носи предности које се не виде у осталим, али истовремено има и своја ограничења, извршено је комбиновање карактеристичних обележја из различитих домена, и на тај начин је показано да се може поправити квалитет процеса класификације ЕЕГ сигнала мерена кроз вероватноћу лажног аларма и вероватноћу пропуштене класификације;
- предложен је процес нормализације прикупљених ЕЕГ сигнала који у великој мери доприноси робустности испројектоване методе, ублажавајући утицај варијетета који потичу од специфичности мерне опреме, тренутних динамичких стимулуса, као и физиолошких и анатомских особености особе на којој су мерења извршена;
- једним од доприноса ове тезе се може сматрати и резултат истраживања посвећено избору технике за редукцију димензија вектора обележја, а све у циљу смањења нумеричке сложености алгорита уз очување нивоа губитка информација којом редукција димензија увек резултује. Показано је да редукција димензија на бази матрица расејања оптимизује постављени критеријум;
- значајни допринос ове тезе представља и избор и подешавање одговарајућег параметарског класификатора који има форму део-по-део (*piece-wise*) класификатора при чему су његови елементи формирану у класи параметарских дискриминационих техника;
- извршена је детаљна анализа тренутно постојећих решења и поступака доступних у литератури за анализу ЕЕГ сигнала и класификацију постојања епилептиформних особености у тим сигнаlima. На основу те анализе омогућено је и квалитетно поређење развијене методе са постојећим техникама;
- на основу претходно развијених сегмената предложена је и верификована оригинална техника за детекцију епилептиформних активности у ЕЕГ сигнаlima. Верификација је извршена на експерименталним подацима добијеним из Центра за епилепсију Универзитета у Бону, Немачка.
- коначно, као значајан допринос се мора поменути и чињеница да су комплетан поступак преобrade сигнала, обраде у одговарајућим доменима, издвајање обележја, редукција вектора обележја, пројектовање класификатора и сама класификација реализовани у програмском окружењу које дозвољава једноставну рачунарску оптимизацију кода и самим тим једноставну реализацију у микропроцесорској техници што је корак од примене у медицинској пракси.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Значајни део докторске дисертације је посвећен анализи добијених резултата, посебно у компаративној анализи развијеног метода са другим познатим и постојећим техникама које су описане у доступној литератури. У односу на постојеће стање у овој

области, узимајући у обзир резултате публиковане до дана предаје докторске дисертације, као предности предложене технике се могу навести следеће чињенице:

- предложени метод упоредо узима у обзир информације из различитих фреквенцијских подопсега и домена у обради сигнала, за разлику од осталих метода које су углавном засноване на партикуларним фреквенцијским својствима или појединачним доменима анализе;
- издвојена обележја за која се пројектује класификатор немају физичко значење јер су добијена као резултат оптимизације критеријума сепарабилности. Тако добијена обележја показују предност у односу на стандардне технике којима се априори бирају елементи вектора обележја;
- изабрани и реализовани класификатор је у форми део-по-део параметарског класификатора ниског реда, те је стога релативно једноставан и робустан, са малим бројем параметара што је у духу директне и ефикасне имплементације у микропроцесорској техници.

Са друге стране, објективно постоје и елементи истраживања који нису спроведени у приложеној дисертацији, а који су углавном последица њихових обимности, што би превазишло уобичајен обим докторских дисертација, или су последица непоседовања или непостојања обимнијих база ЕЕГ сигнала са епилептиформним активностима. Ови недостаци или путокази за даље истраживање у овој области се могу формализовати и навести у следећем низу:

- директна интеграција развијеног метода са неким од постојећих техника, а у циљу повећања ефикасности детекције епилептиформних активности у ЕЕГ сигналу, није могућа због различитог приступа у предобradi (конкретно нормализацији) сигнала;
- од великог значаја би била додатна верификација предложене технике на другим већим, углавном комерцијално доступним, базама снимљених ЕЕГ сигнала (нпр. <http://epilepsy-database.eu>) у циљу даљег развоја, критичке анализе и адаптације технике за примену у реалном окружењу;
- као занимљив и изазован задатак се појављује могућност тестирања и утврђивања перформансе нове технике у области детекције абнормалних активности повезаних са неким другим поремећајима мозга као на пример Алцхајмеровом болешћу и шизофренијом.

4.3. Верификација научних доприноса

Тренутно су резултати истраживања, у оквиру докторске дисертације, публиковани у следећем раду (према КоБСОН-у у категорији M23, IF: 0.233 за 2012. годину):

Gajic D, Djurovic Z, Di Gennaro S, Gustafsson F, Classification of EEG signals for detection of epileptic seizures based on wavelets and statistical pattern recognition, *Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications*, vol. **26**, issue 02, April 2014. (DOI: 10.4015/S1016237214500215, Print ISSN: 1016-2372, Online ISSN: 1793-7132),

Вредно је напоменути да интересовање кандидата Драгољуба Гајића за ову област не престаје завршетком у писању ове дисертације, већ је још један научни рад посвећен овој теми послат на рецензију у одговарајућем међународном научном часопису.

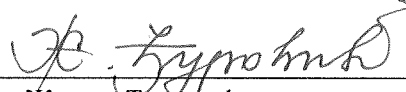
5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Кандидат Драгољуб Гајић је у својој докторској дисертацији развио и верификовао оригиналну технику за детекцију епилептиформних активности у ЕЕГ сигнаlima. Ова техника је развијена у циљу аутоматске предикције и детекције епилептичних напада као кључног дела система који би се у блиској будућности могао имплантирати у главу особама које пате од епилепсије. Истраживачки рад у оквиру ове дисертације који је резултовао новом техником за детекцију епилептиформних активности даје свој додатни допринос даљем развоју у овој доста важној и актуелној научној области. У односу на постојећа решења овог проблема, нова техника се одликује вишим нивоом искоришћења доступних информација, оптималним избором обележја из различитих фреквенцијских подопсега и домена ЕЕГ сигнала као и доста једноставнијом и транспарентнијом класификацијом помоћу нелинеарних класификатора генерисаних у породици параметарских дискриминационих функција.

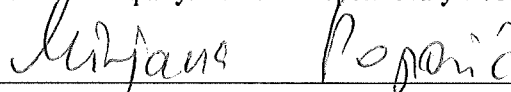
Имајући претходно у виду, и ценећи све остварене резултате као и испољене способности кандидата, предлажемо Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Детекција епилептиформних активности у ЕЕГ сигнаlima применом статистичког препознавања облика“ („Detection of epileptiform activities in the EEG signals based on statistical pattern recognition“) кандидата Драгољуба Гајића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

у Београду,
дана 02.10.2014.

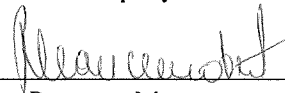
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



Проф. др Жељко Туровић, редован професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду



Проф. др Мирјана Поповић, редован професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду



Проф. др Ружица Максимовић, ванредан професор
Медицински факултет Универзитета у Београду



Проф. др Бранко Ковачевић, редован професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду