

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Сање Антић.

Одлуком Наставно-научног већа бр. 797 одржаној 22.3.2016. године (број одлуке 966/3 од 29.3.2016. године), именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње мр Сање Антић под насловом

**"Примена метода за детекцију отказа заснованих на моделу
у електро–механичким системима"**

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

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1 Хронологија одобравања и израде дисертације

23.6.2015. године кандидаткиња Сања Антић је пријавила тему за израду докторске дисертације;

30.6.2015. године Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу. (Одлука бр. 966/1);

10.7.2015. године Наставно-научно веће је усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације. (Одлука бр. 966/2) у следећем саставу:

- проф. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,
- проф. др Бранко Ковачевић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,
- др Мирослав Бјекић, ванредни професор, Факултет техничких наука у Чачку,
- др Милан Бебић, доцент, Електротехнички факултет у Београду;

15.9.2015. године Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број одлуке 61206-3778/2-15);

11. 2. 2016. године кандидаткиња је предала докторску дисертацију на преглед и оцену;

15. 3. 2016. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације;

22. 3. 2016. Наставно-научно веће Факултета је на седници бр. 797 именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 966/3 од 29.3.2016. године) у следећем саставу:

- проф. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,
- проф. др Бранко Ковачевић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,
- др Мирослав Бјекић, ванредни професор, Факултет техничких наука у Чачку,
- др Радојка Крнета, ванредни професор, Факултет техничких наука у Чачку,
- др Горан Квашчев, доцент, Електротехнички факултет у Београду.

1.2 Научна област дисертације

Докторска дисертација припада Техничким наукама, ужој научној области Аутоматике, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Ментор докторског рада је проф. др Жељко Ђуровић, који је изабран у звање редовног професора за исту научну област и истовремено је аутор већег броја радова у истакнутим међународним часописима.

1.3 Биографски подаци о кандидату

Кандидаткиња мр Сања Антић (дев. Миленковић), дипл. инж. ел., је рођена 19. 8. 1976. године у Чачку. Основну школу и Гимназију у Чачку завршила као носилац дипломе Вук Караџић. Школске године 1995/96 уписује се као редован студент Електротехничког одсека, смера Индустријске енергетике на Техничком факултету у Чачку. Током студија више је пута награђивана за постигнуте успехе студирања. Дипломирала је 2000. године са просечном оценом 9.60 у току студија. Назив њеног дипломског рада гласи "Примена *fuzzy* логике у естимирању динамичког модела једносмерног мотора". Након завршетка студија награђена је и као најбољи дипломирани студент за 2000. годину.

У току завршне године студија ангажована на Факултету као студент демонстратор за извођење вежби из предмета Основи електротехнике. Након завршетка студија од септембра 2001. године запослена је као асистент приправник на Катедри за општу електротехнику и електронику Техничког факултета у Чачку, на предметима Основи електротехнике и Електрична мерења. Од јануара 2009. године ангажована је као асистент на предметима Електромоторни погони, Регулације електромоторних погона и Аутоматско управљање, а од септембра 2013. године и на Дигиталним системима управљања.

Последиписке студије уписала је на Техничком факултету у Чачку 2002. године. На овом нивоу образовања избор предмета је био фокусиран на област управљања континуалним и дигиталним системима, њихово моделовање и симулацију, идентификацију процеса система, рачунарско управљање системима као и пројектовање дигиталних филтара. Стекла је звање магистра техничких наука, смер - електротехника, научна област – Управљање системима 2009. године, са просечном оценом 10 на последиписким студијама. Назив магистарске тезе је био "Симулација и реализација напонско-струјног управљања микромотора једносмерне струје".

Учесник је два пројекта националног значаја:

- "Истраживање, развој и примена програма и мера енергетске ефикасности електромоторних погона", руководилац пројекта др Мирослав Бјекић, ванредни професор. Носилац пројекта Технички факултет Чачак, Програм технолошког развоја Министарства за науку и технолошки развој, област Енергетика, рударство и енергетска ефикасност, број пројекта ТР 33016, 2011-2014;
- "Пројектовање и развој прототипа четвороосне нумерички управљане машине за наваривање", носилац пројекта Иновациони центар Машинског факултета у Београду, програм иновационе делатности утврђеном за 2011. годину Министарства за просвету и науку Републике Србије, број пројекта 451-03-00605/2012-16/25;

и једног пројекта међународног значаја:

- "Building Network of Remote Labs for strengthening university-secondary vocational schools collaboration", 543667-TEMPUS-1-2013-1-RS-TEMPUS-JPHES, supported by The Education, Audiovisual and Culture Executive Agency (EACEA).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Садржај дисертације

Дисертација је написана на српском језику, ћиричним писмом, и садржи 220 страна. Текст дисертације је организован у шест поглавља којима су додељени следећи наслови: 1. Увод; 2. Карактеризација електро-механичких система са становишта појаве и детекције отказа; 3. Опис електро-механичког система; 4. Примена метода за детекцију и изолацију адитивних отказа на бази модела на електро-механичком систему са појачавачем; 5. Примена метода за детекцију и изолацију мултипликативних отказа на бази модела на електро-механичком систему са појачавачем; 6. Закључак. На почетку дисертације дати су Резиме на српском и енглеском језику, Садржај, Листа слика (укупно 122), Листа табела (укупно 47). Иза последњег поглавља дат је списак коришћене литературе са 158 референци наведене по редоследу цитирања у тексту дисертације и Биографија кандидата.

2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу је дат детаљан преглед литературе и постигнутих резултата у области примене метода за детекцију и изолацију отказа у електро-механичким системима. Истакнуто је да област детекције и изолације отказа има пред собом три задатка која треба решити. Први се односи на саму детекцију отказа, и овај задатак се обавља индикацијом да нешто са системом није уобичајено. Други задатак јесте изолација отказа, који се решава локацијом појаве отказа. Трећи задатак јесте идентификација отказа који означава одређивање интензитета нерегуларности. Изолација и идентификација отказа се заједно називају дијагнозом отказа. Истакнуто је да је детекција апсолутно неопходна у свим практичним процесима а изолација скоро исто тако битна. Наглашено је да је идентификација отказа, иако корисна информација, често врло захтевна за имплементацију. Зато многи практични системи подразумевају само детекцију и изолацију отказа FDI (енг. *Fault Detection and Isolation*). Због тога је у многим примерима термин "дијагноза" синоним за "изолацију". Дефинисани су и различити типови адитивних и мултипликативних отказа у електро-механичким системима и специфицирани су приступи њиховој дијагнози.

Анализирајући технике које се примењују на моторе, сензоре и актуаторе наглашено је да се издвајају три специфична приступа:

- методе које су базиране на анализи вибрација, анализи "отисака" или модела (најчешће струјних) сигнала; Ове методе користе моделе сигнала као што су спектри, корелационе функције, *wavelet* трансформацију,... Предности ових метода је што не захтевају прецизно моделовање система. Мана приступа базираног на фреквентним анализама сигнала је што није најпогоднији за брза *online* тестирања мотора јер захтева извесно време за спровођење. Такође, метод који се заснива на анализи вибрација се због буке и велике цене сензора сматра примењивим само код мотора великих снага.
- методе које се заснивају на динамичком моделу система. Ове методе подразумевају:
 - приступ на бази формирања једначина парности (енг. *parity equation approach*); Овај приступ се базира на концепту аналитичке редудансе и формирању једначина парности тј. на поређењу мерења излаза са аналитички добијеним излазима на основу познавања модела и улаза система. Резултат овог поређења је сет примарних резидуала на које се примењују одређене трансформације да би се формирали резидуали. Следећи корак је тзв. евалуација резидуала настала као резултат поређења са дефинисаним праговима детекције (енг. *thresholds*) добијених емпиријски или после спроведених теоријских разматрања.
 - приступ заснован на процени параметара (енг. *parameter estimation approach*); Технике детекције и изолације мултипликативних отказа су најчешће засноване на естимацији параметара. Референтни модел се прво добија неком поступком стандардне идентификације (RLS или LS) у одсуству отказа. Потом се параметри поново естимирају *online*. Одступања од референтног модела постају основа за детекцију и изолацију отказа. Ипак, могућ је приступ заснован на дизајну једначина парности при детекцији и изолацији мултипликативних отказа. На овај начин дизајниране једначине у ствари представљају LS процену са минималним дужином података. Ипак, технике естимације су при детекцији и изолацији мултипликативних отказа често поузданије од техника заснованих на аналитичкој редуданси, мада су комплексније за примену у реалном времену;
 - приступ на бази опсервера и наменских филтара (енг. *observer and filter approach*). Приступ на бази опсервера представљају доста примењиван алат у решавању проблема детекције и изолације отказа, који је применљив на линеарне и нелинеарне системе у присуству поремећаја као и грешака моделовања.

Мана метода заснованих на моделу је неопходност познавања прецизног модела система или његове идентификације.

- методе које се базирају на искуству и знањима укључују методе експертних система, *fuzzy* логике и неуралних мрежа. Проблем са употребом ових метода је што су временски дуге и тешке за примену, пошто подразумевају акумулирање искуства и његово изражавање преко одговарајућих законитости.

За сваки од наведених приступа дат је детаљан преглед доступне литературе. Посебан нагласак је био на методама које се базирају на динамичком моделу система. На крају првог поглавља је дат приказ основних хипотеза и теме дисертације као и преглед метода и методологија које су коришћене у истраживању.

Друго поглавље је посвећено карактеризацији електро–механичких система са становишта појаве и детекције отказа у којој је дата опсежнија анализа доступне литературе и различитих приступа детекцији и изолацији отказа мотора једносмерне струје. Разматрани откази мотора зависно од приступа појединих аутора су били: пораст отпорности кола индукта; пад напона индукта; кратак спој намотаја побуде и намотаја индукта; земљоспој намотаја побуде; прекид везе намотаја индукта са комутаторским сегментом; кратак спој комутаторских сегмената узрокован накупљањем угљене прашине; положај четкица ван магнетски неутралне осе, хабање четкица (коришћене су загрејане четкице услед чега је био очекиван пораст трења у мотору); земљоспој четкица, недовољни притисак четкица, повећање трења у лежачевима,... Анализирани откази сензора су подразумевали: офсет сензора напона, струје и брзине; промена појачања сензора напона, струје и брзине, комплетан отказ сензора напона, струје и брзине,... Разматрани откази актуатора су обухватили варијанте: константан отказ (енг. *constant fault*); отказ типа скалирајући фактор (енг. *scaling factor fault*), константни одступајући отказ (енг. *bias fault*)... У циљу детекције и изолације поменутих отказа мотора једносмерне струје, актуатора и сензора примењене су различите комбинације са или без познавања модела.

У трећем поглављу дат је опис електро –механичког система тј. опис мерне опреме. Приказани су експериментални резултати снимања укупне криве трења мотора при различитим температурама амбијента. Наглашени су и аспекти који условљавају нестационарност и нелинеарност система: температурна зависност коефицијента вискозног трења мотора и отпорности индукта мотора, утицај динамичког трења и уведене су претпоставке које омогућавају линеаризацију модела. Изведени су динамички модели система у одсуству отказа у форми функција преноса и у простору стања, како у континуалном тако и у дискретном домену.

Четврто поглавље разматра примену метода за детекцију и изолацију пет карактеристичних адитивних отказа на примеру мултиваријабилног система са два улаза и три излаза, кога чини мотор са електронским појачавачем. Разматрани адитивни откази су: улазни отказ актуатора управљачког напона појачавача, улазни отказ сензора момента оптерећења мотора, излазни отказ сензора напона индукта мотора, излазни отказ сензора струје индукта мотора, излазни отказ сензора брзине мотора.

Први приступ детекцији и изолацији отказа је био заснован на синтези структурних резидуала. Примарно су изведени модели система у присуству отказа у форми функција преноса и у простору стања. Приказане су две технике синтезе структурне матрице које се заснивају на анализи сета примарних резидуала, формираних на основу модела у форми функција преноса у присуству отказа и на основу структуре система, што је један од доприноса ове дисертације. У циљу илустрације решавања проблема детекције и изолације отказа, као и са жељом да се изврши поређење различитих приступа у пројектовању матрице трансформације, примењене су четири различите методе за добијање ове матрице. Од тога се две методе заснивају на моделу система у присуству отказа у форми функције преноса: 1) *Имплементација "ред по ред"* (енг. *Row by row implementation*), и 2) *Метод елиминације* (енг. *Elimination approach*), а две на моделу система у присуству отказа у простору стања: 3) *Имплементација Chow-Willsky шеме* и 4) *Систематична имплементација* базирана на формирању *Системске матрице отказа* (енг. *Systematic implementation with fault system matrix*) са под-варијантама *Алгоритам III* и *Алгоритам I*. У случају структурне матрице формиране на основу примарних резидуала добијених моделовањем система, примењене су методе синтезе матрице трансформације засноване на функцији преноса, као и методе засноване на простору стања. Међутим, када се структурна матрица формира на основу примарних резидуала добијених анализом структуре система, при синтези матрице

трансформације је могуће применити само методе засноване на функцији преноса али не и методе засноване на простору стања. На основу резидуалних трансформација које су изведене за обе врсте структурних матрица, могао се генерално извести исти закључак. Добијене трансформације нису јединствене али су вектори трансформација i -тих резидуала применом различитих метода (за одређену форму структурне матрице) сви истог правца – једна трансформација се може добити из друге дељењем са одређеним заједничким фактором. Такође су све добијене трансформације и њихови резидуални генератори стабилни. Ипак, једино су трансформације засноване на моделу система у присуству отказа у простору стања, све каузалне и полиномне (МА- *Moving average* типа) као и њихови резидуали, мада је њихова примена нумерички комплекснија у односу на методе засноване на моделу у форми функције преноса. Пошто су све трансформације за исту форму структурне матрице биле истог правца, у експериментима су резидуални генератори формиран избором једне од њих и то: *Систематичне имплементације и Алгоритма III* (за случај када је структурна матрица формирана моделовањем система) тј. *Имплементацијом "ред по ред"* при тзв. *готово потпуној, хомогеној спецификацији одзива* (енг. *Almost-full homogenous response specification*), у случају када је структурна матрица формирана на основу структуре система. Избором трансформација било је могуће дефинисати интерне (енг. *internal*) резидуале, чија је величина одређена вредностима номиналних отказа и рачунске (енг. *computational*) резидуале, који се генеришу на основу принципа аналитичке редуцансе–разлике измерених излаза система и излаза формираног модела на задате/измерне улазе. Генерално у системима величина отказа није унапред позната, па је једино доступна форма резидуала рачунска. Интерна форма резидуала је у конкретном примеру била референца за поређење са рачунском формом.

Прагови детекције (енг. *threshold*) су изабрани емпиријски и то примарно да се обезбеди да све номиналне вредности отказа, у стационарном стању доведу одговарајуће интерне резидуале до границе детекције. Потом су сви резидуални сигнали нормализован, дељењем са примарно изабраним вредностима *прагова детекције*. Тако је добијена нормализована јединична вредност *прагова детекције* која је представљала границу детекције отказа. Номиналне вредности отказа су често део спецификације коју дефинише пројектант детектора, а које су, са друге стране, резултат искуства у експлоатацији система. У примеру система и детектора који је приказан у овом истраживању, номиналне вредности отказа су такође постављене интуитивно на основу вишегодишњег рада на систему и представљају минималне вредности отказа за које се очекује да засигурно доведу резидуале до границе *прагова детекције*. Одређене су и карактеристике резидуала: *граница окидања* (*triggering limit*) (која представља вредност j -тог отказа која доводи i -ти резидуал до *прага детекције*, под условом да ниједан други отказ није присутан) и *осетљивост на отказ* (енг. *fault sensitivity*) (који се дефинише као однос вредности одзива i -тог резидуала у стационарном стању, на j -ти номинални отказ и његовог *прага детекције*). Налажењем *стања осетљивости резидуалне једначине* (енг. *sensitivity condition of the equation*), добијена је битна информација о квалитету детекције одређене резидуалне једначине. Пошто је постигнуто да су све вредности *осетљивости на отказ* веће или једнаке један, било је очекивано да ће у случају појаве номиналних отказа, одговарајући резидуали прећи или бар достићи дефинисане *прагове детекције*. Ипак, то се у конкретном примеру није десило.

Након генерисања резидуала, уочен је и проблем јаког шума у секвенци резидуала који делимично настаје од мерног шума, али који се и појачава применом трансформација над резидуалима, те је у циљу одговарајуће детекције отказа, а пре поређења резидуала са праговима детекције, било потребно филтрирати рачунске резидуале. Након вишеструког понављања, дошло се до препоруке да пропусна учестаност филтра буде за 20% већа од пропусног опсега система (у конкретном случају мотора са појачавачем). У присуству константног поремећаја и/или грешке

моделовања рачунски филтрирани структурни резидуали су били ненулти и у одсуству отказа. Актуаторски номинални отказ управљачког напона као и сензорски отказ момента оптерећења довели су до парцијалног окидања, а номинални сензорски отказ брзине се није уопште могао изоловати. Овај проблем је успешно решен применом одговарајућих техника транслирања у простору резидуала, које су по први пут примењене у овој дисертацији. Резидуали су транслирани за вредност која је процењена као њихова средња вредност током времена у коме нема дејства отказа. Тако је обезбеђено да у случају одсуства отказа вектор резидуала буде са нултом средњом вредношћу. Такође су и све номиналне вредности отказа довеле резидуале до преласка прагова одлучивања, па су сви откази већи или једнаки номиналним постали изолобилни.

Други приступ детекцији и изолацији адитивних отказа се заснивао на синтези дирекционих резидуала. Код овог приступа се очекује да се одзив на сваки појединачни отказ налази у одређеном правцу у простору резидуала сво време укључујући и прелазни процес. Изолација отказа подразумева одређивање у ком унапред дефинисаном правцу се посматрани резидуални вектор налази најближе. Изабрани конкретан пример мотора једносмерне струје са перманентним магнетима је захвалан и за илустрацију ограничења по питању броја различитих отказа који се могу детектовати применом дирекционих резидуала. Наиме, у случајевима примене дирекционих резидуала ограничење које се намеће је да када је број отказа већи од броја излаза система, што је чест случај, да се независни дирекциони правци могу пројектовати само за отказе чији број одговара броју излаза система. Остатак отказа се може детектовати и изоловати само уколико трајекторија коју описује одговарајући дирекциони вектор у одзиву на дати отказ поседује дирекциона својства, стално исти правац током дејства отказа. Ипак правац ове трајекторије је зависан јер је присутан у μ димензионом простору резидуала, при чему је μ број излаза. Интерна резидуална форма је управо коришћена за дефинисање очекиваних праваца резидуалног вектора у одзиву на одређени отказ. За резидуалне векторе прва три отказа (улазни отказ актуатора управљачког напона, улазни отказ сензора момента оптерећења мотора и излазни отказ сензора напона индукта мотора) дефинисани су независни дирекциони правци три резидуалне осе. Добијени изрази за одзиве на последња два отказа (излазни отказ сензора струје индукта мотора, излазни отказ сензора брзине мотора) су били са различитом динамиком за сваки елемент вектора одзива. На основу тога се могла претпоставити немогућност изолације последња два отказа. Ипак, у конкретном примеру се десило да је након замене нумеричких вредности у интерне резидуалне форме могуће увести извесна упрошћења, тако да сви елементи резидуалног вектора у одзиву на последња два отказа буду са приближно истом динамиком. Ово значи се у случају појаве последња два отказа, могло очекивати да ће дирекциони вектор заузимати одређени зависан правац у тродимензионалном простору резидуала, дефинисан координатама вектора одзива све време укључујући и прелазни процес. Према томе, у случају појаве последња два отказа очекивало се и да ће се исти моћи изоловати.

Након генерисања рачунских дирекционих резидуала, било је евидентно да су контаминирани шумом велике варијансе и да су координате пре настанка отказа ненулте. На 3D приказима резидуала ефекат шума је био видљив као већа скупина тачака у положајима рачунског дирекционог вектора пре отказа и по настанку отказа. Такође са 3D приказа је било очигледно да правци рачунског дирекционог вектора при одзиву на све разматране отказе одступају од очекиваних праваца одговарајућег интерног резидуалног вектора. Због ненултих координата дирекционог вектора пре настанка отказа, резидуални вектор по настанку отказа мења правац из једног положаја у други, који не одговара дефинисаном и очекиваном правцу интерног резидуалног вектора, што резултира немогућности изолације отказа.

Да би се избегла варијација координата у појединим стањима, дирекциони резидуали су филтрирани. Елиминација утицаја поремећаја и грешака моделовања, који узрокују ненулте положаје резидуалних вектора пре отказа, је изведена транслирањем координата тако да исте постану нулте пре дејства отказа. Филтрирани а затим и транслирани резидуали пре појаве отказа имају приближно нулте координате, а по настанку отказа координате одговарајућих интерних форми, тј. заузимају исти положај као одговарајући интерни резидуали на 3D приказу. Пошто је на овај начин остварено да дирекциони рачунски вектори имају константе правце током времена, који одговарају референтним и стационарним правцима интерних дирекционих вектора, сви поменути откази су се након детекције могли и изоловати.

У лабораторији је понављан велики број експеримената у различитим радним условима и закључак је да се очекује релативно мало одступање резидуала од добијених тако да се применом транслације истих за већ дефинисане вредности, могу остварити задовољавајуће перформансе система детекције и изолације. На тај начин се резидуали одвајају од поремећаја и систем постаје робусан на грешке моделовања, што је такође значајан допринос овог истраживања.

У петом поглављу спроведена је дијагноза мултипликативних отказа који су изазвани наглом променом неког од параметара претвараача или мотора и који знатно одступају од номиналне радне тачке. Посматрана су четири отказа појачавача (промена отпорности R_1 , R_9 , R_{12} и капацитивности C_8) и три отказа мотора (промена момента инерције J , коефицијента вискозног трења B и отпорности кола индукта R_a). Коришћена је захвална чињеница да се електро-механички параметри мотора осликавају на параметре модела електронског појачавача реализованог као линеарно електронско коло са операционим појачавачем. Зато су алгоритми детекције мултипликативних отказа могли бити засновани на естимацији параметара дискретног тј. континуалног модела једино појачавача, што је јединствен приступ проблему. Отказ настао наглом променом параметара је захтеван за дијагнозу. Класичне технике естимације параметара не дају задовољавајуће резултате, јер нагла промена једног параметара у систему представља иницијатор прелазног процеса током кога се ова промена одражава и на остале параметре. Стога су у сврху детекције мултипликативних отказа који настају наглом променом неког од параметара појачавача или мотора примењене посебне, комплексније технике естимације и то: *Алгоритам клизног прозора* (енг. *Sliding window algorithm*) за процену параметара дискретног модела и *Алгоритам клизног интеграла* (енг. *Sliding integral algorithm*) за процену параметара континуалног модела. Додатан захтев у примени ових техника представља и неопходност увођења довољно информативног (енг. *persistent excitation requirement*) улазног сигнала довољног реда да би била могућа естимација параметара. У ту сврху је у експериментима примењен PRBS (*Pseudo Random Binary Sequences*) сигнал. У дисертацији је примењена модификација Алгоритама клизног интеграла која се састоји од додатног ограничења у дужини података алгоритма најмањих квадрата у оквиру кога се примењује дужина клизног интеграла, а у циљу смањења прелазног процеса у естимацији параметара. Експериментални резултати приказују резултате естимације као и начин реализације експеримената.

За потврду квалитета детекције разматраних мултипликативних отказа параметара мотора и појачавача применом појединих приступа као и у сврху извођења закључака о утицају поремећаја у виду *Coulomb*-овог трења на понашање система под отказом, упоређени су одзиви одговарајућих симулационих модела са измереним сигналом одзива. Иако је метод континуалне естимације применом Алгоритама клизног интеграла нумерички комплекснији за примену нарочито код *online* приступа и осетљивији на присуство шума од методе естимације дискретног модела, на конкретном примеру се показао као нешто ефикаснији у детекцији мултипликативних

отказа. Такође је и утицај Coulomb-овог трења као поремећаја на систем најприсутнији код отказа отпорности R_1 .

У сврху изолације појединих отказа развијен је и алгоритам одлуке на основу кога се откази могу лоцирати. Идентификација отказа у смислу одређивања и величине промене одговарајућег физичког параметара је у случају континуалне естимације једноставна. Стварни физички параметар под отказом се директно може одредити на основу релација које одређују параметре модела појачавача, чиме се исти и идентификује. Други приступ који се може применити и када су параметри модела добијени поступцима дискретне естимације се заснива на процени промене стварних физичких параметара индиректном процедуром – на основу парцијалних извода параметара модела по стварним физичким параметрима у номиналној радној тачки. Техника је прецизна уколико је веза између процењених параметара и физичких параметара линеарна. Уколико је веза нелинеарна, што је и чешћи случај, процедура је апроксимативна и адекватна само уколико је промена – отказ стварног физичког параметара релативно мали. Примећено је да се квалитетнија процена параметара добија налажењем извода у колонама матице парцијалних извода уместо у литератури предложеног извода по целој матрици парцијалних извода, што је још један од доприноса спроведеног истраживања. Овај начин се показао погоднији нарочито код нелинеарне зависности чак и када су вредности мултипликативних отказа велики и доста одступају од номиналне радне тачке.

За разматране адитивне и мултипликативне отказе развијена су два приступа. Први приступ би се могао назвати *off-line*, јер су резидуални генератори пројектовани у оквиру Simulink окружења, а кодови естимације параметара формирану у оквиру MATLAB-а. Други делимично *online* приступ остварен је развијањем LabVIEW кодова и применом *Frame Flat sequence* структуре где се након аквизиције сигнала, код адитивних отказа, исти уводе у *Simulink* моделе резидуалних генератора у сврху формирања резидуала, а код мултипликативних отказа, реализовањем кодова у оквиру *MathScriptNode* структура у циљу примене жељених алгоритама естимације параметара. На овај начин су развијени приступи, погодни за даљинске лабораторије и обуку у области детекције и изолације отказа, што је такође допринос ове дисертације.

Коначно, у закључку дисертације су сумирани сви значајни моменти који карактеришу ову докторску дисертацију. Кренуло се од мотива и значаја изабране теме. У кратким цртама је скицирана основна идеја нових решења, предложених модификација алгорита за детекцију и изолацију адитивних и мултипликативних отказа. Такође, на крају закључка су наведени и могући даљи правци истраживања.

Иза закључка следи списак коришћене литературе у редоследу којим је литература цитирана. Списак литературе обухвата 158 референци које су у непосредној вези са материјом рада и које су коректно цитиране у дисертацији.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 Савременост и оригиналност

Са повећањем сложености система управљања, проблем њихове сигурности и робусности постаје све израженији у многим процесима. Поузданост, робусност, расположивост као и сигурност по околину оваквих система се углавном изражава кроз осетљивост на отказе који се у системима

појављују потпуно случајно, па је отуда у инжењерској теорији и пракси развијена нова дисциплина која се назива теоријом детекције и изолације отказа. Уопштено говорећи, под отказима се подразумевају сва одступања од нормалног, уобичајеног понашања система или пратеће инструментације. Ипак је, са инжењерског аспекта, оваква дефиниција отказа исувише општа, те се стога, конкретно, могу дефинисати два типа отказа која су тренутно од интереса. То су адитивни и мултипликативни откази у процесу. Под адитивним отказима се подразумевају непознати, улазни, детерминистички сигнали чије присуство се сматра пожељним за детектовање (што их разликује од поремећаја као такође непознатог, детерминистичког, улазног сигнала али чије присуство је непожељно за детектовање) и који утичу на одзив система, који су уобичајено једнаки нули, и чији се утицај, у времену трајања отказа, огледа у значајној промени излазног сигнала. Типични пример адитивног отказа мотора би била појава оптерећења које се не може предвидети. Откази на актуатору (уређају који генерише управљачки сигнал неког система) и сензорима се већином сврставају у адитивне отказе. На актуатору би пример адитивног отказа био тзв. застој (енг. *jam*), а на сензорима *bias*, *offset* или *drift* сензора. Са друге стране, под мултипликативним отказима се подразумевају промене, скоковите или постепене, у параметрима процеса која често настаје током рада, за разлику од грешке моделовања дефинисане као промене у параметрима често присутне од почетка. Требало би нагласити да се потпуни откази актуатора и/или сензора сврставају у мултипликативне отказе. Код једносмерних мотора примери мултипликативних отказа би били: кратак спој комутаторских прстенова настао услед накупљања прашине са карбонских четкица, померање положаја четкица ван магнетске неутралне осе, кратак спој или отворена веза намотаја индукта, промена отпорности индукта, промена коефицијента вискозног трења.

Електрични мотори су нашли велику примену у индустрији. Сходно томе је детекција и изолација на овим електро-механичким компонентама и њиховим сензорима од изузетне важности за побољшање расположивости, поузданости и безбедности целокупних система. Систем за мониторинг исправности рада оваквих система би требало да задовољи одређене захтеве који се односе на перформансе детекције и изолације. Перформансе детекције подразумевају следеће услове: осетљивост на појаву отказа (енг. *fault sensitivity*) би требало да буде довољна да омогући детекцију довољно малих отказа; систем би требало да у довољно кратком времену детектује отказе (енг. *reaction speed*) и коначно робусност (енг. *robustness*) која подразумева способност технике да функционише у условима присуства шума, поремећаја и грешака моделовања (енг. *robustness*). Изолационе перформансе представљају способност дијагностичког система да међусобно разликује поједине отказе. Такође, како би се смањила цена система за дијагнозу, сигнали би требало да буду лако мерљиви а сензори релативно једноставни.

У току истраживања која су резултовала овом докторском дисертацијом, наметнула су се три различита циља на којима почива и оригиналност ове дисертације. Први је да се одговори на питање у којој мери су технике детекције и изолације адитивних и мултипликативних отказа развијене за линеарне временски непроменљиве системе примењиве у случају система који су нелинеарни и/или временски променљиви. Други је да се, на једном конкретном примеру, међусобно упореде и евентуално модификују различите технике за дијагнозу адитивних и мултипликативних отказа у смислу ефикасности у детекцији и изолацији отказа и у смислу нумеричке сложености. И на крају, као трећи циљ је постављен задатак да се детаљна и исцрпна анализа спроведе на једном лабораторијском систему који се налази на великом броју универзитетских лабораторија, па да резултати овог рада могу бити искоришћени као пратећи едукативни материјал у оквиру лабораторијских вежби у области детекције и изолације.

Као доказ савремености теме, која још увек привлачи интересовање великог броја истраживача, је велики број научних скупова који су тематски посвећени системима за детекцију и изолацију отказа. Адекватни примери су редовно одржаване две научне конференције које се посвећене детекцији и изолације отказа: "*European Workshop on Advanced Control and Diagnosis*", последњи пут одржана у Плзену, Република Чешка, новембра 2015. године и "*IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*" последњи пут одржана септембра 2015. у Паризу. Такође је Европска комисија за науку у неколико позива за финансирање научно истраживачких пројеката, у последњих неколико година, дефинисала циљеве који су везани за тему детекције и изолације отказа.

3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације, кандидаткиња Сања Антић је користила обимну и релевантну расположиву литературу везану за проблеме детекције и изолације отказа. Преглед стања у подручју истраживања обухватао је осврт на три могућа приступа детекцији и изолацији отказа електро-механичких система, актуатора и сензора.

У Извештају комисије је посебно наглашена литература који покрива преглед различитих приступа детекцији и изолацији отказа на примеру мотора једносмерне струје. Тако се издвајају радови који обухватају концепте на бази: примене анализе струјних и напонских "отисака" [1], биспектралне анализе струје [2], примене *Wigner-Ville* фамилије расподела као алтернативе Фуријевих трансформација [3], различитих комбинација техника формирања једначина парности и RLS естимације [4], техника естимације применом Алгебарске геометрије [5], робусних опсервера за реконструкцију сензорских и актуаторских отказа LTI система и формирања компензационе шеме за реконфигурабилни приступ управљању како би се развио управљачки FTC (eng. *Fault tolerant control system* [6], [7]) систем отпоран на присуство отказа [8], естимације континуалних параметара преко *block-pulse function series* и неуралних мрежа [9], комбинација метода на бази модела (приступ на бази једначина парности и естимације параметара) и метода базираних на искуству (*neuro-fuzzy* приступ) [10], робусне дијагнозе отказа мотора једносмерне струје помоћу вештачких неуралних мрежа [11].

Посебан нагласак је био и на анализи релевантне литературе и приступа детекцији и изолацији отказа који су базирани на моделовању система. Већина техника детекције и изолације заснованих на моделу претпостављају да је тачан модел објекта управљања доступан тј. познат. У реалним практичним примерима таква претпоставка може бити нетачна, јер су грешке моделовања често присутне у системима. Поред тога, врло често су и поремећаји присутни у већини процеса. Тако су развијене читаве технике за одвајање поремећаја у односу на отказе [12-14]. Са друге стране, предложен је и велики број процедура робусних на грешке моделовања [11], [15], [16], [17]. Ипак, мали број поступака је адекватан у случају истовременог присуства поремећаја и грешака моделовања осим ако се не уведу неке рестриктивне претпоставке које се односе на модел [18], [19]. Највећи број прегледних радова на тему примене модел приступа при детекцији отказа дао је R. Isermann [20], [21], [22]. У публикацији [23] D. Fuessel and R. Isermann предлажу шему дијагнозе отказа на примеру мотора једносмерне струје. Предност методе је повећана робусност у односу на традиционалне класификационе шеме. Приказ комбинација метода на бази модела (приступ на бази једначина парности и естимације параметара) и метода базираних на искуству (*neuro-fuzzy* приступ) у примерима електромоторних погона R. Isermann обрађује у [10].

Неки од базичних наслова која покрива теоријску основу метода заснованих на моделу и концепта аналитичке редуцансе и формирању једначина парности [24] при синтези структурних и дирекционих резидуала дао је и Gertler [25]. При апликацији овог приступа и компаративној анализи резултата примењене су четири различите технике за генерисање трансформација структурних резидуала. Од тога су две методе засноване на моделу система у присуству отказа у форми функције преноса: *Имплементација "ред по ред"* која је први пут испробана и предложена у [26] и *Метод елиминације* [25], а две на моделу система у присуству отказа у простору стања: *Имплементација Chow-Willsky шеме* [27] и *Систематична имплементација* базирана на формирању *Системске матрице отказа* са под-варијантама *Алгоритам III* и *Алгоритам I* која је по први пут дата у [24], [28]. Поступци детекције мултипликативних отказа насталих нагло променом неког од параметара појачавача или мотора, засновани су на примени напредних метода естимације параметара дискретног модела *Алгоритам клизног прозора* [29] и *Алгоритам клизног интеграла* за естимацију параметара континуалног модела [30-32]. Идентификација мултипликативних отказа тј. промене стварних физичких параметара (енг. *underlying parameters*) система извршене су индиректним поступцима применом парцијалних извода при номиналним вредностима параметара [33]. Ова литература је у великој мери иницирала идеје за њихову модификацију и прилагођење у примени на конкретном примеру.

Литература која покрива релевантне публикације везане за детекције и изолације отказа мотора, актуатора и сензора са различитим приступима у случају нелинеарности, грешака модела и поремећаја је бројна, категоризована је према три основна концепта и детаљно обрађена у дисертацији. Списак коришћене литературе броји 158 библиографских јединица.

- [1] D. McKINNON, "Online fault analysis of DC motors," *AIST Proc. AISTech 2007*, 2007.
- [2] M. Boltežar and J. Slavič, "Utilizing the connected power electronic converter for improved condition monitoring of induction motors and claw-pole generators," *Meccanica*, vol. 41, no. 3, pp. 283–297, Jun. 2006.
- [3] S. Rajagopalan, J. M. Aller, J. A. Restrepo, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Detection of Rotor Faults in Brushless DC Motors Operating Under Nonstationary Conditions," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 6, pp. 1464–1477, Nov. 2006.
- [4] C. W. Chan, S. Hua, and Z. Hong-Yue, "Application of Fully Decoupled Parity Equation in Fault Detection and Identification of DC Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1277–1284, Jun. 2006.
- [5] L. Menini, C. Possieri, and A. Tornambè, "Application of algebraic geometry techniques in permanent-magnet DC motor fault detection and identification," *Eur. J. Control*, May 2015.
- [6] A. Noura, H., Theilliol, D., Ponsart, J.-C., Chamseddine, *Fault-tolerant Control Systems Design and Practical Applications*. Springer-Verlag, 2009.
- [7] M. Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [8] K. Indriawati, T. Agustinah, and A. Jazidie, "Robust Observer-Based Fault Tolerant Tracking Control for Linear Systems with Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to a DC Motor System," *Int. Rev. Model. Simulations*, vol. 8, no. 4, p. 410, 2015.
- [9] X. Q. Liu, H. Y. Zhang, J. Liu, and J. Yang, "Fault detection and diagnosis of permanent-magnet DC motor based on parameter estimation and neural network," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 1021–1030, 2000.
- [10] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [11] K. Patan, "Robust fault diagnosis in a DC motor by means of artificial neural networks and model error modelling," in *In Korbicz, J., Patan, K., Kowal, M., eds.: Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control.*, W. Academic Publishing House Exit, Ed. 2007, pp. 337–346.
- [12] R. J. Patton and J. Chen, "Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 10, no. 14, pp. 1193–1208, Dec. 2000.
- [13] X. Wei and M. Verhaegen, "Robust fault detection observer design for linear uncertain systems," *Int. J. Control*, vol. 84, no. 1, pp. 197–215, Jan. 2011.
- [14] X.-J. Li and G.-H. Yang, "Fault detection filter design for stochastic time-delay systems with sensor faults," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 43, no. 8, pp. 1504–1518, Aug. 2012.
- [15] M. El-Koujok, M. Benammar, N. Meskin, M. Al-Naemi, and R. Langari, "Multiple sensor fault diagnosis by

- evolving data-driven approach," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 259, pp. 346–358, Feb. 2014.
- [16] S. M. Kargar, K. Salahshoor, and M. J. Yazdanpanah, "Integrated nonlinear model predictive fault tolerant control and multiple model based fault detection and diagnosis," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 92, no. 2, pp. 340–349, Feb. 2014.
 - [17] Z. Shen, G.-H. Yang, and P. Sun, "A parameter-varying fault detection filter design approach for polytopic uncertain linear systems," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 45, no. 5, pp. 1070–1079, Feb. 2013.
 - [18] J. Zarei and E. Shokri, "Robust sensor fault detection based on nonlinear unknown input observer," *Measurement*, vol. 48, pp. 355–367, Feb. 2014.
 - [19] J. Chen and R. J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer Publishing Company Incorporated, New York, 2012.
 - [20] R. Isermann, "Process fault detection based on modeling and estimation methods—A survey," *Automatica*, vol. 20, no. 4, pp. 387–404, Jul. 1984.
 - [21] R. Isermann, "Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications," *Annu. Rev. Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, Jan. 2005.
 - [22] R. Isermann, "Process fault detection based on modeling and estimation methods—A survey," *Automatica*, vol. 20, no. 4, pp. 387–404, 1984.
 - [23] D. Fuessel and R. Isermann, "Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 1070–1077, 2000.
 - [24] J. Gertler, "Fault detection and isolation using parity relations," *Control Eng. Pract.*, vol. 5, no. 5, pp. 653–661, May 1997.
 - [25] J. Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, 1998.
 - [26] J. Shetty, "A multilevel approach to fault detection," MS. Thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, 1985.
 - [27] E. Chow and A. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 29, no. 7, pp. 603–614, Jul. 1984.
 - [28] J. J. Gertler and R. Monajemy, "Generating directional residuals with dynamic parity relations," *Automatica*, vol. 31, no. 4, pp. 627–635, Apr. 1995.
 - [29] J. Gertler and G. DiPierro, "On the Link between Parity Relations and Parameter Estimation," *Prepr. IFAS 3rd Safeprocess Symp. (Hull, England)*, pp. 468 – 473, 1997.
 - [30] P. Young, "Parameter estimation for continuous-time models—A survey," *Automatica*, vol. 17, no. 1, pp. 23–39, Jan. 1981.
 - [31] S. Sagara and Z.-Y. Zhao, "Numerical integration approach to on-line identification of continuous-time systems," *Automatica*, vol. 26, no. 1, pp. 63–74, Jan. 1990.
 - [32] W. Li and J. Gertler, "Detection and isolation of slight parametric faults in continuous-time systems," in *Preprints of 11th IFAC SYDID 3rd Symposium, (Kitakyushu, Japan)*, 1997, pp. 1161 – 1166.
 - [33] J. Gertler, "Diagnosing parametric faults: from parameter estimation to parity relations," in *Proceedings of 1995 American Control Conference - ACC'95*, vol. 3, pp. 1615–1620.

3.3 Опис и адекватност примењених научних метода

Методе детекције и изолације адитивних отказа које су примењене у овој дисертацији а касније и проширене, заснивају се на математичким моделима система у присуству отказа и могућностима да се из таквих модела екстрахује информација о постојању отказа и његовом интензитету. Коришћењем тих модела било је могуће генерисати секвенце резидуала за детекцију и изолацију пет посматраних адитивних отказа на једносмерном мотору са појачавачем. У ту сврху су примењене варијанте анализе и структурних и дирекционих резидуала. Са тим циљем генерисани су дискретни модели у одговарајућој ARMA форми и модели у простору стања за мултиваријабилан систем са два улаза и три излаза и пет посматраних адитивних отказа од којих је један претпостављени улазни - отказ актуатора, док су остали претпостављени улазно/излазни мерни откази сензора. У циљу поређења различитих приступа као и извођења закључака у смислу нумеричке комплексности, еквивалентности и особина, при пројектовању матрице трансформације примењене су четири различите методе за добијање ове матрице при синтези структурних резидуала. Добијене трансформације су ради лакшег поређења приказане табеларно, а структурни резидуали графички у временском домену. Методе синтезе дирекционих резидуала,

биле су базиране на пројектовању независних дирекционих праваца за оба улазна и излазни отказ сензора напона индукта. Анализа резултата је омогућена приказима резидуала у временском домену и 3D простору. Да би се поменуте технике могле применити на конкретном нестационарном/нелинеарном систему уз неизбежно присуство мерног шума, било је неопходно модификовати резидуале у смислу адекватног филтрирања и транслирања.

У циљу детекције мултипликативних отказа на појачавачу и мотору, примењене су методе засноване на дискретној и континуалној естимацији параметара модела које су морале бити прилагођене отказима који настају нагло. Додатан захтев у примени ових техника била је и неопходност увођења довољно информативног (енг. *persistent excitation requirement*) улазног сигнала да би идентификација параметара била остварива. У ту сврху је у експериментима примењен PRBS (енг. *Pseudo Random Binary Sequences*) сигнал. Изолација појединих мултипликативних отказа била је омогућена развијањем алгоритма одлуке на основу кога су се откази могли лоцирати. Један од приступа идентификацији био је заснован на процени промене стварних физичких параметара индиректном процедуром применом парцијалних извода при номиналним вредностима параметара. Индиректан поступак је модификован како би био применљив у случају нагло насталих релативно великих мултипликативних отказа када постоји нелинеарна зависност између модела система и стварних физичких параметара.

Експериментално извођење извршено је применом програмског пакета LabVIEW а обрада резултата при тзв. "batch" (*offline*) приступу развијањем кодова у програмском пакету MATLAB. Како би се обезбедила и *online* детекција и изолација адитивних отказа, надограђени су постојећи LabVIEW кодови. Прикупљени снимљени сигнали се прослеђују у симулациони модел резидуалног генератора, реализован у оквиру наредног *Frame-a, Flat sequence* структуре развијеног LabVIEW кода. У сврху *online* приступа детекцији и изолацији мултипликативних отказа, лабораторијској поставци су додати релеји који омогућују укључивање појединих параметара појачавача у задатком тренутку времена, а алгоритми естимације су развијени у оквиру *MathScript Node* структура.

3.4 Применљивост остварених резултата

У индустријској пракси постоји велики број једносмерних електромоторних погона који се могу описати моделима који су развијени у овој дисертацији, стога се приказане технике детекције и изолације отказа уз незнатне измене могу са великом успешношћу користити у овим системима. Такође, постоји могућност израде лабораторијских прототипа који могу бити искоришћени као експериментални, едукативни модели у циљу образовања студената електротехнике или машинства у области детекције и изолације отказа.

Примењене технике филтрирања резидуала за елиминацију ефекта шума и транслације резидуала за одвајање резидуала од поремећаја се генерално могу применити на системе са константним поремећајима у присуству грешака моделовања. У лабораторији је поновљен велики број експеримената у различитим радним условима и закључак је да се очекује релативно мало одступање резидуала од добијених тако да се применом транслације истих за већ дефинисане вредности, могу остварити задовољавајуће перформансе система детекције и изолације. На тај начин се обезбеђује одвајање резидуала од поремећаја и робусност у односу на грешке моделовања.

Детекција мултипликативних отказа применом напредних техника естимације предвођених у случају наглих отказа, уз додатно ограничење дужине прозора, је врло успешно применљива и у присуству поменутих нелинеарности, поремећаја и грешака модела. Изолација мултипликативних отказа у смислу лоцирања стварног физичког параметра под отказом изводљива је развијањем алгоритма који треба да буде прилагођен особеностима процеса. Процедура идентификације физичког параметра под отказом ако се изводи индиректним техникама уз предложене модификације наведене у дисертацији, применљива је и у случају отказа који настају нагло и чак када знатно одступају од номиналне радне тачке.

Генерално говорећи, анализиране методе у спроведеним истраживањима су пројектоване и примењиве за линеарне системе. Примењене технике детекције и изолације предвиђене за LTI моделе, уз све предложене модификације, се такође успешно могу применити и на поједине класе нелинеарних динамичких система какав је анализирани мотор једносмерне струје са перманентним магнетом и одговарајућим појачавачем.

3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самосталан научни рад

Кандидаткиња Сања Антић је истраживању и изради ове докторске дисертације посветила шест година. Током овог времену значајну пажњу је посветила изучавању тангентних научних дисциплина као што су: стохастички системи и теорија естимације, препознавање облика, модерна спектрална анализа, теорија система, теорија детекције и одлучивања. Изучавајући ове области, а истовремено радећи на својој дисертацији, кандидаткиња је показала систематичност, упорност, креативност, самосталност, зрелост и могућност примене и синергије резултата из различитих научних области. Проблем којим се бави ова дисертација је веома актуелан а добијени резултати у великој мери превазилазе недостатке које постојећа решења показују. Остварени доприноси су оригинални и они сами по себи потврђују способност кандидаткиње за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

Имајући у виду све напред наведено, а на основу приложеног рукописа докторске дисертације, чланови Комисије могу да експлицитно издвоје следеће научне доприносе.

- Искрпним прегледом релевантне литературе извршена је систематизација постигнутих резултата у области примене метода за детекцију и изолацију отказа електро-механичких система, уз анализу предности, недостатака и услова у којима су поједине методе применљиве. Посебни осврт је био на методама базиране на моделима, како у циљу детекције адитивних тако и мултипликативних отказа. Сачињен преглед представља детаљан увид у област дијагнозе отказа електро-механичких система.
- На основу исцрпних експеримената формиран је реалан модел електро-механичког система који је прилагођен крајњем циљу детекције различитих типова отказа;
- Предложен је иновативни поступак синтезе структурних матрица на основу генерисаних примарних резидуала;
- Доследно је спроведен поступак детекције и изолације пет врста различитих адитивних отказа на актуатору и сензорима предвиђених за мерење напона и струје индукта, момента мотора и брзине мотора, па је на основу добијених резултата извршено објективно упоређивање различитих метода за пројектовање трансформација структурних резидуала у смислу њихове

- нумеричке комплексности и еквивалентности примене на примеру нелинеарног/нестационарног система у присуству грешака моделовања и поремећаја;
- Остварена је техника модификације дирекционих и структурних резидуала како би исти били примењиви на реалним системима који показују особине нелинеарности и нестационарности;
 - Остварена је измена технике континуалне естимације параметара применом технике клизног интеграла (*Sliding integral algorithm*) како би иста била прилагођена детекцији наглих мултипликативних отказа стварних физичких параметара;
 - Извршена је идентификација стварних физичких параметара под отказом, модификацијом постојећег поступка индиректне идентификације;
 - Реализован је '*banch-mark*' тест сценарио са секвенцом појављивања отказа а у циљу објективне компаративне анализе развијених метода;

4.2 Критична анализа резултата истраживања

Најважније унапређење научних знања у поређењу са постојећим стањем састоји се у унапређењима постојећих техника анализе резидуала при детекцији и идентификацији адитивних отказа. При томе су унапређења једнако примењива како у случају примене структурних тако и дирекционих резидуала, и у случају система са константним поремећајима али и са нестационараностима који су узроци грешака модела. Унапређења су постигнута и при детекцији мултипликативних наглих отказа система применом нове модификације алгоритма континуалне естимације–*Sliding integral algorithm-a*. Битно унапређење представља и измена постојећег индиректног поступка идентификације отказа стварних физичких параметара који настају нагло а која је сада применљива и у случају када они знатно одступају од номиналне радне тачке и када постоји нелинеарна зависности између модела система и стварних физичких параметара.

4.3 Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада, у ужој области теме докторске дисертације, кандидаткиња мр Сања Антић је објавила следеће радове:

Категорија M22:

- [1] **S. Antić**, Z. Djurovic, and G. Kvascev, "Application of Structured and Directional Residuals for Fault Detection and Isolation on Permanent-Magnet DC Motor with Amplifier," *Qual. Reliab. Eng. Int.*, 2016, (IF=1.191) (DOI: 10.1002/qre.1962) (ISSN 0748-8017)
- [2] M. Bjekic, **S. Antic**, and A. Milovanovic, "Permanent Magnet DC Motor Friction Measurement and Analysis of Friction's Impact," *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 5, pp. 2261–2269, 2011. (IF=1.364) (ISSN 1827-6660).

Категорија M33:

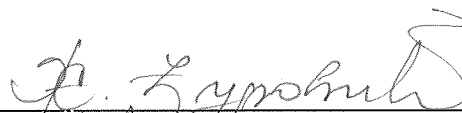
- [1] **S. Antić** and Ž. Đurović, "Permanent magnet dc motor additive faults detection and isolation," in *Proceedings of 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN, Vrnjačka Banja, Serbia, 2-5 June, 2014*.
- [2] **S. Antić** and Ž. Đurović, "Application of sliding integral algorithm for parametric fault detection of an DC motor amplifier," in *Proceedings of 2st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN 2015, Srebrno jezero, Serbia, 8-11 June, 2015*.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега изложеног, Комисија сматра да дисертација кандидаткиње Сање Антић испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације. Узимајући у обзир све наведене научне доприносе, предложена унапређења техника детекције и изолације адитивних и мултипликативних отказа као и њихову применљивост на реалне електро-механичке системе, показану зрелост кандидаткиње и њену способност за самостални научно-истраживачки рад, Комисија сматра да докторска дисертација мр Сање Антић садржи оригиналне научне доприносе који имају доказану практичну применљивост у области аутоматике. Стога Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом "Примена метода за детекцију отказа заснованих на моделу у електро-механичким системима" прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

у Београду,
дана 31.03.2016.

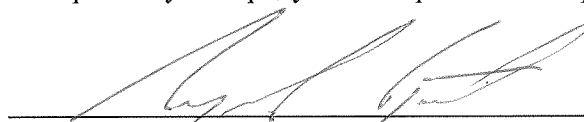
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



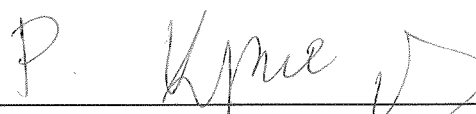
др Жељко Ђуровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



др Мирослав Бјекић, ванредни професор
Универзитет у Крагујевцу – Факултет техничких наука Чачак



др Радојка Крнета, ванредни професор
Универзитет у Крагујевцу – Факултет техничких наука Чачак



др Горан Квашчев, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет