

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата дипл. инж. електротехнике Мохамеда Мароуфа.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду бр 5048/11-3 донетој на 818. седници одржаној 10.10.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Мохамеда Мароуфа под насловом

**Апроксимација и адаптивно смањење високофреквентног шума у ЕКГ сигнаlima**

односно

**High Frequency Noise Approximation and Adaptive Reduction in the ECG signals**

После прегледа достављене Дисертације и пратећег материјала, као и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

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

Кандидат је уписао докторске студије у школској 2011/12. години на Електротехничком факултету у Београду, са почетком у пролећном семестру. Тему под насловом „Апроксимација и адаптивно смањење високофреквентног шума у ЕКГ сигнаlima“ пријавио је 30.03.2017. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је на 812. седници одржаној 11.04.2017. године, Одлуком бр. 5048/11-1 од 25.04.2017. године, именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Лазар Сарановац, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Милан Прокин, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Миодраг Поповић, редовни професор у пензији (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Мирјана Поповић, редовни професор у пензији (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Јелена Поповић-Божовић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Извештај комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације је усвојен на 816. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета одржаној

04.07.2017. године, Одлуком бр. 5048/11-2 од 04.07.2017. године. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предложену тему докторске дисертације на 8. седници одржаној 28.08.2017. године, Одлуком бр 61206-3007/2-17 од 28.08.2017. године.

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 28.09.2017. године, а Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на 818. седници одржаној 10.10.2017. године, Одлуком бр 5048/11-3 од 20.10.2017. године, именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: др Лазар Сарановац, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Милан Прокин, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Миодраг Поповић, редовни професор у пензији (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Мирјана Поповић, научни саветник (Универзитет у Београду - Институт за медицинска истраживања), др Јелена Поповић-Божовић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

### **1.2. Научна област дисертације**

Дисертација обухвата развој и имплементацију нових алгоритама за апроксимацију нивоа и адаптивно уклањање шума у ЕКГ сигнаlima. У оквиру дисертације је исто предложена нова архитектура уређаја за снимање ЕКГ сигнала. С тим у виду дисертација припада научној области Техничких наука - електротехнике, а у ужем смислу научној области Електроника.

За ове области матичан је Електротехнички факултет. Ментор дисертације је др Лазар Сарановац, професор на Електротехничком факултету Универзитета у Београду због значајних научних доприноса у области теме докторске дисертације, посебно у области наменских рачунарских система и дигиталној обради сигнала.

### **1.3. Биографски подаци о кандидату**

Мохамед Мароуф је рођен 08.07.1986. године у месту Rabow у Сирији. Основну школу је завршио у месту Rabow 2000. године а средњу у месту Masauf 2004. године. Уписао је Електротехнички факултет 2004. године у Алепу где је дипломирао 2009. године на одсеку за електронику-рачунарски инжењеринг са просеком 76.6%, што се сматра као врло добар просек на факултету. Дипломски рад под називом “Distributed Data base System Realization” је одбранио са оценом 93 под менторством др. Хиана Хоусрама. Служио је војску у Сиријској Армији од 2010. до 2011. године, где је делимично радио на образовању нових кадета у предметима базичних електроника и рачунарства.

Добио је стипендију да заврши докторску дисертацију у Србији у оквиру програма “Свет у Србији”. Српски језик је учио у периоду од 1 фебруара до 5 јула 2011. године. Мохамед Мароуф је уписао докторске студије 2011. године на Електротехничком факултету у Београду. Ментор на докторским студијама му је био др. Лазар Сарановац, ванредни професор.

Област истраживања Мохамеда Мароуфа обухвата дигиталну обраду биомедицинских сигнала, машинско учење и биоинформатику. Досадашње резултате приказао је у неколико публикација. Током досадашњег научно-истраживачког рада објавио је један рад категорије M22 у истакнутом међународном часопису, и један рад категорије M23 у међународном часопису, на којима је први аутор.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на енглеском језику и садржи 128 страна куцаног текста, 73 слике, 9 табела и 126 библиографских референци. Дисертација садржи насловну страну, кратак резиме на српском и енглеском језику, садржај, 7 поглавља и списак коришћене литературе. Наслови поглавља докторске дисертације су:

1. Увод
2. Кардиолошка физиологија
3. Извори и мерење шума у ЕКГ сигнаlima
4. *Short-time* апроксимација нивоа шума у ЕКГ сигнаlima
5. Адаптивно уклањање шума у ЕКГ сигнаlima
6. Интеграција алгоритама у вишенаменски ЕКГ телеметријски систем
7. Генерални закључак и предлог будућих истраживања.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводној глави дисертације изложени су основни проблеми које је кандидат дотакао током свог истраживања. Анализирани су правци истраживања присутни у литератури, и приказана је основна мотивација за израду дисертације. Посебно су представљени нови алгоритми за *short time* апроксимацију шума и коришћење овог приступа за адаптивно уклањање високофреквентног шума из ЕКГ сигнала. На крају уводног поглавља дат је преглед структуре и доприноса дисертације.

У другој глави дисертације дат је увод у кардиолошку физиологију. Прво су представљени основни појмови из анатомије срца и његова структура. Након тога је дат преглед система рада срца чија се активност прати када се снимају ЕКГ сигнали. Преглед је урађен у циљу бољег разумевања система чије активности се мере као ЕКГ сигнал. Затим су приказани различити системи и режими за снимање ЕКГ сигнала као и њихове примене у дијагностици срчаних болести. Такође су представљени најактуелнији проблеми асоцирани са анализом сигнала из различитих режима. На крају овог поглавља је представљен стандардни начин анализе ЕКГ сигнала као и главни изазови повезани са аутоматском анализом.

Анализа извора и карактеристике шума који утичу на ЕКГ сигнале и на њихов дијагностички потенцијал је дата у првом делу трећег поглавља. Посебно су представљене карактеристике и особине високофреквентног шума у ЕКГ сигнаlima у које спада и ЕМГ шум. Анализирани особине су нестационарност, обојеност, и спектрално преклапање са аритмијом. Након тога је дат преглед, систематизација и анализа постојећих алгоритама за естимацију нивоа шума у ЕКГ сигнаlima. У овом прегледу су описани најпопуларнији алгоритми који се користе за ту сврху. Кандидат је на крају трећег поглавља назначио важност методе за апроксимацију шума у ЕКГ сигнаlima у *short-time* и *time-invariant* облику.

Поглавље четири је посвећено предложеној методи за апроксимацију нивоа шума у ЕКГ сигнаlima, са посебном пажњом на карактеристике шума у ЕКГ сигнаlima. Анализирани је и представљена метода за коришћење коефицијената *Stationary Wavelet Transform* (SWT) за детекцију несигналних компоненти. У овом поглављу је представљена и емпиријска анализа урађена у циљу обезбеђивања поуздане перформансе алгорита у присуству аритмија. Затим су презентовани резултати

наведеног алгоритма и његова евалуација са различитим сигналимa са реалним и симулираним шумовима у присуству аритмија. На крају овог поглавља су предложене примене сигнала који је издвојен као апроксимација шума за различите сврхе у процесу анализе ЕКГ сигнала.

Кандидат је у петом поглављу приказао примену сигнала за апроксимацију нивоа шума у методологијама за адаптивно уклањање шума из ЕКГ сигнала. Прво је дат преглед најпопуларније методологије за адаптивно филтрирање шума из ЕКГ сигнала. Затим су представљене две нове методологије. Прва методологија, базирана на банки филтара, је имплементирана и урађена је њена евалуација. Друга методологија је само представљена као предлог измене у архитектури оригиналног алгоритма за адаптивно *Wavelet Wiener* филтрирање. Валидација имплементираних алгоритма базирана на банки филтара је урађена са реалним сигналимa у присуству аритмија.

У шестом поглављу је представљен дизајн као и имплементација вишенаменског ЕКГ снимача који је развијен у циљу да се омогући снимање у различитим режимима рада са истим уређајем. Интеграција алгоритма за анализу ЕКГ сигнала предложених у дисертацији је дата у три апликације за анализу ЕКГ сигнала: једна апликација за мобилни телефон, као и две апликације које раде анализу на посебним серверима за анализу сигнала снимљених у телеметријском систему.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација кандидата Мохамеда Мароуфа у ужем смислу припада области дигиталне обраде биомедицинских сигнала и биомедицинског инжењерства. Предмет истраживања ове докторске дисертације је развој алгоритма за естимацију и адаптивно уклањање шума у ЕКГ сигналимa. Други део дисертације припада области наменских биомедицинских система. Предложена је нова архитектура уређаја за снимање ЕКГ сигнала са различитим режимима рада као и са различитим типовима електрода.

Познато је да је шум увек присутан у ЕКГ сигналимa без обзира на врсту или режим снимања. То важи и за високофреквентни шум и ЕМГ шум који су главне теме ове дисертације. Адаптивна апроксимација високофреквентног шума представљена у овој дисертацији је нови приступ за решавање овог проблема. Предложени алгоритми су развијени са пажњом на карактеристике наведене врсте шума у ЕКГ сигналимa као што су нестационарност, обојеност и преклапање са ЕКГ сигналимa у фреквентном домену. Аритмије, и вероватноћа погрешне класификације аритмије као шум је такође анализирана и узета у обзир. То повећава поузданост и применљивост наведених алгорита за естимацију или апроксимацију шума као и за филтрирање шума из снимљеног сигнала.

Имајући у виду значај проблема присуства шума у ЕКГ сигналимa, као и шире коришћење уређаја за снимање у различитим режимима, за различите сврхе, у комерцијалним телеметријским системима, тема ове дисертације је важна за развој ове области.

Поред анализе и апроксимације шума на *time-invariant short-time* начин, један од циљева дисертације је и адаптивно уклањање шума из ЕКГ сигнала са циљем обезбеђивања поузданог сигнала за дијагнозу. У ту сврху је предложено коришћење апроксимације шума као водећег сигнала за контролисање алгоритма филтрирања. Две

методе су предложене и једна од њих је имплементирана и валидирана на реалном уређају. Шумови који су коришћени за евалуацију реализованог алгоритма су они који се користе у литератури за евалуацију сличних алгоритама. Исто тако су коришћени реални ЕКГ сигнали са различитим аритмијама. Показано је како коришћење референтног сигнала издвојеног као апроксимација шума може да повећа поузданост и тачност филтрирања. То обезбеђује добијање најбољег односа између потискивања QRS комплекса и побољшање квалитета сигнала.

Део истраживања је посвећен и унапређивању постојећих уређаја ради постизања бољих перформанси и применљивости у различитим ситуацијама снимања ЕКГ сигнала. Разматрани су проблеми у постојећим решењима и предложена су нова решења. Посебан алгоритмски приступ је дат за решавање проблема који је повезан са новом архитектуром.

Предложена тема докторске дисертације припада актуелној и значајној области обраде биомедицинских сигнала, о чему говори велики број радова публикованих у најзначајнијим међународним часописима у протеклих неколико година.

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

Током израде дисертације кандидат је детаљно истражио постојећу релевантну литературу и коректно навео радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је укупно 126 библиографских референци. Литература садржи најновије радове релевантне за проблематику истражену у дисертацији, при чему је Мохамед Мароуф аутор или коаутор 3 рада.

### **3.3. Опис и адекватност примењених научних метода**

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се у следећем:

- Детаљно је анализирана постојећа литература у области естимације и апроксимације шума у ЕКГ сигнаlima и дате су релевантне анализе тих алгоритама. Преглед је урађен са циљем налажења предности и мана сваке од прегледаних метода. Након тога су представљени проблем и циљеви дисертације кандидата.
- Анализиране су математичке основе за појаве пролазака кроз нулу (*zero-crossings*), локалних максимума (*peaks*) и локалних минимума (*valleys*). Потврђено је да се варијације амплитуда у ЕКГ сигнаlima рефлектују у детаљима *Stationary Wavelet Transform* (SWT) алгоритма примењеног на ЕКГ сигнал, кроз различите нивое пролазака кроз нулу, локалних максимума и локалних минимума.
- Развијање *translation-invariant short-time* апроксимације шума је постигнуто користећи SWT коефицијенте након примене мултирезолуцијске анализе на издвојене компоненте сигнала у временском домену. Коришћене компоненте су проласци кроз нулу, локални максимуми и локални минимума.
- Емпиријска студија је урађена на издвојени сигнал у циљу додавања глобалног знања из различитих аритмија. То повећава поузданост и применљивост развијеног алгоритма за апроксимацију шума.

- Урађен је преглед најпопуларнијих метода за адаптивно уклањање шума из ЕКГ сигнала. Посебна пажња посвећена је савременој литератури која се бави применом адаптивног *Wavelet Wiener* филтрирања у циљу повећања поузданости тог филтра. Прегледом доступне литературе идентификовани су отворени проблеми који постоје у овој области.
- Развијен је алгоритам за апроксимацију нивоа шума у циљу адаптивног филтрирања сигнала од високофреквентног шума. Имплементација је базирана на банки филтара.
- Спроведено је тестирање и евалуација алгоритма за филтрирање базираног на банки филтара.
- Урађена је имплементација алгоритма за адаптивно филтрирање и апроксимацију шума у процесу анализе сигнала добијеног из предложеног уређаја.
- Предложена је архитектура система за снимање ЕКГ сигнала у различитим режимима рада на бази доступне технологије.
- Спроведено је тестирање и евалуација развијеног система, кроз најкоришћеније метрике у литератури за валидацију таквих система.

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

#### **3.4. Применљивост остварених резултата**

Дисертација садржи више оригиналних доприноса значајних како за теоријски аспект области процесирања ЕКГ сигнала, тако и за практичне имплементације биомедицинских система за снимање и аутоматску анализу ЕКГ сигнала. Проблеми решавани у дисертацији су актуелни и битни су са становишта практичне примене, поготово имајући у виду ширење коришћења ЕКГ система у телемедицини и проблеме повезане са аутоматском анализом због присуства шума у анализираним сигнаlima. Значај естимације, или апроксимације, шума је један од најзначајнијих истраживачких изазова у области обраде и анализе ЕКГ сигнала.

Сд алгоритма филтрирања који је базиран на коришћењу апроксимације шума се очекује поуздан резултат за анализу и побољшавање перформанси осталих алгоритама за детекцију и класификацију откуцаја срца.

Предложена архитектура уређаја омогућава снимање ЕКГ сигнала у различитим режимима рада са истим уређајем. Потенцијални проблеми у анализи снимљених сигнала у тим режимима су решени коришћењем посебних техника за анализу сигнала у зависности од типа снимања и врсте електрода.

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

Кандидат је приликом израде дисертације показао способност за препознавање отворених питања у научној литератури и зрелост при анализи и решавању проблема. Кандидат је у дисертацији пружио решења отворених проблема који су постојали у литератури и унапредио нека постојећа решења. Доприноси дисертације у овој области су оригинални, савремени и потврђују способност кандидата за самосталан успешан научно-истраживачки рад.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос докторске дисертације огледа се у развоју апроксимације и адаптивног филтрирања шума у ЕКГ сигнаlima, као и нова архитектура уређаја за снимање ЕКГ сигнала у различитим режимима рада. Конкретно научни доприноси остварени у дисертацији су следећи:

- Развијен је нови оригинални алгоритам за транслационо инваријантну апроксимацију високофреквентног шума у ЕКГ сигнаlima. Перформанса алгоритма верификована је са неколико реалних аритмија које могу да се појаве у ЕКГ сигнаlima.
- Емпиријски су процењене доња и горња граница нивоа шума које су коришћене за нормализацију сигнала апроксимације шума. Коришћени су ЕКГ сигнали са различитим аритмијама у циљу налажења најбољих аутоматских параметара за контролу предложеног алгоритма.
- Предложене су примене новог алгоритма за апроксимацију шума у различитим деловима процесирања ЕКГ сигнала.
- Имплементиран и валидиран је нови оригинални алгоритам за адаптивно уклањање шума у ЕКГ сигнаlima користећи банку филтара. Коришћење референтног сигнала, апроксимације шума издвојеног као апроксимација нивоа шума кроз време, као водећег сигнала који контролише ниво филтрирања, је предложено. То омогућава очување компоненти QRS комплекса у релативно чистим деловима сигнала, а у исто време филтрирање делова сигнала са побољшаним односом између потискивања QRS комплекса и побољшање квалитета сигнала. Перформанса алгоритма је илустрована и тестирана са неколико реалних аритмија који се појављују.
- Предложена је модификација оригиналног алгоритма за адаптивно *Wavelet Wiener* филтрирање која побољшава перформансе тог алгоритма, поготово за кратке ЕКГ сигнале.
- Нова архитектура уређаја за снимање ЕКГ сигнала са различитим режимима рада је предложена и реализована. Уређај је коришћен за снимање ЕКГ сигнала са различитим типовима електрода. Урађена је имплементација алгоритма за адаптивно филтрирање и апроксимацију шума у процесу анализе сигнала добијеног из предложеног уређаја.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у циљеве истраживања, полазне претпоставке и остварене резултате констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва значајна питања из проблематике која је анализирана у дисертацији.

Развијени алгоритми за апроксимацију нивоа високофреквентног шума у ЕКГ сигнаlima и примена таквог алгоритма за адаптивно филтрирање представљају значајан научни и практични допринос у области обраде биомедицинских сигнала. Реализована нова архитектура уређаја за снимање ЕКГ сигнала са различитим режимима рада је такође показатељ за практичне вредности истраживања кандидата Мохамеда Мароуфа.

### **4.3. Верификација научних доприноса**

У току истраживачког рада у области теме докторске дисертације Мохамед Мароуф је као аутор или коаутор објавио два рада у међународним часописима са SCI листе, један категорије M22 а други категорије M23, у којима је првопотписани аутор. Поред тога, резултате приказане у дисертацији кандидат је објавио и у раду који је презентовао на конференци међународног значаја категорије M33.

Анализом резултата приказаних у дисертацији и у радовима које је објавио кандидат, констатујемо да су приказани оригинални и савремени резултати.

#### **Часописи међународног значаја (M20):**

##### Категорија M22

[1] Mohamed Marouf, Lazar Saranovac, Goran Vukomanović, "Algorithm for EMG noise level approximation in ECG signals", *Biomedical Signal Processing and Control* (ISSN: 1746-8094), Volume 34, 1 April 2017, Pages 158-165, DOI: 10.1016/j.bspc.2017.02.002, (IF(2016):2.399) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1746809417300289>

##### Категорија M23

[2] Mohamed Marouf, Lazar Saranovac, Goran Vukomanović, Miroslav Božić "Multi-purpose ECG telemetry system", *Biomedical Engineering Online* (ISSN: 1475-925X), Volume 16, Issue 1, 19 June 2017, Article number 80, DOI: 10.1186/s12938-017-0371-6, (IF(2016): 1.683) <https://biomedical-engineering-online.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12938-017-0371-6?site=biomedical-engineering-online.biomedcentral.com>

#### **Међународне конференције (M30):**

##### Категорија M33

[1] Mohamed Marouf, Lazar Saranovac, "Adaptive EMG Noise Reduction in ECG Signals using Noise Level Approximation", *Proc. SPIE 10613, 2017 International Conference on Robotics and Machine Vision*, DOI: 10.1117/12.2299841 <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10613/2299841/Adaptive-EMG-noise-reduction-in-ECG-signals-using-noise-level/10.1117/12.2299841.short?SSO=1>

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

Докторска дисертација дипл. инж. Мохамеда Мароуфа под насловом „Апроксимација и адаптивно уклањање високофреквентног шума у ЕКГ сигнаlima“ односно „High Frequency Noise Approximation and Adaptive Reduction in the ECG signal“ је написана на енглеском језику и у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У дисертацији је представљена нова метода за апроксимацију шума кроз референтни сигнал који ће пратити присуство шума у ЕКГ сигнаlima у временском домену. Главни део ове дисертације представља примену тог референтног сигнала у оквиру адаптивног уклањања ЕМГ шума. Уклањање шума је урађено тако што се референтни сигнал, издвојен као апроксимација шума у времену, користи за контролу нивоа филтрирања. Резултати алгорита за апроксимацију нивоа шума прво су



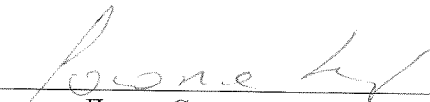
упоређени са најпознатијим методама за естимацију и апроксимацију нивоа шума, а након тога су коришћене друге метрике у циљу верификације. Верификација реализованог алгоритма за адаптивно филтрирање је такође урађена у циљу евалуације перформанси. Предложена нова архитектура уређаја за снимање сигнала у различитим режимима рада је оригинални допринос који потврђује и рад који је кандидат објавио.


Резултате проистекле из истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у два рада публикована у међународним часописима са SCI листе и презентовао стручној јавности на међународној конференцији из области обраде биомедицинских сигнала. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија констатује да дисертација „Апроксимација и адаптивно уклањање високофреквентног шума у ЕКГ сигналама“ дипл. инж. Мохамед Мароуфа садржи оригиналне научне доприносе.


На основу претходног Комисија констатује да је Мохамед Мароуф, дипломирани инжењер електротехнике, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета 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.

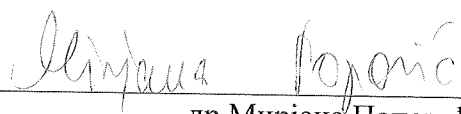
У Београду, 25.12.2017. године

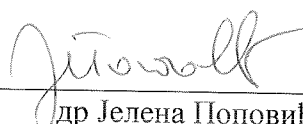
#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

  
ментор, др Лазар Сарановац, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Милан Прокин, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Миодраг Поповић, редовни професор у пензији  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Мирјана Поповић, научни саветник  
Универзитет у Београду – Институт за медицинска истраживања

  
др Јелена Поповић-Божовић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет