

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Драшка Фурунцића**

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 916/3 од 24.5.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Драшка Фурунцића** под насловом

**Оцена квалитета артикулације гласова српског језика применом неуронских мрежа**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

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

Мр Драшко Фурунцић је одбранио магистарски рад „Методологија примене вештачких неуронских мрежа у обради и класификацији сигнала“ 24.12.2009. године на Електротехничком факултету у Београду (ментор: професор др Срђан Станковић). Тему докторске дисертације „Оцена квалитета артикулације гласова српског језика применом неуронских мрежа“ пријавио је 4.4.2013. године на Електротехничком факултету у Београду. Дана 9.4.2013. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно–научном већу на усвајање. Одлуком Наставно-научног већа бр. 916/1 од 14.5.2013. године именовани су чланови Комисије за оцену подобности теме и кандидата: проф. др Срђан Станковић (ментор), проф. др Слободан Јовичић и проф. др Младен Веиновић. Тема је одобрена одлуком Наставно–научног већа бр. 916/2 од 11.6.2013. године, а Веће научних области техничких наука на седници од 8.7.2013. године дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Кандидат је дана 3.5.2018. године предао урађену докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена на седници од 8.5.2018. године потврђује испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. На основу тога, Наставно-научно веће Факултета на седници бр. 827 од 15.5.2018. године, одлуком бр. 916/3 од 24.5.2018. године именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: др Срђан Станковић, професор емеритус (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Жељко

Ђуровић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Зоран Шарих, научни саветник (Центар за Унапређење Животних Активности, Баоград), др Мило Томашевић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Мишко Суботић, научни сарадник (Институт за експерименталну фонетику и патологију говора, Београд

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области техничких наука - електротехника и рачунарство (интелигентни системи управљања и обраде сигнала). За ментора је одређен др Срђан Станковић, професор емеритус.

Именовани ментор, др Срђан Станковић, професор емеритус Електротехничког факултета у Београду, дао је велики научни допринос у областима електротехнике, управљања системима и обраде сигнала, што подразумева бројне научне радове у реномираним међународним часописима. Водио је значајне домаће и међународне пројекте, био у организационим и програмском одборима међународних и домаћих конференција, а члан је међународних и националних организација и професионалних удружења. Значајан број његових истраживања посветио је интелигентним системима а у последњих пет година објавио је више радова из категорије М21 који припадају овој области, у чијем домену је и овде приказана дисертација. Руководио је израдом многих магистарских и докторских теза укључујући и магистарску тезу кандидата. Избор у звање професора емеритуса, као и публиковани радови потпуно га квалификују за ментора ове дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Драшко Фуруцић, дипломирани инжењер машинства, магистар електротехнике, рођен је 21.03.1958. године у Бијелом Пољу где је завршио основну школу и гимназију са одличним успехом. Дипломирао је 1988. године на Машинском факултету у Београду, на смеру Медицинско Машинство, са просечном оценом 8,00, одбравивши дипломски рад мултидисциплинарног карактера под називом „Системи аутоматског управљања природним и вештачким бубрегом“. Од 1989 године до сада ради у Институту Михајло Пупин у Београду. У матичном институту у групи за инжењерство знања ради у области примењене вештачке интелигенције. Интересовање за биомедицинске науке је било мотив да упише постдипломске студије на Медицинском факултету у Београду, смер експерименталне физиологије и патолошке физиологије, са акцентом на физиологији нервног система, као основе вештачке интелигенције, која је ужи домен истраживања кандидата. Магистарски рад под називом „Методологија примене вештачких неуронских мрежа у обради и класификацији сигнала“ кандидат је одбранио 2009 године на Електротехничком факултету у Београду под менторским надзором професора Срђана Станковића. Кандидат је радио на пројектима у областима хидрологије, метеорологије, климатологије, геофизике, енергетике, препознавања текста, препознавања говора, патологије говора, онкологије, урологије и нефрологије, неурокардиологије, анализе ЕЕГ и ЕКГ сигнала и ласерске технике. Објавио је радове у престижним међународним часописима, монографијама и зборницима радова са међународних и домаћих конференција. Кандидат је учествовао у рецензији радова публикованих у међународним часописима и од 2009 је члан групе рецензента за „IEEE - World Congress On Computational Intelligence“ и „IEEE-INNS International Joint Conference on Neural Networks“. Од 2000 године кандидат држи семинар „Примена Вештачке Интелигенције у Медицини“ за студенте на Одсеку за Техничку Физику код професора Дејана Раковића.

Посебно место у биографији кандидата припада сарадњи са катедром за Аутоматско управљање (Сигнали и системи) Електротехничког факултета Универзитета у Београду и нарочито професору Срђану Станковићу.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Драшка Фурунџића је написана на 211 страна на српском језику. Дисертација садржи 40 слика, 19 табела и 50 нумерисаних једначина. По форми и структури одговара Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14. децембра 2011. године. Садржи насловну страну на српском и енглеском језику, резиме на српском и енглеском језику, садржај, индекс скраћеница, 10 глава, изјаву о ауторству, изјаву о коришћењу, изјаву о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и кратку биографију. Главе дисертације су:

1. Увод (13 страна)
2. Квалитет артикулације, манифестација и репрезентација (17)
3. Систем за оцену квалитета артикулације (13 страна)
4. Сегментација и екстракција обележја говорног сигнала (30 страна)
5. Проблем неизбалансираног учења (52 стране)
6. Класификатори и класификација (21 страна)
7. Резултати процене квалитета артикулације (26 страна)
8. Закључак (7 страна)
9. Литература (10 страна)
10. Прилози (7 страна)

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом, уводном поглављу дисертације, дата је формулација проблема, представљена је мотивација и наведени су предмет циљ истраживања приказаних у дисертацији. Дат је преглед актуелног стања у области оцене квалитета артикулације гласова, где су уочена парцијална решења заснована на анализи утицаја појединачних акустичких обележја на квалитет изговора, и недостатак решења прихватљиве тачности и високог степена аутоматизације која укључују већи скуп релевантних обележја. Као циљ истраживања обухваћених дисертацијом наводи се дефинисање поузданог и објективног рачунарског модела стандардног логопедског поступка процене квалитета артикулације гласова српског језика прихватљиве тачности и високог степена аутоматизације. Мотив за овако решење лежи у објективизацији и повећању поузданости у процени, карактеризацији и категоризацији квалитета говора, што ће значајно унапредити постојеће логопедске процедуре у раду са децом и осталим пацијентима. Остваривост и сврсисходност пројектованог система је условљена потврдом неколико полазних претпоставки које су представљене у уводу. На крају уводног поглавља наведени су очекивани доприноси дисертације и преглед њене

организације. Преглед релевантне литературе, приказан је у сваком поглављу и компатибилан је са садржајем одговарајућих поглавља.

У другом поглављу дата је карактеризација појма квалитета артикулације изговорних гласова у функцији вредности мера њихових артикулационо-акустичких атрибута, који дефинишу домен вишедимензионалног простора заданих стандардних граница, који разграничава типичне и атипичне реализације одређене категорије говорних сегмената. Поред увођења појмова из области фонетике, у овом поглављу су приказане основне артикулационо-акустичке карактеристике различитих група фонема у контексту зависности учесталости појављивања атипичности њиховог изговора од комплексности процеса њихове продукције. Овде су приказана два стандардна теста који садрже детаљан опис атрибута изговорних гласова и начина за логопедску оцену квалитета њихове артикулације, на основу којих је развијен рачунарски модел.

У трећем поглављу приказан је систем за оцену квалитета артикулације гласова српског језика са свим важнијим модулима и њиховим интеракцијама датим у форми блок дијаграма. Улазни модул служи за аквизицију звучних сигнала. Други модул представља "ВАД" алгоритам за детекцију и дискриминацију говорних звучних сегмената (речи) и сегмената тишине, од којих се формира база стимулуса речи и тишине. У трећем модулу врши се сегментација говорног сигнала речи на фонемске сегменте од којих се формира база фонема. Издвајањем вектора обележја високог степена информативности из фонема се одвија у четвртом модулу. Пети модул представља експертску - логопедску нумеричку оцену квалитета артикулације фонема применом глобалног артикулационог теста. Логопедске оцене се користе као вектори жељених излазних вредности за обучавајући и тест узорак. У шестом модулу врши се повећање репрезентативности обучавајућих узорака применом оригиналног (ДББ) алгоритма. У седмом модулу се обавља обука, тестирање и компарација перформанси четири стандардна класификатора. Коначни излаз из седмог модула је поуздана предикција оцене квалитета артикулације фонема.

У четвртом поглављу представљена је аквизиција и сегментација звучног записа сигнала који је изведен упоредно експертским и алгоритамским приступом препознавања облика, заснованог на класификацији вектора акустичких обележја звучних сегмената. Ручна – експертска сегментација је неопходна почетна фаза при формирању иницијалног обучавајућег узорака, који служи за формирање алгоритамског модела сегментације. Детаљно су приказана два нивоа сегментације: 1) екстракција говорних сегмената који садрже изговорне речи и сегменте тишине применом ВАД алгоритма; 2) екстракција фонема из говорних сегмената речи чији се квалитет артикулације оцењује. У следећем кораку се врши екстракција вектора обележја квалитета артикулације фонема високог степена информативности, који се подвргавају процесу слушања од стране групе логопеда, током ког се за сваку инстанцу фонема формира оцена квалитета артикулације. Композицијом вектора обележја фонема и кореспондентних оцена квалитета њиховог изговора формирамо обучавајући и тест узорак за класификаторе који треба да изврше поуздану оцену квалитета артикулације нових, непознатих, случајева. У овом поглављу су приказани резултати тачности ВАД екстракције говорних сегмената из континуираног звучног сигнала као и резултати сегментације карактеристичних фонема из екстрахованих речи применом различитих алгоритма. Ручно сегментирани говорни сигнали изведени од стране експерата послужили су као референтни за оцену тачности коришћених алата. Приказана аутоматизација процеса припреме звучних стимулуса омогућава увећање базе стимулуса фонема а сходно томе и релевантности обучавајућег узорака.

Пето поглавље се односи на детаљан приказ теоретске основе и опсежног експерименталног истраживања учења у условима нијеизбалансираних података у смислу неравномерности расподеле инстанци у простору обележја као и неједнаке

заступљености класа у расположивом узорку за обуку класификатора. Приказане су процедуре анализе и повећања репрезентативности расположивог узорка вектора обележја у функцији ентропије и повећања униформности расподеле инстанци применом нове методе балансирања (ДББ) кроз компарацију са постојећим стандардним методама балансирања. Детаљно је приказан поступак дизајна ДББ алгоритма заснованог на трансферу дистрибутивних карактеристика правилне решетке на реалне вишедимензионалне узорке у циљу повећања њихове репрезентативности. Пошто униформна расподела инстанци узорка гарантује његову максималну ентропију и максималну репрезентативност, нови алгоритам генерише нове инстанце тренинг узорка у простору њихове мале густине и смањује број инстанци у простору велике густине како би се постигла квази униформна расподела.

У шестом поглављу су приказане теоријске основе четири типа класификатора, методе њихове обуке и компаративна анализа њихових перформанси, предности и недостака. Описани су К најближих суседа (КНН), Једноставни Бајесов класификатор (НБ), Самоорганизирајуће мапе (СОМ) и ансамбла Вишеслојних перцептрона (МЛП).

Једна од најједноставнијих и најстаријих метода за класификацију је КНН класификатор. Он класификује непознате инстанце у класу којој припада већина од њених најближих суседа. Близина је најчешће дефинисана еуклидним растојањем инстанци од предефинисаног броја суседа. Упркос иманентној једноставности, КНН метод даје резултате упоредиве са много сложенијим методама.

Једноставни Бајесов класификатор, је у ствари примењена Бајесова теорема и непосредно се заснива на рачунању условних вероватноћа догађаја. Поред привидне једноставности ови класификатори су доста распрострањени и овде имају компаративну улогу.

Самоорганизујуће мапе представљају општи модел латералне интеракције неурона у слојевима (ламинама) коре великог мозга у циљу карактеризације и дискриминације спољашњих стимулуса и очувања њихове топологије, што се манифестује као моделирање процеса соматотопије или тонотопије, на пример. За разлику од перцептрона код којих свака неуронска ћелија оперише углавном самостално, где се њиховом латерална интеракција унутар слојева абстрахује, СОМ ламинарни модел мреже подразумева интеракцију неурона истог слоја који резултира феноменом кластеровања улазних инстанци. Ови модели су примењиви за класификацију узорака када нису дефинисани индикатори класа. Овде су примењени као један од компаративних метода класификације.

У овом поглављу је приказан и најраспрострањенији тип вештачких неуронских мрежа - вишеслојни перцептрон као рачунарска структура за обраду информација заснована на генерализованим математичким моделима принципа морфолошко функционалне организације централног нервног система. МЛП спада у неуронске мреже са пропагацијом сигнала унапред, чија се обука одвија под надзором, односно у присуству сигнала жељеног одговора на предефинисан улаз. МЛП користи генерализовано делта правило учења, односно правило повратне пропагације сигнала грешке. Једна од најважнијих примена перцептрона, поред апроксимације функција, је класификација узорака. Поред оперативних предности као што су флексибилност и робустност, перцептрони имају познате недостатке попут проблема локалних минимума и оверфитинг ситуације које су последица случајног избора почетних параметара и утицаја дисбаланса у расподели инстанци обучавајућих узорака

Ефикасна процедура за решавање ових проблема је примена ансамбла перцептрона са већинским одлучивањем. У овом поглављу је приказан оригиналан начин избора оптималног ансамбла перцептрона који је коришћен за оцену квалитета артикулације гласова, као и резултати његове примене.

У седмом поглављу приказани су резултати примене свих врста класификатора за оцену квалитета артикулације и извршено међусобно поређење њихових перформанси. Поређење тачности класификатора је извршено посредно преко еталона за тачност оцена квалитета артикулације који је формиран као већинска одлука групе од пет искусних логопеда. На основу рангирања мера тачности класификатора закључено је да најбоље резултате показује оптимални МЛП ансамбл обучен на балансираним узорцима уз примену ДББ алгоритма. Други по рангу са незнатно мањом тачношћу је КНН класификатор. Такође су упоредно приказани резултати компаративне корелације вектора оцена примењених класификатора и појединих логопеда у односу на вектор еталон, којом приликом је утврђено да је тачност класификатора на већем нивоу у односу на индивидуалну тачност логопеда. Ово поглавље приказује детаљну компаративну анализу тринаест актуелних алгоритама за балансирање података примењених на двадесет стандардних база података у циљу приказа предности и недостатака ДББ алгоритма у односу на стандардне процедуре. Такође су дати графички прикази функционалне зависности квалитета артикулације од одређених обележја на основу осетљивости посматраних МЛП структура на пертурбације улазних вариабли. Ове функције садрже информације о релевантности укључених обележја. Током приказаних истраживања изведени су докази почетних претпоставки као кључних парцијалних услова остваривости и сврсисходности дисертацијом дефинисаног циља. Ови докази који подразумевају остварење неколико антиципираних истраживачких резултата, представљају и оригиналан допринос приказане дисертације.

У осмом поглављу приказан је преглед постигнутих резултата истраживања, генерални допринос истраживања у области рачунарске евалуације квалитета артикулације и положај приказаних истраживања у релевантном информационом окружењу као и потенцијални утицај на примену и будуће истраживање у логопедској пракси. Посебно су истакнути резултати развоја нових метода за побољшање перформанси учећих модела, како у алгоритамском домену, где се кроз оптимални избор МЛП ансамбла повећавају робустност и тачност класификатора, тако и у домену начина одабирања обучавајућих узорака из расположивих података у смислу повећања њихове репрезентативности применом ДББ алгоритма.

Девето поглавље садржи податке о коришћеној литератури.

Десето поглавље садржи два прилога. Прилог I приказује стандардни тест за глобалну логопедску оцену квалитета артикулације. Прилог II садржи стандардни аналитички тест за детаљну логопедску анализу утицаја различитих одступања у изговору гласова на квалитет њихове артикулације.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Правилан развој говора представља неопходни услов здравог развоја свих аспеката живота јединке. Сходно томе, у логопедији су успостављене стандардне методе оцене квалитета артикулације засноване на аудитивно-перцептивној анализи артикулационо- акустичких атрибута говора у типичној и атипичној реализацији. Субјективистички карактер, недовољна ефикасност и непоузданост традиционалних метода били су мотив за симплификацију и објективизацију овог процеса кроз примену приказаног рачунарског модела високог степена аутоматизације и тачности који ће унапредити постојећи начин оцене квалитета артикулације.

Због великог броја дистинктивних атрибута квалитета артикулације, њихове изражене варијабилности, као и сложености самог процеса артикулације, и поред актуелности и присутности проблема у савременој научној литератури, до сада није

пронађено јединствено решење за поуздану и објективну рачунарску процену квалитета артикулације, засновану на већем скупу поузданих индикатора, па је развој оваквог система представљао оригиналан подухват. Досадашњи приступи квалитету артикулације представљају углавном парцијална решења заснован на анализи појединачних акустичких манифестација његове варијације. Ове чињенице указују на савременост и оригиналност приказаног система за рачунарску оцену квалитета артикулације. Иако је мањим делом заснован на концептима доступним у литератури, развој система приказаног у дисертацији је у највећој мери заснован на оригиналној теоријској подлози и представља оригиналан допринос кандидата, који је самостално пројектовао сваку од компонената система.

Савременост, оригиналност и значај истраживања и остварених резултата приказаних у дисертацији верификовани су радовима објављеним у поменутиим научним областима.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је проучио релевантну литературу и навео радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је укупно 180 референци са очигледним диверзитетом тема и области истраживања, које су условљене мултидисциплинарношћу дисертације, а међу наведеним су најутицајнији и најновији научни радови релевантни за области и проблеме истражене у дисертацији. Кандидат мр Драшко Фурунџић је водећи аутор у 13 и коаутор у 3 рада који су цитирани у дисертацији.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања спроведених у оквиру докторске дисертације подразумевала је следеће методолошке аспекте:

- прикупљање и проучавање расположиве релевантне научне литературе из домена дисертације, ради стварања опште слике о актуелном стању у домену,
- теоријско разматрање прихватљивих приступа детерминацији и карактеризацији скупа релевантних акустичких обележја квалитета артикулације високог степена информативности и дефиницији њихових мера, као и могућности успостављања модела алгоритамске кореспонденције између вектора акустичких обележја и нумеричких индикатора класа различитог квалитета артикулације,
- развој нове методе у домену информационих технологија која је намењена повећању репрезентативности расположивог обучавајућег узорка. Метода је заснована на максимизацији ентропије узорка и одликује се највишим степеном општости приступа проблему,
- развој новог алгоритма у домену интелигентних система који је намењен повећању тачности и робустности система за класификацију узорака. Алгоритам се заснива на избору оптималног подскупа из ансамбла обучених класификатора,
- експериментални рад: избор оптималног модела кроз компаративну анализу перформанси неколико предложених модела различитих типова и структура,
- развој софтвера: изведено је пројектовање и софтверска реализација свих приказаних модула интегралног система за оцену квалитета артикулације заснованог на интелигентним моделима,
- провера и верификација резултата у пракси: доказана је валидност оцена квалитета артикулације одабраних модела кроз њихову компарацију са

индивидуалним логопедским оценама, где су одабрани модели показали супериорност у односу на индивидуалне резултате логопеда,

- примена статистичких тестова значајности разлике перформанси нове методе за повећање репрезентативности узорака и стандардних метода у циљу њиховог рангирања,
- примена статистичких тестова корелације за компарацију тачности класификатора и логопеда при оцени квалитета артикулације гласова,
- Табеларни (нумерички) и графички приказ постигнутих резултата и њихова анализа,
- поређење постигнутих резултата са доступним резултатима добијеним применом стандардних поступака приказних у литератури,

Примењена методологија је у сагласности са стандардима научно–истраживачког рада и са циљевима дефинисаним на почетку израде дисертације.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Када се говори о применљивости остварених резултата дисертације, треба узети у обзир два главна аспекта. Први се односи на примену интегралног система за оцену квалитета артикулације, а други на примену оригиналних алата дизајнираних и коришћених за партикуларна решења у оквиру модула приказаног система.

Примена актуелног система ће значајно смањити субјективни утицај логопеда и омогућити симултано тестирање већих група пацијената које се може изводити без физичког присуства логопеда, што ће повећати доступност и ефикасност на једној страни, и смањити трошкове поступка на другој страни. Пацијенти могу да га користе за самосталну обуку и рехабилитацију или правовремену детекцију озбиљнијих поремећаја који захтевају стручни третман. Доказана висока тачност и робустност приказаног система квалификују га за примену у свеобухватном скрининг тестирању код ране детекције и дијагнозе поремећаја говора, за подршку у терапији и лечењу, праћење третмана пацијената као и код клиничких испитивања. Овај систем се може користити за аутоматизовану компаративну оцену ефикасности различитих терапијских процедура као и за едукацију и тренинг логопеда, повећавајући простор за њихову креативније ангажовање. Систем такође представља значајан допринос у оквиру е-логопедије што му је једна од предвиђених намена. Позната карактеристика учећих интелигентних система, у које спада и систем приказан у дисертацији, јесте способност генерализације која је условљена величином обучавајућег узорка, што значи да повећање базе знања омогућава формирање еталона за оцену квалитета артикулације гласова српског језика применом овог система. Ова карактеристика система указује на његов значај за формирање поузданијег критеријума одлучивања у неизвасним ситуацијама и општи значај за логопедску праксу.

Захтевана висока тачност и робустност актуелног система, као доказ његове сврсисходности, захтевали су, поред избора акустичких обележја високе информативности, развој оригиналне методе за повећање репрезентативности обучавајућег узорка и развој оригиналног алгорита за избор оптималног подскупа из скупа обучених класификатора, у циљу остварења захтеваних перформанси система.

Приказана ДББ метода за повећање репрезентативности обучавајућих узорака представља методу са најопштијим приступом овом проблему и доказаним предностима у поређењу са стандардним методама о овој области, па њена примена нема ограничења у смислу интеракције са различитим типовима класификатора. Метода је заснована на теорији информација и припада области информативних технологија које током задњих деценија доживљавају праву експанзију, захваљујући



пре свега развоју рачунарства а затим интернета и мобилне телефоније. Оперативна манифестација дејства ДББ алгоритма на реалне узорке се огледа на контролисаном уклањању примерака из простора њихове велике густине праћеним контролисаном синтетичким генерисањем примерака у областима мале густине чиме се оригинални узорак мале репрезентативности приближава структури максималне ентропије и високе репрезентативности.

Алгоритам за избор оптималног подскопа из ансамбла обучених вишеслојних перцептрона или класификатора генерално, представља оригинално решења за повећање тачности и робустности модела током процеса класификације. Овај алгоритам се заснива на исцрпном претраживању подскупова обучених класификатора мале кардиналне вредности у односу на цео ансамбл, који имају боље перформансе у односу на ансамбл. Алгоритам сам по себи такође компензује утицај неуравнотеженог обучавајућег скупа на перформансе класификатора. Примена овог алгоритма нема ограничења у домену класификације узорака и то потврђује његов практични значај.

Информативност акустичких обележа, која карактеришу различите класе квалитета артикулације гласова, условљена је сепарабилношћу њихових хистограма, односно функција густине вероватноће. Степен преклапања кривих густине вероватноће обележја различитих класа квалитета стоји у негативној корелацији са њиховом сепарабилношћу, односно информативношћу. Овај критеријум је био један од важнијих при избору вектора обележја за различите проблеме класификације током истраживања (ВАД, Сегментација, Оцена артикулације) па се његова употреба може проширити без ограничења на цео домен класификације узорака.

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

Кандидат, мр Драшко Фурунџић, показао је израдом ове дисертације систематичност у раду, способност за препознавање отворених питања, како оних од општег значаја у науци, тако и оних актуелних у ужој области којом се бави; показао је, такође, висок степен самосталности при анализи и решавању дефинисаних проблема. Генерални и мултидисциплинарни приступ истраживању, који подразумева теоријски аспект, осмишљен експериментални рад, развој оригиналних метода, развој софтверских алата као и пројектовање сложених интелигентних система применљивих у пракси потврђују свестраност, компетентност и оспособљеност истраживача за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси које је кандидат мр Драшко Фурунџић остварио током истраживања приказаних у овој дисертацији су следећи:

1. Истражена је проблематика детерминације и карактеризације акустичких атрибута високог степена информативности, као и дефиниција њихових мера за ВАД детекцију говорне активности, сегментацију речи и оцену квалитета артикулације гласова.
2. Истражене су могућности успостављања математичког модела кореспонденције између вредности вектора акустичких обележја и нумеричких индикатора класа различитог квалитета артикулације,
3. Развијена је нова метода у домену информационих технологија која је намењена балансирању расположивог обучавајућег узорака у циљу повећања његове

- репрезентативности. Метода је заснована на максимизацији ентропије узорака и одликује се највишим степеном општости приступа проблему.
4. Развијена је нова метода за индиректни приказ функције густине вероватноће узорака у вишедимензионалном простору атрибута, што представља допринос и у области примењене математике и информационих наука.
  5. Развијен је нови алгоритам у домену интелигентних система, намењен повећању тачности и робустности учећих система за класификацију узорака. Алгоритам се заснива на избору оптималног подскупа из ансамбла обучених класификатора са бољим перформансама у односу на оригинални ансамбл. Створени су услови за формирање еталона за оцену квалитета артикулације гласова српског језика као поузданог критеријума одлучивања у неизвесним ситуацијама што представља значајан научни и практични допринос у логопедији.
  6. Пројектован је и реализован интелигентни систем флексибилне, модуларне структуре и високих перформанси, који генерише оцену квалитета артикулације на већем нивоу тачности у односу на индивидуалну тачност логопеда, што потврђује његову практичну вредност. Модуларност система, условљена мултидисциплинарношћу решаваних проблема, даје могућност даље надоградње и развоја. Пројектовани систем је оригиналан и самостално остварени допринос, који са осталим наведеним научним резултатима чини јединствену целину, истичући њихов значај и употребљивост, и потврђујући валидност њихових теоријских основа.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Мултидисциплинарни приступ реализацији рачунарског модела логопедског процеса оцене квалитета артикулације, која је спроведена током истраживања у оквиру дисертације, дао је неколико научних резултата који припадају областима интелигентних система, информационих наука и технологија, примењене математике и логопедије.

У области интелигентних система дата су два научна доприноса. Први се односи на пројекцију математичког модела кореспонденције између вредности вектора акустичких обележја и нумеричких индикатора класа различитог квалитета артикулације. Модел је реализован приступом препознавања облика, применом ансамбла неуронских мрежа. Други се односи на дизајнирани алгоритам у домену интелигентних система, намењен повећању тачности и робустности система за класификацију узорака. Алгоритам се заснива на оригиналном приступу избору оптималног подскупа из ансамбла обучених класификатора са бољим перформансама у односу на оригинални ансамбл. Комбинација ансамбла обучених бинарних гарантује већу тачност од појединачних класификатора. Ова чињеница представља основ за избор коришћеног оптималног ансамбла чији је математички модел приказан у дисертацији. Експериментална компаративна анализа предложених модела потврдила је претпоставке о њиховој ефикасности

У областима информационих наука и технологија, дата су два доприноса. Први се односи на процес детерминације акустичких атрибута високог степена информативности за ВАД детекцију говорне активности, сегментацију речи на фонеме и оцену квалитета артикулације. Уочена је позитивна корелација између информативности и сепарабилности акустичких атрибута говорних сегмената различитих класа у домену функције густине вероватноћа. Са друге стране степен преклапања функција густине вероватноћа негтивно је корелисан са сепарабилношћу, односно информативношћу инволвираних атрибута при класификацији.

Други допринос се односи на нову методу у домену намењену балансирању расположивог обучавајућег узорка у циљу повећања његове репрезентативности. Метода је заснована на трансферу дистрибутивних карактеристика правилне решетке, као еталона баланса и репрезентативности узорака, на оригиналне узорке мале репрезентативности у циљу њиховог уравнотежења. У основи методе стоји максимизација ентропије узорака, а метода се одликује највишим степеном општости приступа проблему дисбаланса. Дат је детаљан приказ математичког модела и теоријска основа методе. Велика количина података продуктованих модерним информационим системима резултирала је појавом бројних метода за екстракцију кодираног знања познатих под именом „data mining“.

Са друге стране, огромне базе података се одликују високим нивоом редунадансе која се манифестује смањењем репрезентативности узорака и зато представља проблем за такозване „data driven“ учеће моделе јер доводи до фаворизације доминантних класа или кластера података током обуке укључених класификатора, што резултује њиховом ниском тачношћу предикције. Овај проблем је толико распрострањен у пракси да је током задњих двадесетак година постао незаобилазна тема у информационим наукама позната као учење у условима неизбалансираних података (Imbalanced learning). Због значаја проблема, појавио се велики број научних радова са предлозима за парцијална и специфична „ad hoc“ решења која немају потребан степен општости. Ова чињеница је била мотив за дизајн ДББ методе, засноване на најопштијим информационим принципима за повећање репрезентативности путем максимизације ентропије обучавајућег узорка.

У области примењене математике дат је допринос који се односи на нову методу за индиректни приказ функције густине вероватноће узорака у вишедимензионалном простору атрибута. Ова метода омогућава интерни увид у расподелу инстанци у вишедимензионалним просторима, посредно преко хистограма њихових средњих локалних растојања.

У области логопедије, пројектован је и реализован интелигентни систем високих перформанси, који генерише оцену квалитета артикулације на већем нивоу тачности у односу на индивидуалну тачност логопеда, и створени услови за формирање еталона за објективну оцену квалитета артикулације гласова, што представља значајан допринос за логопедију остварен кроз објективизацију традиционалних логопедских процедура. Доказани висок степен тачности приказаног система, отвара могућност његове примене у логопедској науци и пракси.

На основу приказаних доприноса развијен је систем високог степена тачности и поузданости, какав до сада није био доступан у релевантној научној литератури.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Током истраживачког рада у области теме докторске дисертације, кандидат, магистар Драшко Фурунџић је објавио шест научних радова са SCI листе, По један из категорија M21 и M22, три поглаља у монографијама од међународног значаја, једанаест радова у зборницима конференција међународног значаја датих у целини и један рад на скуповима од националног значаја. Научни доприноси докторске дисертације Драшка Фурунџића верификовани су следећим радовима:

Рад у врхунском међународном часопису (M21):

[1] Draško **Furundžić**, Srđan Stanković, Slobodan Jovičić, Silvana Punišić, Miško Subotić, Distance based resampling of imbalanced classes: With an application example of speech quality assessment, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 64, pp 440–461, Sept. 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2017.07.001>, ISSN: 0952-1976, (IF=2,894).

Рад у истакнутом међународном часопису (M22):

[1] Radomir Naumović, Draško Furundžić, Dijana Jovanović, Milan Stošović, Gordana Basta-Jovanović, Višnja Lezaić, Application of artificial neural networks in estimating predictive factors and therapeutic efficacy in idiopathic membranous nephropathy, *Biomedicine and pharmacotherapy*, Vol. 64, pp 633-638, November 2010, doi:10.1016/j.biopha.2010.06.003, ISSN: 0753-3322, (IF=2.759).

Поглавља у монографијама међународног значаја (M14):

[1] Draško **Furundžić**, Slobodan T. Jovičić, Miško Subotić, Silvana Punišić, Optimization process classification of articulation disorders Chapter in Monography: Verbal Communication Quality, Interdisciplinary Research II, Eds: Slobodan T. Jovičić, Miško Subotić, Mirjana Sovilj, Belgrade 2013, LAAC and IEPSP, Belgrade, ISBN 978-86-81879-34-4, pp 115-131.

[2] Draško **Furundžić**, Slobodan T. Jovičić, Miško Subotić, Silvana Punišić, Imbalanced learning approach to the categorization of articulation disorders, Chapter in Monography: Verbal Communication Quality, Interdisciplinary Research II, Eds: Slobodan T. Jovičić, Miško Subotić, Mirjana Sovilj, Belgrade 2013, LAAC and IEPSP, Belgrade, ISBN 978-86-81879-34-4, pp 131-151.

[3] Draško **Furundžić**, Silvana Punišić, Miško Subotić, Acoustic features variability analysis using neural networks, Chapter in Monography: Speech and Language, Interdisciplinary Research, Eds: Jovičić T. Slobodan, Sovilj Mirjana, Belgrade 2009, LAAC and IEPSP, Belgrade, ISBN 978-86-81879-27-6, pp 188-226.

Саопштења са међународних научних скупова штампана у целини (M33):

[1] Draško **Furundžić**, Silvana Punišić, Ruzica Bilibajkić Probabilistic approach to the k nearest neighbor classifiers in the characterization of the phonemes, 6th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Speech and Language, October 27-29, 2017, Belgrade, pp. 147-153, ISBN: 978-86-89431-24-7

[2] Silvana Punišić, Miško Subotić, Draško **Furundžić**, Identificational probability functions of the perceptual recognition of affricate's and fricative's duration, 6th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Speech and Language, October 27-29, 2017, Belgrade pp. 154-167, ISBN: 978-86-89431-24-7

[3] Draško **Furundžić**, Miško Subotić, Silvana Punišić, Optimal Resampling Of Imbalanced Data: Speech Pathology Detection, 5th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Speech and Language, 17-18 October, 2015, Belgrade, pp. 282-297, ISBN: 978-86-89431-07-0.

[4] Ružica Bilibajkić, Miško Subotić, Draško **Furundžić**, Primena neuralnih mreža u detekciji patološkog izgovora srpskih glasova. Zbornik Radova XXII Telekomunikacioni Forum TELFOR, 25-27 Novembar, 2014, Beograd, ISBN: 978-1-4799-6190-0, pp 873-876.

[5] Draško **Furundžić**, Srđan Stanković, Goran Dimić, Error Signal Distribution as an Indicator of Imbalanced Data, Proceedings of Twelfth Symposium on Neural network Applications in Electrical Engineering, Neurel, November 2014, Beograd, ISBN: 978-1-4799-5887-0, IEEE Catalog Number: CFP14481-PRT, pp. 189-194.

[6] Draško **Furundžić**, Slobodan Jovičić, Miško Subotić, and Silvana Punišić, Imbalanced Learning Approach to the Categorization Articulation, In Proceedings Speech and Language, pp. 89-100, October 2013, Belgrade, ISBN 978-86-81879-45-0.

[7] Draško **Furundžić**, Slobodan Jovičić, Miško Subotić, and Đorđe Grozdić, Evaluation of Phonemes Quality Articulation Using Neural Network Ensembles In Proceedings Speech and Language, pp. 183 -190, October 2013 Belgrade, ISBN 978-86-81879-45-0.

[8] Đorđe Grozdić, Branko Marković, Jovan Galić, Slobodan Jovicic, Draško **Furundžić**, Neural Network Based Recognition of Whispered Speech, In Proceedings Speech and Language, pp. 223 -230, Belgrade, October 2013.

[9] Draško **Furundžić**, Željko Đurović, Vladimir Čelebić, and Iva Salom, Neural Network Ensemble for Power Transformers Fault Detection, Proceedings of Eleventh Symposium on Neural network Applications in Electrical Engineering, Neurel 2012, Beograd, Septembar 2012, ISBN: 978-1-4673-1571-5, IEEE Catalog Number: CFP12481-PRT, pp. 247-251

[10] Draško **Furundžić**, Slobodan Jovičić, Miško Subotić, Silvana Punišić, Acoustic Features Determination for Regularity Articulation Quantification of Serbian Fricatives, Proceedings of Eleventh Symposium on Neural network Applications in Electrical Engineering, Neurel 2012, Beograd, Septembar 2012, ISBN: 978-1-4673-1571-5, IEEE Catalog Number: CFP12481-PRT, pp. 197-201.

[11] **Furundžić**, D., Subotić, M., Punišić, S., Determination of relevant parameters influence in articulation regularity rating for Serbian phoneme “ š ” using neural networks, Speech and Language 2009, Proceedings 3rd International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Speech and Language, pp. 158-167, Belgrade, Serbia, November 2009.

Саопштења са домаћих научних скупова штампана у целини (M63):

[1] **Furundžić**, D., Subotić, M., Pantelić, S., Primena neuronskih mreža u klasifikaciji poremećaja izgovora frikativa, ETRAN 2007, AK 5.4, Herceg Novi – Igalo, juni 2007.

Регистрован патент на националном нивоу (M92):

[1] Jovičić, S., Šarić, Z., **Furundžić**, D., Subotić, M., Sistem i Postupak Za Procenu Kvaliteta Artikulacije, Zavod za Intelektualnu Svojину, broj objave RS 50395 B od 31. 12. 2009, broj prijave P 2007/0515 od 28.12. 2007. Adresa: <http://89.216.38.53/rs-pubserver/resultlist.jsp?iPage=104>

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата мр Драшка Фурунџића под насловом „Оцена квалитета артикулације гласова српског језика применом неуронских мрежа“, написана је у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који се захтевају важећим Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У оквиру дисертације, предложен је нови систем за рачунарску оцену квалитета артикулације гласова српског језика, заснован на математичком моделу апстрактног процеса логопедске евалуације квалитета артикулације испитаника. Апстрактност логопедског процеса успостављања асоцијативне кореспонденције између артикулационо-акустичких карактеристика изговорених гласова и вредности нумеричких индикатора квалитета њихове артикулације, као и изражена варијабилност поменутих карактеристика, условили су приступ заснован на препознавању облика и примени флексибилних интелигентних модела.

Примењен је низ оригиналних корака и метода за повећање тачности и поузданости система. Ту спадају: избор акустичких обележја високе информативности, повећање репрезентативности обучавајућег скупа применом оригиналне методе за балансирање узорака (ДББ) и алгоритама за избор оптималног ансамбла вишеслојних перцептрона, који поред повећања тачности предикције доприноси и повећању робустности приказаног система.

Овако осмишљен приступ омогућио је тачност система која је изнад нивоа тачности индивидуалних резултата логопеда, чиме је остварен основни циљ истраживања.

Током развоја приказаног система, кандидат је поставио теоријску основу за његову успешну реализацију, пројектовао све његове потребне компоненте, развио за то потребне методе, алгоритме, софтверске алате, извео експерименталне процедуре и извршио верификацију пројектованог система у складу са претходно дефинисаним условима. Треба посебно истаћи методолошку доследност кандидата, која, уз изузетну посвећеност научно-истраживачком раду и инвентивност у мултидисциплинарној области, гарантује и даље успешно бављење научним истраживањима.

Резултате проистекле из истраживања спроведених у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у међународним часописима са SCI листе и другим публикацијама и саопштио на скуповима међународног и националног значаја.

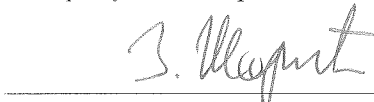
На основу свега изнесеног, Комисија закључује да је својом докторском дисертацијом „Оцена квалитета артикулације гласова српског језика применом неуронских мрежа“ кандидат мр. Драшко Фурунџић испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија са задовољством предлаже Наставно–научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се овај реферат прихвати, и у складу са законском процедуром упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

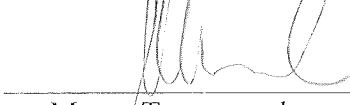
Београд, 31. 05. 2018.


#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

  
др Срђан Станковић, професор емеритус Универзитета у  
Београду – Електротехнички факултет

  
др Жељко Туровић, редовни професор Универзитета у  
Београду – Електротехнички факултет

  
др Зоран Шарић, научни саветник, Центар за Унапређење  
Животних Активности, Баоград

  
др Мило Томашевић, редовни професор Универзитета у  
Београду – Електротехнички факултет

  
др Мишко Суботић, научни сарадник, Институт за  
експерименталну фонетику и патологију говора, Београд