

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Горана Ђукића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета донетом на седници број 799 одржаној 24.05.2016. године (број одлуке 879/3 од 1.6.2016. године), именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата магистра Горана Ђукића, дипломираног електроинжењера под насловом

### **„Робусна обрада сигнала у електроенергетским системима“**

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

19.11.2002. године, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, кандидат мр Горан Ђукић одбранио је магистарски рад под насловом „Прорачун редних асиметрија синхроне машине у временском домену“.

25.9.2011. године кандидат мр Горан Ђукић пријавио је тему за израду докторске дисертације под насловом „Робусна обрада сигнала у електроенергетским системима“.

1.11.2011. године Наставно-научно веће на седници број 738 (број одлуке 879/1 ) именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу:

др Бранко Ковачевић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

др Никола Рајаковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

др Зоран Радојевић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

др Драгутин Саламон, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет и

др Филип Кулић, ванредни професор, Универзитет у Новом Саду – Факултет Техничких наука.

17.1.2012. године Наставно-научно веће на седници број 742 (број одлуке 879/2) је усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

27.2.2012. године Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом: „Робусна обрада сигнала у електроенергетским системима“ (број одлуке 06-17338/21-12 од 27.2.2012. године). За ментора је одређен др Бранко Ковачевић, редовни професор на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет.

5.5.2016. године кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену.

10.5.2016. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

24.5.2016. године Наставно-научно веће Електротехничког факултета на седници број 799 (број одлуке 879/3 од 1.6.2016. године), именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у следећем саставу:

др Бранко Ковачевић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

др Никола Рајаковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

др Драгутин Саламон, ванредни професор у пензији, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

др Предраг Стефанов, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет и

др Александар Чукарић, ванредни професор, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици – Факултет техничких наука у Косовској Митровици.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата мр Горана Ђукића припада научној области Техничке науке – Електротехника, ужа научна област Управљање и обрада сигнала у електроенергетским системима. За ментора дисертације одређен је др Бранко Ковачевић, редовни професор на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет, због истакнутих научних и стручних доприноса у ужој области Управљања и обради сигнала у електроенергетским системима, а посебно у подобласти робусне обраде сигнала, којом се бави предметна дисертација.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Горан Ђукић је рођен 10.1.1968. године у Добоју где је завршио основно и средњешколско образовање током којих је био ђак генерације и носилац дипломе Огњен Прица. Након тога уписан је на Електротехнички факултет у Београду, Енергетски одсек-смер Електроенергетски системи, који је завршио 1996. године са просечном оценом 9.13 и оценом 10 на Дипломском раду са темом „Моделовање и анализа хидроелектрана високог пада са Пелтоновим турбинама“ под менторством проф. др Милана Ђаловића из предмета Регулација електроенергетских система. Последипломске студије на Електротехничком факултету у Београду на смеру Електроенергетске мреже и системи уписао је 1997. године и на истим је положио све предвиђене испите са просечном оценом 10. Магистарски рад на тему „Прорачун редних асиметрија синхроне машине у временском домену“ одбранио је 19.11.2002. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Ментор при изради магистарског рада био је проф. др Миленко Ђурић. За овај рад Горан Ђукић је награђен наградом Привредне коморе града Београда за најбољи Магистарски рад школске 2002./2003. године.

Непосредно по завршетку Електротехничког факултета у Београду, јануара 1997. године, почео је да ради као истраживач на овом факултету, на Катедри за електроенергетске системе, а 7.10.1997. године изабран је за асистента приправника при истој Катедри. У звање асистента на Катедри за електроенергетске системе Електротехничког факултета у Београду изабран је 25.9.2003. На Електротехничком факултету у Београду држао је аудиторне вежбе из следећих предмета: Елементи електроенергетских система, Електране и разводна постројења, Разводна постројења, Релејна заштита, Технички системи управљања електроенергетским системима и дистрибутивним електроенергетским системима (формирао је прве аудиторне вежбе на овом предмету), Регулација електроенергетских система, Квалитет електричне енергије, Аутоматизација дистрибутивних мрежа (формирао је прве аудиторне вежбе на овом предмету). Такође, на Електротехничком факултету у Београду учествовао је у извођењу лабораторијских вежбања из следећих предмета: Електрична мерења (Енергетски одсек), Мерења у електроенергетици, Техника високог напона, Релејна заштита, Лабораторијске вежбе из електроенергетских система. На Енергетском одсеку Електротехничког факултета у Бањој Луци формирао је и држао аудиторне вежбе из следећих предмета: Електране, Електромоторни погони, Системи заштите у електроенергетици и Електроенергетика а био је и један од креатора у формирању Лабораторије за релејну заштиту-прве лабораторије Енергетског одсека на овом факултету.

У периоду од 2003. године до данас ангажован је у пословно-техничком сегменту сарадње са једном од водећих светских компанија из области савремених система заштите и управљања високонапонским објектима електроенергетских система, компанијом SEL-Schweitzer Engineering Laboratories Ins., USA. Сарадња се одвија у два правца: један правац представља дизајнирање и развој нових производа и решења а други правац је у сегменту инжењеринга система заштите и управљања у електроенергетици. У овом контексту, у више наврата боравио је у USA због стручног усавршавања и реализације заједничких развојних пројеката. Сарадња се реализује кроз домаћу компанију Saturn Electric d.o.o. Београд, једну од водећих српских компанија у области заштите и управљања трансформаторским станицама високог напона, на пројектима тржишта Србије, ширег региона као и на другим значајним светским тржиштима (земље Европске Уније, земље бившег Совјетског Савеза, земље Блиског Истока).

Области којима се Горан Ђукић бави у свом научноистраживачком раду су: савремени системи заштите и обрада сигнала у електроенергетици; координација система електричних заштита; системи за управљање, надзор и мониторинг у разводним постројењима високог напона; концепције високонапонских разводних постројења и њихових компоненти; аутоматизација дистрибутивних мрежа; квалитет и рационално коришћење електричне енергије; синхроне машине. Редован је члан, за сегменте заштите и управљања у електроенергетским системима, у оквиру српских секција и стручних комитета CIGRE (Б5 Заштита и аутоматизација) и CIREN (СТК 3 Управљање и заштита), од 1998. године до данас. Рецензент је радова за српске конференције CIGRE и CIREN као и за домаће часописе Електропривреда и Електродистрибуција.

Аутор/коаутор је: два приручника за извођење редовне наставе на Енергетском одсеку Електротехничког факултета у Београду (Лабораторијске вежбе из електричних мерења, Академска мисао, Београд, 1999. године и Лабораторијске вежбе из мерења у електроенергетици, Академска мисао, Београд, 1999. године), 3 рада публикована у међународним часописима са SCI листе (први аутор је два рада публикована у научним часописима међународног значаја категорије M22), 10 радова публикованих у часописима националног значаја, 11 радова публикованих у зборницима међународних научних скупова, 53 рада публикована у зборницима скупова националног значаја, два Интерна стандарда од националног значаја (Заштитни уређаји у електранама, ЕПС Интерни стандард ИС 03, Април 2016. године и Координација заштитних уређаја електрана и преносне мреже, ЕПС Интерни стандард ИС 06, Април 2016. године), 40 студија и елабората, 120 пројеката. Горан Ђукић је био део истраживачког тима на следећим пројектима од националног значаја:

1. „Развој и примена метода и уређаја у циљу смањивања оперативних трошкова електроенергетског система као и у циљу рационалног коришћења енергије“, пројекат Министарства за науку и технологију Републике Србије, број пројекта С.2.08.22.0161, 1998-2000. године, руководилац проф. др Никола Рајаковић.
2. „Развој интегрисане дигиталне заштите дистрибутивних одвода“, пројекат Министарства за науку и технологију Републике Србије, број пројекта ЕТР.6.04.0139.Б, 2002-2004. године, руководилац проф. др Миленко Ђурић.
3. „Анализа енергетских карактеристика клима уређаја и њихов утицај на електроенергетски систем“, демонстрациони пројекат из Националног програма енергетске ефикасности Републике Србије, број пројекта 252001, 2005-2006. године, руководилац проф. др Миленко Ђурић.
4. „Ревитализација система уљно-папирне изолације енергетских трансформатора“, пројекат Министарства науке и заштите животне средине Републике Србије, број пројекта ТР-6604Б, 2005-2007. године, руководилац проф. др Радован Радосављевић.
5. „Обновљиви извори енергије и конвенционални електроенергетски систем Србије“, пројекат Министарства науке и заштите животне средине Републике Србије, број пројекта ТР 18023А, 2008-2010. године, руководилац проф. др Никола Рајаковић.
6. „Интелигентне енергетске мреже“, пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, број пројекта Ш42009, 2012-2015. године, руководилац проф. др Никола Рајаковић.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Робусна обрада сигнала у електроенергетским системима“ представља оригинално решење обраде сигнала развијеним робусним алгоритмом у свим подсистемима савремених електроенергетских система: производњи, преносу и дистрибуцији електричне енергије. Дисертација је написана на српском језику, ћириличним писмом, на 267 страна и садржи 133 слике и 10 табела. Подељена је на 7 поглавља: 1. Увод; 2. Опште поставке примене робусних метода обраде сигнала у електроенергетском систему; 3. Робусна обрада сигнала; 4. Адаптивни рекурзивни М-робусни алгоритам (АРМР алгоритам) идентификације параметара сигнала у реалном времену; 5. Робусна естимација параметара сигнала мултиваријабилног система у временском домену; 6. Примена и верификација АРМР алгоритма у обради сигнала у електроенергетском систему; 7. Закључак; и има 11 прилога и референце. У списку коришћене литературе налази се 88 референци коришћених за разматрање проблема и приказ тренутног стања у области обраде сигнала у електроенергетским системима и за дефинисање решења базираног на приступу робусне субоптималне М-естимације у области нових ефикасних техника од интереса за обраду сигнала у временском домену. Прилози дају низ важних елемената који су узети у обзир при реализацији адаптивног рекурзивног М-робусног алгоритма обраде сигнала у електроенергетским системима и верификацији истог.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом, уводном, поглављу је истакнута неопходност развоја робусне методологије за обраду сигнала у електроенергетским системима полазећи од сложености, комплексности и значаја ових система у обезбеђивању поузданог и сигурног напајања свих потрошача електричном енергијом. При томе се полази од чињенице да су у реалној пракси рада

електроенергетских система честа мерења која садрже мањи или већи број мерних нерегуларности за које класичне до сада традиционално коришћене методологије у обради сигнала не дају задовољавајуће резултате или пак показују извесна ограничења. Указано је на потребу да велики број сигнала који egzистирају у оквиру електроенергетског система, да би били функционално употребљиви и коришћени за реалну примену, захтева адекватно процесирање како би сачували валидне информације које носе из процеса. Наглашено је да потенцијалне грешке у обради сигнала неминовно доводе до погрешних акција из неког од надређених система управљања који предметне сигнале стандардно користе у оквиру своје функционалности. Констатовано је да се данашњи електроенергетски системи сусрећу, поред све строжијих захтева који долазе од стране крајњих корисника у виду за високом поузданошћу у снабдевању електричном енергијом, и са појавом све оштрије конкуренције у процесима дерегулације и либерализације тржишта електричне енергије. Закључено је да је стога за савремени електроенергетски систем императив усавршавање у свим сегментима пословања и унапређење и повећање ефикасности у свим његовим подсистемима: производњи, преносу и дистрибуцији електричне енергије, кроз имплементирање савремених достигнућа високе технологије у основи којих је поуздана робусна обрада сигнала како би се постигао прокламовани циљ у виду минимизирања свих пратећих трошкова и остваривања максималне профитабилности.

У другом поглављу је концизно и јасно представљен преглед кључних елемената и карактеристика сигнала у електроенергетском систему као и пресек тренутног стања у области класичних метода идентификације непознатих параметара сигнала у овом систему које су углавном до сада коришћене у већем или мањем обиму. Истакнута је потреба и наглашена мотивација за решавањем проблема ефикасне обраде сигнала у електроенергетским системима у ситуацијама када су расположивим мерењима суперпониране грешке мерења великог интензитета које су најчешће последице великог броја различитих утицаја као што су: нелинеарности и несавршености мерних трансформатора, сензора и актуатора; рад расклопне високонапонске опреме пре свега прекидача и растављача; атмосферска пражњења и комутациони пренапони; шумови од кварова у систему и појава електричног лука; појава короне и парцијалних пражњења као и присутних електромагнетних зрачења и механичких неправилности. У овом поглављу је размотрен велики број до сада коришћених техника за обраду сигнала у електроенергетским системима и констатовано да сама чињеница да их је много указује на ограниченост у примени сваке од њих. Акцент и тежиште су постављени на реалне сигнале за чија детектовања се стандардно користе сензори за индиректна мерења физичких величина (струје, напона, температуре, притиска, звука, нивоа) који су под јаким утицајем мерног шума чија расподела значајније одступа од, по правилу подразумеване, нормалне расподеле. Дефинисано је оправдано полазно становиште да се у највећем броју реалних мерења у електроенергетским системима јавља шум великог интензитета означен као outlier и указано да је утицај оваквих лоших мерења потребно елиминисати у потпуности или потиснути у довољној мери, односно минимизирати њихов утицај. Показано је да се као решење за дефинисани проблем намећу савремене робусне методе за обраду сигнала са инхерентном особином да у знатној мери побољшавају отпорност и имунитет на лоша мерења и да, сходно томе, доприносе квалитету и брзини естимације непознатих параметара сигнала у електроенергетским системима. Усвојено је да се робусна процена, односно естимација, параметара сигнала у електроенергетским системима реализује естиматором типа максималне веродостојности, односно М-естиматором, који припада класи робусних естиматора који су у стању да у потпуности превазиђу озбиљне недостатке до сада традиционално коришћених класичних естиматора и да минимизирају утицај импулсног шума и outlier-а на предметну естимацију непознатих параметара сигнала. Детаљно је анализиран задатак примене робусних метода за обраду сигнала у контексту електроенергетских система и представљен је концепт минимаксне робусне естимације параметара сигнала и подробно анализирани: квалитет робусности, функција утицаја са

посебним освртом на осетљивост на присуство великих грешака и на локални померај, као и општа робусност са анализом преломне тачке естиматора.

У трећем поглављу су размотрене теоријске основе робусне процене временских низова и извршена детаљна анализа нерекурзивних и рекурзивних минимаксних робусних алгоритама за идентификацију параметара сигнала у реалном времену, полазећи од ауторегресионих динамичких модела. Дат је преглед различитих реализација класичних алгоритама у batch и у рекурзивној форми, односно реализација за рад у off-line или on-line (рад у реалном времену) моду. При томе је посебна пажња посвећена различитим реализацијама и варијантама алгорита типа најмањих квадрата као једног од, у инжењерској пракси до сада, најчешће примењиваних метода за идентификацију параметара сигнала у електроенергетским системима у временском домену. Детаљно су размотрене и дефинисане процедуре избора и имплементације адекватних критеријумских функција и функција утицаја.

У четвртном поглављу је образложен концепт и развој новог адаптивног M-робусног алгорита за идентификацију непознатих параметара сигнала из електроенергетских система у реалном времену који је применљив и у случајевима када у мерном систему постоје недостаци који доводе до изразито лоших мерења, односно у присуству импулсног шума и outlier-a, а који по правилу озбиљније нарушавају ефикасност естимације непознатих параметара сигнала класичним методама. У реализацији решења коришћен је приступ пројектовања адекватног алгорита који суштински реализује функцију класификације и поделу свих мерних података у две категорије и то категорију регуларних мерења и категорију мерења под утицајем импулсног шума и outlier-a. При томе се полази од класе приближно нормалних расподела случајних величина мерног шума што су практично класе расподела које у средишњем делу имају облик Гаусове расподеле а на крајевима имају облик Лапласове расподеле, што су расподеле које се у пракси означавају и као расподеле са отежалим крајевима. Предложени алгоритам је пројектован кроз неколико корака и то: робустификација алгорита минималне средње квадратне грешке, затим је на ефикасан начин реализовано прилагођавање за рад у реалном времену кроз имплементацију особине рекурзивности и на крају је имплементирана инхерентно и особина адаптивности кроз функционално одређивање фактора заборављања. Алгоритам је затим тестиран кроз стандардну процедуру на адекватно изабраном синтетички реализованом тест систему и кроз компаративну анализу са, до сада, доминантно коришћеним алгоритмима у инжењерској пракси за идентификацију непознатих параметара сигнала у електроенергетским системима у временском домену: алгоритмом минималне апсолутне девијације, алгоритмом мешовите норме, алгоритмом минималне средње квадратне грешке и алгоритмом медијане минималне средње квадратне грешке. Резултати спроведене компаративне анализе су потврдили значајну функционалну предност новоразвијеног адаптивног рекурзивног M-робусног алгорита у решавању дефинисаног проблема.

У петом поглављу усвојени концепт M-робусне естимације непознатих параметара сигнала проширен је и на случај целог електроенергетског система, који је по својој природи један мултиваријабилни систем. При томе се полази од премисе да је у одређеним системским апликацијама у електроенергетским системима број сигнала и њихових параметара које је потребно естимирати по правилу велики и стога је неопходно располагати ефикасним алгоритмима и класификаторима за системе велике димензије. Сугерисано је решење у виду генерализоване класе M-робусних естиматора које је засновано и развијено на адекватној и функционалној имплементацији одговарајућих тежинских фактора мерења. Овим приступом је отворен пут за решавање проблема велике димензионалности што се у случају електроенергетских система има у реализацијама системских апликација којима се сагледавају извесни аспекти од значаја на нивоу комплетног система. Конкретно су сугерисани кључни елементи од интереса у реализацији генерализованог M-робусног естиматора: осетљивост резидуала на стварну грешку мерења и одређивање матрице фактора скалирања, потребни услови на основу којих се утврђује и проверава карактеристика

опсервабилности система као и идентификација тачака преноса у процесу робусне естимације непознатих параметара сигнала електроенергетског система.

У шестом поглављу је приказана верификација развијеног алгоритма адаптивне рекурзивне М-робусне естимације кроз његову имплементацију на великом броју значајних конкретних апликација у временском домену које се примењују у свакодневној пракси данашњих електроенергетских система. Верификација је извршена на бази три категорије коришћених расположивих сигнала и то: синтетички генерисани сигнали са суперпонираним импулсним сметњама и outlier-има (сигнали генерисани путем рачунарских симулација и сигнали који се имају као излаз значајног броја софтверских апликација развијених за решавање битних карактеристичних проблема у функционисању електроенергетских система); на бази реално снимљених сигнала у лабораторијским условима на моделима који адекватно и верно репрезентују стварне компоненте реалних електроенергетских система са суперпонираним импулсним сметњама и outlier-има (коришћени су сигнали снимљени на адекватним моделима у лабораторијским условима кроз које је могуће верно сагледавање процеса од интереса у реалном електроенергетском систему а које би у реалном систему било практично немогуће реализовати јер би се захтевали одређени хаваријски режими и режими са кваровима на веома скупим капиталним компонентама електрана и трансформаторских станица високог напона); на бази сигнала снимљених у раду реалног електроенергетског система са суперпонираним импулсним сметњама и outlier-има (овде су у питању сигнали које је било могуће реално снимити односно генерисати у току нормалног функционисања електроенергетског система или који су преузети из регистратора догађаја одговарајућих уређаја за заштиту и управљање елемената предметног система).

У оквиру седмог, закључног поглавља, детаљно су приказани сви кључни резултати истраживања у оквиру дисертације. Дат је сумарни преглед доприноса докторске тезе у бројним практичним имплементацијама заснованим на развијеној методологији робусне обраде сигнала у електроенергетским системима и показано да је теза дала одговор на полазне хипотезе и постављене захтеве. Изведени су најважнији закључци и на основу њих дате смернице за наставак истраживања у предметној области.

У делу Прилози су приказани извесни теоријски аспекти, дефиниције и извођења од значаја за рад као и битни сегменти једног броја софтверски развијених решења која су коришћена за рачунарске симулације одређених радних режима појединих елемената електроенергетских система од интереса за верификацију предложене адаптивне рекурзивне М-робусне методологије обраде сигнала у овом систему.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Докторска дисертација под насловом „Робусна обрада сигнала у електроенергетским системима“ представља оригинални научноистраживачки рад у области обраде сигнала који потичу из реалног окружења електроенергетских система. Предмет дисертације је значајан и актуелан јер у оквиру данашњих електроенергетских система имплементација савремених техничких решења захтева и условљава све мање присуство људског фактора како би се постигао максималан квалитет у производњи, преносу и дистрибуцији електричне енергије и како би се минимизирали ризици од кварова и хаварија не елементима и постројењима система.

Да би се обезбедила највећа расположивост у свим сегментима електроенергетског система, која у значајној мери зависи не само од примењених управљачко рачунарских система него суштински и од употребљене опреме у пољу (примарна опрема у електроенергетским објектима, сензори, актуатори) потребно је располагати и са унапређеним системима за рану детекцију и превенцију нежељених режима и отказа кључне примарне опреме да би се предупредила тежа хаваријска стања и како би се благовремено

реаговало на реалне поремећаје у систему и да би се на тај начин спречили већи застоји у раду свих подсистема електроенергетског система. У основи побројаних захтева и примењених методологија и решења је квалитетна обрада великог броја величина и сигнала, како електричних тако и неелектричних, који егзистирају у електранама, преносној електроенергетској мрежи и у електродистрибутивном сектору а за најразличитије сегменте примене: мерења, управљања, дијагностике стања примарне опреме, заштите, али и за велики број системских апликација које раде у on-line (у реалном времену) или off-line моду.

У оквиру дисертације развијен је ефикасан адаптивни рекурзивни М-робусни алгоритам који омогућава оптимално решење за обраду сигнала у електроенергетским системима у присуству поремећаја велике реализације, у савременој стручној литератури третираних као outlier-и, када су до сада коришћене методе обраде сигнала у временском домену неефикасне и чији су резултати у овим условима практично неупотребљиви. На овај начин је, развојем методолошки оригиналног приступа у обради реалних сигнала у временском домену, елиминисана недовољна заступљеност овог приступа у савременој литератури.

Развијени алгоритам је успешно имплементиран у оквиру сигурносног концепта управљања савременим електроенергетским системима. Имплементација решења предложеног у дисертацији евидентно води ка смањењу трошкова у функционисању и експлоатацији електроенергетских система и отвара услове за повећану конкурентност и бољу позицију ових система на развијеном тржишту електричне енергије.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је детаљно истражио и проучио постојећу релевантну литературу из области дисертације и коректно навео 88 референци које су од значаја за тему дисертације. Литература обухвата широк опсег доступних публикација, од старијих до савремених. Кроз литературу је остварен добар преглед стања у оквиру предметне области чиме је постављена квалитетна основа за рад на одабраној теми дисертације. Литература укључује и 14 публикација на којима је кандидат аутор/коаутор (два рада у научним часописима међународног значаја категорије M22, један рад у националном часопису категорије M51, три рада у зборницима међународних конференција категорије M33 и осам радова у зборницима националних конференција категорије M63), а који су директно проистекли из рада на дисертацији.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У дисертацији је показано да је предложена робусна методологија обраде сигнала у савременим електроенергетским системима оптимално, адекватно и технички прихватљиво решење чијом се применом ефикасно отклањају ограничења и недостаци класичне методологије обраде сигнала у временском домену, у контексту имуности на присуство лоших мерења манифестованим кроз импулсни шум и outlier-е, чији се број у данашње време рапидно повећава, која су редовна појава у пракси и експлоатацији високонапонских електроенергетских објеката.

Класичне методологије обраде сигнала у електроенергетским системима у временском домену, доминантно до сада примењиване у инжењерској пракси, засноване су на нормалној расподели шума мерења што их чини неефикасним и практично неприменљивим у случајевима присуства импулсних поремећаја и outlier-а. У дисертацији развијени адаптивни рекурзивни М-робусни алгоритам поменуто ограничења класичних методологија решава полазећи од чињенице да шум мерења практично подлеже контаминираној нормалној расподели, односно нормалној расподели са отежалим крајевима која у свом централном делу одговара Гаусовој расподели а на крајевима подлеже Лапласовој расподели.



Аналитичко пројектовање алгоритма за робусну обраду сигнала у електроенергетским системима у временском домену базирано је на избору оптималне критеријумске функције и на избору адекватне функције утицаја која препознаје и елиминише јако лоше реализације мерења као и на принципу субоптималности у погледу усвајања одређене класе расподеле из које потиче стохастички шум мерења.

Сходно томе предложени адаптивни рекурзивни М-робусни алгоритам је изведен из принципа максималне веродостојности којим је ефикасна естимација, односно идентификација, непознатих параметара сигнала реализована максимизирањем условне функције густине вероватноће мерења. На овај начин је у методолошком смислу, према сазнањима из доступне литературе, први пут направљен помак који омогућава ефикасну естимацију сигнала из електроенергетског система у присуству дефинисаних суперпонираних поремећаја.

Развијена методологија омогућава ефикасну обраду реалних сигнала и практичну имплементацију у оквиру савремених микропроцесорских уређаја широко распрострањених у бројним применама у електроенергетским системима: мониторингу и дијагностици стања кључних елемената овог система, раној детекцији квара и опасних радних режима као и отказа на високонапонској опреми, мерењима, надзору над квалитетом електричне енергије, бројним управљачким функцијама у надређеним диспечерским центрима различитих хијерархијских нивоа управљања.

Имплементација предложеног адаптивног рекурзивног М-робусног алгоритма се показала у потпуности компатибилном и сврсисходном у оквиру сигурносног концепта управљања савременим електроенергетским системима јер се развијени алгоритам ефикасно носи са појавама великих реализација лоших мерења, односно са појавама outlier-а и импулсног шума високог интензитета, и омогућава задовољавајући квалитет у обради сигнала што је императив у оквиру прокламованог концепта управљања.

Генерализовани М-робусни естиматор параметара сигнала предложен за потребе мултиваријабилних система, какав је по својој природи и предметни електроенергетски систем, омогућава практичну реализацију системских апликација које систем велике димензионалности третирају у целини, односно које се извршавају над системом у целини. Овде је практично естиматор типа максималне веродостојности ефикасно проширен увођењем одговарајућих погодних изабраних тежинских фактора придружених појединачним мерењима.

Верификација развијеног адаптивног рекурзивног М-робусног алгоритма обраде сигнала у електроенергетским системима у временском домену успешно је, у првом кораку, извршена кроз серију експеримената на синтетички генерисаним сигналима и сигналима који су проистекли као резултат адекватних апликативних софтвера за анализу битних радних режима електроенергетских система, како регуларних режима тако и режима са карактеристичним кваровима. Такође, у другом кораку, валидација развијене методологије је реализована и на сигналима снимљеним у лабораторијским условима на моделима појединих елемената електроенергетских система као и на сигналима снимљеним у реалном погону ових система и то у условима нормалног функционисања и у условима режима са кваром.

Напред наведене чињенице показују да примењена методологија у потпуности одговара светским стандардима научноистраживачког рада. Наведени поступци су у сагласности са постављеним циљевима дисертације.

#### 3.4. Применљивост остварених резултата

У дисертацији је развијен ефикасан алгоритам за непосредну примену и имплементацију у апликацијама реалног времена, у оквиру савремених мултифункционалних уређаја широко коришћених у данашњим електроенергетским системима, за бројне функције надзора, мониторинга, дијагностике стања, мерења, заштите и

управљања како за поједине елементе овог система тако и за бројне системске апликације које се извршавају на нивоу предметног система као целине.

Кроз евалуацију се показала применљивост развијене методологије на низу значајних апликација у реалним електроенергетским системима: у оквиру концепта заштите ротора синхроних генератора великих снага у електранама од асиметричних радних режима свих врста, естимацији параметара синхроних генератора у нормалним радним режимима што омогућава on-line дијагностику стања ових кључних елемената производних електроенергетских капацитета, поуздану дијагностику интерних кварова у енергетским трансформаторима из широког спектра напонских нивоа и снага, ефикасну технику аутоматске измене извода са којих се напајају асинхрони мотори великих снага кључних подсистема у оквиру сопствене потрошње термоелектрана и великих индустријских комплекса, у функцији дистантне заштите и посебно детекцији високоимпедантних кварова, у функцијама усмерене прекострујне заштите и фреквентне заштите и у функцији диференцијалне заштите јединица енергетских трансформатора.

Коришћењем алгорита развијеног у дисертацији омогућена је ефикасна процена непознатих параметара сигнала у електроенергетским системима у ситуацијама када се има присуство лоших мерења (оних мерења чији припадајући шум излази из оквира уобичајено претпостављених гаусовских расподела) која реално није могуће избећи нити пак ефикасно спречити њихову појаву због саме конструкције мерних сензора или пак због саме природе процеса од интереса у овим системима.

Предложена методологија омогућава минимизацију утицаја лоших мерних реализација високог интензитета и квалитетну практичну идентификацију параметара сигнала у предметном систему и у присуству оваквих мерења окарактерисаних као лоша мерења са садржајем outlier-а и импулсног шума.

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

Горан Ђукић је завршио петогодишње редовне студије и магистарске студије на Електротехничком факултету Унверзитета у Београду са одличним успехом. Кандидат је на крају магистарских студија одбранио магистарски рад и тиме стекао услове да приступи изради докторске дисертације у складу са Законом и правилима Универзитета и Факултета. У току дипломских и магистарских студија показао је зрелост, интерес и вештине које су истакле склоност ка научном раду.

Научни рад кандидата интегрисао је три значајне компоненте: способност да уочи проблеме, способност да дефинише методологију за решавање уочених проблема и успешност у применама одабраних метода. У току истраживања у вези са дисертацијом кандидат је остварио и блиску стручну и научну сарадњу са светски признатом компанијом која дизајнира и производи савремене уређаје из домена дијагностике, заштите и управљања у електроенергетским системима.

Резултати презентовани у дисертацији показују истраживачку зрелост кандидата и способност за свеобухватну и критичку анализу научне литературе, на основу којих кандидат развија и предлаже иновативна и оригинална решења, која доводе до бољих резултата у односу на оне који карактеришу до сада публикована решења. У претходном периоду кандидат је доказао да је стекао самосталност у научноистраживачком раду али и да се развио у натпросечног тимског истраживача.

Начин на који је написана дисертација показује, уз научне доприносе који су публиковани у часописима и приказани на конференцијама, научноистраживачку зрелост кандидата и способност приказивања резултата на јасан начин.

Дисертација јасно указује на развијену вештину кандидата да нови метод буде отворен за надградњу. Овај приступ који почива на поштовању и примени стандарда омогућава низ нових примена резултата до којих је кандидат дошао у контексту комплексног мултиваријабилног система какав је генерално електроенергетски систем.

Све речено јасно показује да квалификације и знања кандидата у потпуности задовољавају и надмашују захтеве који се постављају испред доктораната. При овој квалификацији чланови Комисије користе међународне стандарде за научне истраживаче.

#### 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

##### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси остварени у дисертацији су:

1. Валидација доказа проистеклог на бази аналитичког критичког приступа становишту функционалне реализације сигурносног концепта управљања електроенергетским системима да традиционално коришћени класични естиматори параметара сигнала у овом систему не омогућавају адекватну обраду сигнала за потребе овог концепта у присуству грешака мерења великог интензитета, које се означавају као outlier-и, чија расподела значајно одступа од подразумеване нормалне расподеле.
2. Развој нове поставке, која омогућава ефикасан третман outlier-а, базиране на концепту субоптималности, односно на усвајању класе приближно нормалних расподела случајних величина мерног шума што су практично класе расподела које у средишњем делу имају облик нормалне расподеле а на крајевима имају облик Лапласове расподеле.
3. Нови приступ у обради сигнала у електроенергетским системима, у виду робусне методологије конципиране на естиматору типа максималне веродостојности, када имамо присуство апострофираних грешака мерења великог интензитета чија расподела значајно одступа од подразумеване нормалне расподеле што је ситуација која се има у највећем броју реалних случајева, којом се у потпуности превазилази недостатак класичних естиматора.
4. Развој и имплементација новог оптималног адаптивног рекурзивног М-робусног алгоритма за обраду сигнала у електроенергетском систему у временском домену, чија робусност је утемељена на адекватно изабраној функцији утицаја, који ефикасно решава проблем присуства лоших мерења код којих дистрибуција грешака мерења значајније одступа од нормалне расподеле.
5. Валидација ефикасности и предности предложеног алгоритма, у односу на класичне, до сада стандардно коришћене алгоритме за обраду сигнала у електроенергетском систему у временском домену.
6. Развој генерализованог М-робусног естиматора за идентификацију параметара сигнала електроенергетског система као мултиваријабилног система за потребе системских апликација које су од практичног интереса за рад система у реалном времену.
7. Развој и валидација рутине за заштиту синхроних генератора великих снага, базираној на прорачуну инверзне компоненте струје, од свих врста асиметричних радних режима.
8. Развој и евалуација робусног приступа за статичку естимацију параметара синхроних машина као нове дијагностичке функције реалног времена.
9. Развој и евалуација специјалне рутине која је базирана на анализи звука АРМР алгоритмом за дијагностику стања енергетских трансформатора.
10. Развој и евалуација новог приступа у конципирању функције усмерене прекострујне заштите и фреквентне заштите.
11. Развој и евалуација новог приступа у реализацији функције дистантне заштите и локације места квара на високонапонским водовима.
12. Развој и евалуација новог приступа у детекцији кварова преко високоомске импедансе у електроенергетским системима, превасходно у средњенапонским мрежама.
13. Развој и евалуација новог приступа у реализацији функције диференцијалне заштите енергетских трансформатора великих снага.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Као што је речено у претходном делу извештаја научни доприноси су многоструки.

Дисертација јасно и недвосмислено приказује унапређење у области обраде сигнала у електроенергетским системима у практичним ситуацијама када расположива мерења имају мерне грешке великог интензитета чија расподела одступа од по правилу подразумеване нормалне расподеле. У оваквим ситуацијама до сада коришћене технике за обраду сигнала у овим системима постају ограничене у смислу генерисања поузданих резултата задовољавајућег квалитета а овакве грешке у обради сигнала неминовно доводе до погрешних и неадекватних акција из неког од надређених управљачких система различитих хијерархијских нивоа управљања који сигнале стандардно користе у оквиру своје функционалности.

Унапређење се огледа у имплементацији новог адаптивног рекурзивног М-робусног алгоритма који је развијен на поставци естиматора максималне веродостојности а предложена методологија припада класи робусних субоптималних процедура. Робусност је базирана на адекватно изабраној функцији утицаја која се процењује на погодно одабраним секвенцама мерења и којом се класификују и сузбијају компоненте лоших мерења. Субоптималност је базирана на усвајању одређене класе расподеле из које стохастички процес шума мерења може потицати означених као контаминирана нормална расподела или нормална расподела са отежалим крајевима. Имплементација развијеног АРМР алгоритма у оквиру концепта сигурносног управљања електроенергетским системом доводи до повећања функционалности овог концепта што се манифестује кроз минимизацију утицаја који лоше мерне реализације високог интензитета имају на идентификацију параметара сигнала у систему.

Резултати приказани у дисертацији су оправдали потребу за коришћењем развијене робусне методологије за обраду сигнала у електроенергетским системима пошто се њеном имплементацијом и применом постиже задовољавајући квалитет у обради сигнала који садрже апострофиране реализације мерних грешака великог интензитета. Нови робусни приступ генерише функционално употребљиве резултате из процеса у систему у бројним функцијама и апликацијама реалног времена.

Методологије обраде сигнала у електроенергетским системима које су коришћене у досадашњој инжењерској пракси и које су расположиве у доступној литератури генерално су бројне што недвосмислено указује на њихову ограниченост у применама када сигнал садржи грешке мерења великог интензитета, означене као outlier-и. У дисертацији је наглашен недостатак методолошког поступка до сада коришћених приступа у обради сигнала у електроенергетским системима. Резултати спроведених истраживања на основу оригиналног предложеног адаптивног рекурзивног М-робусног алгоритма су јасно указали на оправданост његове потпуне имплементације и примене у концепту сигурносног управљања електроенергетским системима, пошто исти обезбеђује већу расположивост предметног система.

У дисертацији оригинално развијени алгоритам и рутине омогућавају директну примену у научноистраживачком приступу али и имплементацију у оквиру концепта сигурносног управљања електроенергетским системима а развијене су следеће оригиналне рутине за потребе овог концепта: 1) детекција инверзне компоненте струје на ротору синхроних машина и концепт заштите која је базирана на критеријуму дозвољеног топлотног импулса развијеног на ротору; 2) статичка естимација параметара синхроних машина као битна дијагностичка функција реалног времена; 3) дијагностика интерног квара у енергетским трансформаторима кроз процесирање пратећих звучних сигнала; 4) локација места квара на високонапонским водовима и унапређење концепта функције дистантне заштите; 5) детекција квара преко високоомских прелазних импеданси у средњенапонским мрежама; 6) унапређене функције усмерене прекострујне и фреквентне заштите; 7) унапређена функција диференцијалне заштите енергетских трансформатора великих снага.

При овој је развијена робусна методологија обраде сигнала у електроенергетским системима практично отворена платформа за имплементацију нових рутина од интереса за концепт сигурносног управљања предметним системом посебно у сегменту системских апликација које се реализују над овим системом као целином. Развијена методологија омогућава и примену на удаљеним управљачко рачунарским системима за потребе телеметрије и диспечерског управљања електранама и високонапонским разводним постројењима.

При овој критичкој анализи Комисија се водила проценама које долазе из инжењерске праксе данашњих електроенергетских система али и из публикација које су од стране анонимних рецензента прихваћене као оригинални научни резултати и штампани у часописима.

Комисија са задовољством констатује да су практично сви резултати остварени у дисертацији допринос кандидата и да су објављени у научно-стручним часописима са SCI листе и домаћим часописима као и да су од стране кандидата представљени на међународним и домаћим научно-стручним конференцијама. Комисији је познато и да је у припреми још неколико радова и да се подношење за публиковање очекује у скорој будућности.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је аутор/коаутор 14 научних публикација из области дисертације и од тога: два рада у научном часопису међународног значаја категорије M22, један рад у националном часопису категорије M51, три рада у зборницима међународних конференција категорије M33 и осам радова у зборницима националних конференција категорије M63.

##### Листа радова:

##### Категорија M22:

1. **G.Đukić**, A.Čukarić: New Algorithm for Detecting Power Transformer Faults Based on M-robust Estimation of Sound Signals, IET Generation, Transmission and Distribution, Volume 8, Issue 6, pp.1117-1126, 2014., (IF (2014) = 1.353, ISSN: 1751-8687, doi: 10.1049/iet-gtd.2012.0492)
2. **G.Đukić**, M.Zindović: New M-robust Algorithm for the Calculation of the Negative Sequence Current of a Synchronous Generator, Electric Power System Research, Volume 121, pp.145-151, 2015., (IF (2015) = 1.749, ISSN: 0378-7796, doi: 10.1016/j.epsr.2014.11.020)

##### Категорија M51:

1. М.Ђурић, Г.Ђукић: Модификовани рекурзивни Фуријеов алгоритам за мерење снаге периодичних сигнала, Електропривреда, Број 1, стр.32-38, 2005., (ISSN: 0013-5755)

##### Категорија M33:

1. **G.Đukić**, B.Kovačević, V.Terzija: Static Estimation Of The Synchronous Generator Parameter, ICEM 2000, pp.1038-1041, Espoo Finland, August 2000.

2. M.Đurić, G.Đukić, Ž.Đurišić: Microprocessor Protection Algorithms Of Distributive Leads MPZ-ZIM, Regional Conference And Exhibition On Electricity Distribution, R-4.3, Herceg-Novi, October 5-8, 2004.

3. G.Đukić, M.Đurić, D.Aničić, G.Ivanović: Time Domain Approach to the Faults with Electric Arc on Transmission Lines, PSP-Power System Protection, 15th International Conference, pp.255-264, Bled, Slovenia, September 6-8, 2006., (ISBN: 961-243-041-1)

#### Категорија М63:

1. М.Ђурић, Г.Ђукић: Прелазни процеси при земљоспоју у изолованој мрежи, ЈУКО ЦИГРЕ, Р33-07, Врњачка Бања, 17-20.октобар, 1999.

2. Г.Ђукић, Ж.Ђуришић: Модел асинхроног мотора за израчунавање напона на статорским прикључцима за време краткотрајног престанка напајања, XLV Конференција за ЕТРАН, ЕЕЗ.5, Аранђеловац, 4-7.јун, 2001.

3. Г.Ђукић: Процена угрожености ротора синхроних генератора при асиметричним режимима, ЈУКО-ЦИГРЕ, Р34-11, Бања Врућица, 25-30.мај 2003.

4. Г.Ђукић, Ж.Љубоја: Једна варијанта алгоритма за дигиталну усмерену заштиту-део 1-алгоритам усмереног релеја, Енергетика 2009, стр.220-232, Златибор, март 2009., (UDC: 621.316.9:001.573)

5. Г.Ђукић, Ж.Љубоја: Једна варијанта алгоритма за дигиталну усмерену заштиту-део 2-симулација рада усмереног релеја, Енергетика 2009, стр.233-241, Златибор, март 2009., (UDC: 621.316.9:001.574)

6. Г.Ђукић, П.Осмокровић: М-робусни приступ обраде мерних сигнала за верификацију одзива капацитивног напонског делитеља за мерења брзих транзијентних појава, ЦИГРЕ Србија, Р Д1 10, Златибор, 26-30.мај, 2013.

7. Г.Ђукић, А.Чукарић: Детекција квара енергетског трансформатора заснована на М-робусној естимацији и анализи звучних сигнала, Енергетика 2015, стр.43-54, Златибор, март 2015., (UDC: 621.314.004.64)

8. G.Đukić, M.Zindović: New M-robust Algorithm for Detection of One-Phase Fault with Electrical Arc on Overhead Line in Time Domain, Енергетика 2015, стр.55-65, Златибор, март 2015., (UDC: 621.3.014.31.001.573)

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

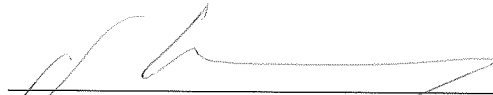
На основу чињеница изложених у овом извештају, Комисија са задовољством констатује да на основу претходног школовања и публикованих резултата **мр Горан Ђукић** испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Универзитета у Београду-Електротехничког факултета.

У дисертацији је детаљно приказан оригинални приступ робусне обраде сигнала у електроенергетским системима у условима када расположива мерења садрже мерне грешке великог интензитета чија расподела значајно одступа од по правилу подразумеване нормалне расподеле, конципиран на робусној субоптималној процедури. Кроз дисертацију су приказане изузетне способности кандидата у коришћењу савремених истраживачких метода и њиховом побољшању, уз поштовање свих захтеваних етичких норми. Кандидат је у дисертацији пратио светске стандарде у области обраде сигнала у савременим електроенергетским системима у оквиру концепта сигурносног управљања овим системом. Кандидат је унапредио методе и развио већи број оригиналних рутина које се користе у склопу овог концепта управљања. Комисија посебно истиче да формирано методи, алгоритам и рутине који су развијени и приказани у докторској дисертацији, поред научних доприноса, имају и практичну примену у области обраде сигнала за потребе концепта сигурносног управљања савременим електроенергетским системима.

У складу са напред изнетим, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „**Робусна обрада сигнала у електроенергетским системима**“ кандидата **мр Горана Ђукића** прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се после њеног усвајања одобри јавна усмена одбрана дисертације.

Београд, 2.6.2016. године

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Бранко Ковачевић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



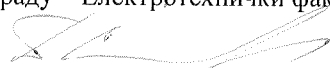
др Никола Рајковић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Александар Чукарић, ванредни професор  
Универзитет у Приштини са привременим седиштем у  
Косовској Митровици – Факултет техничких наука у Косовској Митровици



Др Драгутин Саламон, ванредни професор у пензији  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Предраг Стефанов, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет