

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Предрага Тадића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 901/3 од 24.03.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Предрага Тадића под насловом

Статистичка обрада сигнала за дијагностику грешака и предиктивно одржавање система

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

Кандидат је тему докторске дисертације под називом "Статистичка обрада сигнала за дијагностику грешака и предиктивно одржавање система" пријавио Комисији за студије трећег степена на Електротехничком факултету у Београду 29.08.2012. године и за ментора предложио проф. др Жељка Ђуровића.

Комисија за студије трећег степена разматрала је на својој седници одржаној 30.08.2012. предлог теме за израду докторске дисертације и упутила предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета, на својој 752. седници, одржаној 4.9.2012. године, именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: проф. др Жељко Ђуровић, проф. др Бранко Ковачевић, проф. др Владимир Стевановић (Машински факултет Универзитета у Београду).

На 755. седници, одржаној 6.11.2012. године, Наставно-научно веће усвојило је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници од 24.12.2012. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом "Статистичка

обрада сигнала за дијагностику грешака и предиктивно одржавање система" (број одлуке 06-21061/24-12 од 24.12.2012. године).

Кандидат је предао докторску дисертацију 04.03.2015. године.

Наставно-научно веће Факултета је на 784. седници, одржаној 17.03.2015. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: проф. др Жељко Ђуровић, проф. др Бранко Ковачевић, проф. др Драган Денић, проф. др Вујо Дрндаревић, доц. др Горан Квашчев (број одлуке 901/3 од 24.03.2015. године).

Кандидат је стекао диплому Магистра електротехничких наука - област Управљање системима, одбранивши 24.06.2009. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду тезу под називом "Алгоритам квантизације говорног сигнала српског језика", под менторством проф. др Жељка Ђуровића.

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

Кандидат Предраг Тадић рођен је 16.11.1980. године у Београду. Основну школу и гимназију општег смера завршио је у Убу. Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписао је 1999. године, а на њему дипломирао 2005. године, одбранивши дипломски рад из области робусног управљања. У току редовних студија остварио је просечну оцену 9,33. Магистарске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписао је 2005. године, а магистарску тезу из области обраде и препознавања говора одбранио је 2009. године, под менторством проф. др Жељка Ђуровића. У току магистарских студија остварио је просечну оцену 10. У два наврата, 2009. и 2010. године, похађао је курсеве под називима „Model Predictive Control“ и „Cooperative control of multiple autonomous vehicles: mission scenarios, theoretical foundations and practical issues“, у оквиру HYCON-EECI Graduate School of Control, коју организује European Embedded Control Institute и École Supérieure d'Électricité (Supélec) у Паризу, Француска.

По окончању основних студија, радио је на пословима из области аутоматизације грејања, вентилације и климатизације у фирмама "Gačić-CO" и „UNIT engineering“ из Београда. Посао је подразумевао програмирање PLC контролера и израду SCADA апликација, као и подешавање параметара регулатора. Од 2007. године запослен је као сарадник у настави, а од 2009. као асистент на Катедри за аутоматику Електротехничког факултета Универзитета у Београду. У том периоду је, осим у извођењу рачунских и лабораторијских вежби, био ангажован на пројектима пројектовања, имплементације и подешавања аутоматских регулатора у термоелектранама "Никола Тесла" у Обреновцу и "Дрмно" у Костолцу, и на пројекту развоја симулатора ракетног система "АЛАС". Такође је био ангажован на FP7 пројекту европске комисије, под називом "Power plants Robustification based On fault Detection and Isolation algorithms (PRODI)".

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на српском језику, ћириличним писмом, и садржи 191 страну. Текст је организован у пет поглавља: 1) Увод, 2) Класичне методе за детекцију и изолацију отказа, 3) Нелинеарни естиматори, 4) Нове методе за детекцију и изолацију отказа засноване на честичним филтрима, и 5) Закључак. На почетку тезе дати су Резиме на српском и енглеском језику, Садржај, Листе слика (укупно 25), табела (укупно 10), алгоритама (укупно 15), скраћеница и ознака. Иза последњег поглавља дат је списак коришћене литературе са 174 референце наведене по абecedном реду, Индекс појмова и Биографија кандидата.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу истакнут је значај области Детекције и изолације отказа и Предиктивног одржавања у савременим индустријским системима. Указано је на потенцијалне уштеде које се могу остварити и дати бројни примери хаварија које су могле бити избегнуте применом ових техника. Прецизно су дефинисани релевантни појмови, у складу са важећом номенклатуром Међународног удружења за аутоматско управљање (IFAC). Дат је детаљан и свеобухватан преглед осамдесетогодишње историје развоја области, од статистичких метода за контролу квалитета, преко техника хардверске редундансе, опсерверских метода попут филтра за детекцију отказа и опсервера неосетљивог на непознате улазе, до приступа заснованих на идентификацији параметара, вештачкој интелигенцији и обради сигнала. Постављена је основна претпоставка полазна истраживања, која подразумева да је систем описан познатим стохастичким нелинеарним моделом у простору стања. Детекција и изолација отказа у оваквим системима издвојена је као проблем који још увек није у потпуности решен. Као најпопуларније технике на којима су заснована постојећа решења издвојени су нелинеарни опсервери, као и приширени и unscented Калманови филтари. Указано је на њихове недостатке и предложен честични филтар као адекватан алат на којем ће бити базиране нове методе за дијагнозу отказа.

Глава 2 садржи опис историјски најзначајнијих метода за дијагнозу отказа. С обзиром на претпостављено постојање квантитативног математичког модела система, разматране су само такозване методе засноване на моделу: филтар за детекцију отказа, опсервер неосетљив на непознате улазе, метода доделе сопствене структуре, низови наменских опсервера, паритетне релације и технике засноване на идентификацији параметара. За сваку методу су наведене полазне претпоставке и објашњено на који начин се долази до структуре детектора отказа. Разматране технике, означене као класичне у оквиру ове тезе, представљају свеобухватан и исцрпан преглед области детекције и изолације отказа у линеарним системима. Посебно поглавље посвећено је нелинеарним опсерверима као једном од стандардних приступа у решавању проблема разматраних у оквиру ове тезе. Указано је на изузетну комплексност математичког апарата на којем се ове технике заснивају. Поред тога, из прегледа литературе изведен је закључак да су оне углавном применљиве на специфичне, уско-дефинисане класе нелинеарних система. Недостатак општости и математичка сложеност издвојени су као основни фактори који отежавају примену ових метода у пракси. Последње поглавље у оквиру Главе 2 чини преглед најзначајнијих резултата из области статистичког тестирања хипотеза и детекције сигнала. Истакнуто је да су ове методе саставни део скоро свих алгоритама за детекцију и изолацију, јер чине основни алат у финалној етапи доношења коначне одлуке о присуству и врсти отказа.

У трећој глави разматране су класичне и савремене технике за естимацију стања нелинеарних стохастичких система. Уведен је Марковљев модел случајног процеса као адекватан математички опис временске еволуције стања ових система. Резимирана је структура Калмановог филтра као стандардног алата за естимацију стања линеарних стохастичких модела у простору стања. Затим су детаљно разматране његове модификације за нелинеарне системе. Прву чини проширени Калманов филтар, који се заснива на простој линеарнизацији оригиналног модела у околини тренутне естимације вектора стања. Друга модификација је unscented Калманов филтар. Овде се у свакој итерацији последње доступне процене вектора средње вредности и коваријационе матрице стања представљају скупом посебно одабраних тзв. сигма тачака, које се затим пропагирају кроз оригинални, нелинеарни модел. С обзиром да не користи линеарнизацију, unscented Калманов филтар може да оствари већу прецизност од проширеног Калмановог филтра. Дат је преглед техника за детекцију и изолацију отказа у нелинеарним системима заснованих на овим филтрима. Указано је на њихове недостатке, који произлазе из чињенице да оба филтра користе претпоставку о нормалности расподеле стања, која најчешће није оправдана у случају нелинеарних модела. Овиме је мотивисан приступ заснован на коришћењу честичног филтра, с обзиром да ова модерна метода превазилази наведене недостатке. Детаљно је разрађена теорија честичног филтрирања, уз посебан осврт на најчешће коришћене модификације (помоћни, регуларизовани, маргинализовани и unscented честични филтар), као и на аспекте практичне примене, попут везе између број честица и варијансе добијене естимације стања. Да је преглед литературе везане за примену честичних филтара у проблемима детекције и изолације отказа. Постојеће методе су подељене у две категорије. Прву чине алгоритми у којима се уводи посебно дискретно стање, тзв. мод, чијим вредностима се кодира стање система, у смислу присуства и типа отказа. Другу групу чине методе које користе низове честичних филтара. Дискутоване су предности и недостаци сваке од техника.

Глава 4 чини централни део тезе у смислу оствареног научног доприноса. На почетку су резимирани главни недостаци постојећих метода за дијагнозу отказа на бази честичних филтара. Затим је наведено на који начин ће они бити превазиђени: 1) коришћењем адекватнијих модела отказа, 2) прилагођавањем концепта наменских опсервера разматраном проблему нелинеарног система, и 3) развојем нове, робусне технике за тестирање хипотеза у оквиру фазе доношења коначне одлуке о присуству и типу отказа. У наставку је прецизно дефинисан разматрани проблем: дат је модел система и отказа, наведене усвојене претпоставке и постављени циљеви које треба остварити. Затим су наведени тест-примери реалних нелинеарних система коришћених за верификацију развијених алгоритама путем рачунарских симулација, уз извођење одговарајућих математичких модела. Након тога су приказана три нова алгоритма за детекцију и изолацију отказа. Први је намењен детекцији, изолацији и компензацији калибрационих грешака на сензорима. Заснива се на честичном филтру који мења структуру повратне спреге као одговор на нагли настанак разлике између мерених и естимираних излаза система, генеришући при томе сигнале на основу којих се затим утврђује да ли је сензор исправан, односно колико износе вредности скала-фактора и помераја, ако се утврди да није правилно калибрисан. Други алгоритам је такође намењен дијагнози отказа на сензорима. Чини га низ честичних филтара од којих је сваки неосетљив на појаву отказа на тачно једном сензору. Оваква шема омогућава прецизну детекцију и изолацију отказа у случају када не постоје истовремени откази на више сензора. Осим тога, обезбеђена је и отпорност на поремећаје, што ову методу издваја у односу на сличне из литературе. Последњи понуђени алгоритам у стању је да изврши дијагнозу отказа како на сензорима, тако и на актуаторима. Као и у претходном случају, у питању је низ честичних филтара. Користи се техника приширења вектора стања, која подразумева да се, заједно са

оригиналним стањем модела, естимира и још по једна додатна величина - у овом случају, отказ на сензору или актуатору. С обзиром да у овом случају део модела постаје условно линеаран, могућа је употреба тзв. маргинализације, којом се умањује број потребних честица па самим тим и рачунска сложеност алгоритма. У оквиру овог алгоритма развијена је и нова, робусна метода за секвенцијално тестирање хипотеза, која га чини отпорнијим на грешке моделирања у односу на сличне методе из литературе. Сви алгоритми анализирани су кроз Монте Карло рачунарске симулације. Анализирани су њихове перформансе под реалним околностима, које подразумевају присуство поремећаја и грешака моделирања. Дато је поређење са сличним решењима из литературе и дискутоване су предности и недостаци развијених метода у односу на постојеће.

Последња глава тезе чини закључак, у којем су сумирани главни доприноси тезе и могући правци даљег истраживања. Поново је укратко истакнут значај техника за дијагнозу отказа. Указано је на постојање великог броја доступних метода, које се разликују по полазним претпоставкама, основном приступу и коришћеном математичком алату. Резимирани су основни алати применљиви на разматрани проблем дијагнозе отказа у системима описаним општим, стохастичким, нелинеарним моделима у простору стања. Указано је на основне предности честичног филтра као алата за естимацију стања оваквих система. Резимирани су основни недостаци постојећих метода за дијагнозу отказа базираних на честичним филтрима. Укратко су поновљене основне особине нових развијених алгоритама и указане предности и недостаци у односу на постојеће методе. Као додатни допринос истакнут је развој нове методе са секвенцијално статистичко тестирање хипотеза. Детаљнија анализа њених особина, и прецизније дефинисање услова под којима је могуће применити неке од развијених алгоритама, наведени су као могући правци даљег истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Са повећањем сложености техничких система расте како комплексност тако и значај проблема њихове сигурности, поузданости, расположивости, максимизације финансијске исплативности, и пре свега безбедности људи и животне околине. Отуда се од дисциплине *теорије и детекције отказа* константно захтева изналажење решења за нове, сложене проблеме који произлазе из индустријске праксе. Савременост области најбоље је илустрована редовним одржавањем две популарне конференције искључиво посвећене детекцији и изолацији отказа: "European Workshop on Advanced Control and Diagnosis" (одржава се сваке године, последњи пут одржана у Берлину, 2014. године) и "IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes" (одржава се сваке три године, ове године биће одржана у септембру, Паризу). Поред тога, у прилог савремености теме говори и чињеница да је Европска комисија у неколико позива за финансирање научно-истраживачких пројеката дефинисала циљеве који су везани за наведене теме. Један овакав FP7 пројекат спроведен је и под руководством Електротехничког факултета Универзитета у Београду (Power plants Robustification based On fault Detection and Isolation - PRODI).

Најстарије методе за дијагнозу отказа познате су под називом *хардверска редунданса*. Оне подразумевају уграђивање додатне опреме, која нема никакву функцију у регуларном режиму рада, али помаже да се открију кварови (редундантни сензори) или да се обезбеди минимум управљивости процеса у случају отказа (редундантни актуатори). Овакав приступ,

иако поуздан, није оправдан са економског становишта, услед повећања габарита и цене система, осим у ретким безбедносно-критичним постројењима, попут нуклеарних електрана. Отуда су већ седамдесетих година прошлог века настале прве методе на бази *софтверске редундансе*. Оне користе програмске прорачуне у циљу утврђивања исправности система, без уградње додатне опреме. Једну групу чине *технике базиране на подацима* (енгл. data-driven) које се заснивају на директном мерењу и адекватној обради неких погодних одабраних, информативних величина, попут температуре, вибрација, и сл. Друга група метода користи *квантитативне математичке моделе* надзираних система. На основу њих се генеришу предикције излаза система, које се затим пореде са мерењима у циљу детекције и изолације евентуалних кварова. Велика већина ових метода заснованих на моделима (енгл. model-based) подразумева линеарност и стационарност надзираног система. Иако адекватна у неким апликацијама, постоје многе области од изузетног значаја у којима ова претпоставка није оправдана, као што су хемијски процеси, аеронаутика, биомедицина, роботика итд.

Упркос великом практичном значају проблема дијагнозе отказа у системима описаним нелинеарним моделима, обим и квалитет постојећих решења у литератури и индустријској пракси, још увек се не може означити као задовољавајући. Међу најуспешнијима од њих се могу издвојити две групе метода. Прва је заснована на теорији нелинеарних опсервера, чије пројектовање почива на техникама диференцијалне геометрије. Међутим, математичка комплексност овог апарата чини га неприступачним великом броју инжењера у пракси. Осим тога, доступни резултати нису довољно општи, јер се углавном изводе под строгим претпоставкама у погледу структуре самог модела. Друга група метода заснива се на коришћењу техника естимације стања нелинеарних модела. У питању су пре свега модификације добро познатог Калмановог филтра: проширени, и тзв. *unscented* Калманов филтар. Ове технике се заснивају на линеаризацији и/или на претпоставци о нормалности релевантних расподела. Услед тога ове методе могу бити напоуздане у неким случајевима, што је добро документовано у постојећој литератури [1,2,3]¹.

Последњих година је показано да једна нова метода – тзв. честични филтар – превазилази главне недостатке проширеног и *unscented* Калмановог филтра [1,2,3]. У питању је техника заснована на секвенцијалним Монте Карло симулацијама којима се добија процена статистичке расподеле стања система. Сама метода је релативно једноставна и интуитивна. Осим тога, лака је за имплементацију (у смислу комплексности самог алгорита), те је пријемчива инжењерима у пракси. Са друге стране, она захтева значајне рачунарске ресурсе, па је до релативно скоро била ограничена на тзв. off-line примене. Сведоци смо непрекидног пораста процесорске снаге рачунара, како персоналних тако и индустријских. Отуда се у наредним годинама може очекивати све већа употреба честичних филтара у разним областима индустријске праксе. Они постају све популарнији и у области дијагнозе отказа, о

-
- [1] Lee, Kung Chung, Anand Oka, Emmanuel Pollakis, Lutz Lampe: *A comparison between Unscented Kalman Filtering and particle filtering for RSSI-based tracking*. 2010 7th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC), стране 157–163. IEEE, 2010.
 - [2] Alrowaie, F, RB Gopaluni, KE Kwok: *Fault detection and isolation in stochastic non-linear state-space models using particle filters*. Control Engineering Practice, 20(10):1016–1032, 2012.
 - [3] Gordon, N.J., D.J. Salmond, A.F.M. Smith: *Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation*. IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing), 140(2):107–113, 1993, ISSN 0956-375X.
 - [4] Chen, Jie и Ron J Patton: *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer academic publishers, 1999.
 - [5] Ding, Steven X.: *Model-based Fault Diagnosis Techniques*. Springer-Verlag, 2008, ISBN 978-3-540-76303-1.
 - [6] Gertler, Janos J.: *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, 1998, ISBN 0-8247-9427-3.

чему сведочи пораст броја радова на ову тему у водећим часописима из области Аутоматике (видети, нпр. [2] и тамо наведене референце).

Оригиналноста истраживања спроведеног у овој тези почива на три основне идеје. Најпре, по први пут се неки стандардни концепти, првобитно развијени за линеарне системе, примењују у контексту нелинеарних стохастичких модела. Затим, велика пажња посвећује се практичној употребљивости развијених метода, тако што се води рачуна о ограничавању нумеричке комплексности самих алгоритама, али и о неизбежном присуству поремећаја и грешака моделирања, са којима се мора рачунати у индустријској пракси. Коначно, остварена је својеврсна комбинација метода заснованих на моделу и метода базираних на подацима. Наиме, иако се полази од претпоставке о постојању квантитативног модела процеса, за доношење коначне одлуке коришћена је методологија тестирања хипотеза, која се типично везује за технике засноване на подацима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације, кандидат је користио готову сву релевантну расположиву литературу везану за проблеме детекције отказа, савремене теорије естимације стања нелинеарних стохастичких система и статистичке обраде сигнала. Међу овим насловима су антологијски прегледи различитих приступа у детекцији отказа [4-9], на основу којих је извршена категоризација класичних приступа и њихово међусобно поређење. Са друге стране, од велике важности је била најрелевантнија литература која покрива класичну теорију тестирања хипотезе [10,11] и естимације стања у нелинеарним системима [12,13]. Коришћена литература која покрива савремену теорију честичног филтрирања је обимна и покрива најбитније публикације, међу којима су [3,14-16]². Међу неким од анализираних постојећих методе за дијагнозу отказа које се ослањају на честичне филтре издвајамо [2,17,18], мада је њихов број у самој тези, која броји 174 референце, знатно већи.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Као основна метода коришћена за развој нових алгоритама за детекцију и изолацију отказа намеће се *честични филтар*. У питању је савремена и моћна техника за естимацију стања нелинеарног система. Заснована је на секвенцијалним Монте Карло симулацијама, којима се скуп могућих вредности вектора стања - тзв. честица, ажурира и пропагира у времену, са циљем се у сваком тренутку располаже прецизном дискретном апроксимацијом стварне расподеле стања. Једна од полазних претпоставки истраживања јесте да је надзирани систем описан нелинеарним стохастичким моделом у простору стања. При томе нису постављена никаква ограничења у погледу структуре самог модела, нити у погледу типа статистичких

2

- [7] Frank, Paul M: *Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results*. Automatica, 26(3):459-474, 1990.
- [8] Isermann, Rolf: *Model-based fault-detection and diagnosis—status and applications*. Annual Reviews in Control, 29(1):71-85, 2005, ISSN 1367-5788.
- [9] Hwang, Inseok, Sungwan Kim, Youdan Kim, C.E. Seah: *A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 18(3):636-653, Maj 2010, ISSN 1063-6536.
- [10] Basseville, Michele, Igor V. Nikiforov: *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. Prentice-Hall, 1993, ISBN 0-13-126780-9.
- [11] Kay, Steven M.: *Fundamentals of statistical signal processing: detection theory*. Prentice-Hall, 1998, ISBN 0-13-504135-X.
- [12] Kay, Steven M.: *Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory*. Prentice-Hall, 1993, ISBN 0133457117.

расподела шумова процеса и мерења. С обзиром на овакву општу поставку проблема, честични филтар представља најадекватнију расположиву методу за процену стања система.

У неким од предложених алгоритама, паралелно са самим вектором стања, естимирају се и вредности отказа, односно поремећаја који делују на систем. Једна од стандардних техника којима се ово постиже је тзв. *проширење (аугментација) вектора стања* [14]. Управо овакав приступ коришћен је у оквиру ове дисертације. Осим тога, у ситуацијама где је то било могуће примењивана је тзв. техника *маргинализације*. Она подразумева комбиновање честичног и оптималног Калмановог филтра, чиме се истовремено може повећати тачност и умањити број потребних рачунаских.

Два од три алгорита развијена у оквиру ове тезе имају за циљ дијагнозу отказа на сензорима. Стандардно решење овог проблема у контексту линеарних система подразумева коришћење тзв. *наменских опсервера* [7,8]. У овој тези, овај добро познати и у пракси доказани концепт примењен је и у случају нелинеарних система, тако што је опсервер замењен честичним филтром одговарајуће структуре.

Поступак оптималног избора једне од више класа описаних одговарајућим статистичким моделима расположивих опсервација описан је теоријом *тестирања хипотеза*. При томе, у индустријској пракси су од интереса *секвенцијалне* методе, које се могу прилагодити раду у реалном времену тако да у сваком тренутку указују на најбољу могућу одлуку на основу до тада прикупљених података. У оквиру ове тезе развијена је нова секвенцијална метода за тестирање хипотеза. У питању је модификација добро познате и веома често коришћене CUSUM технике [10]³. Основна идеја је адаптивност одређених граница које се користе у оквиру овог теста, тако да се обезбеди робусност у погледу евентуалних разлика између стварног система и претпостављеног модела.

3.4. Применљивост остварених резултата

Готове све методе за дијагнозу отказа базиране на честичним филтрима имају ограничену практичну применљивост, из два разлога: 1) осетљивост на поремећаје и грешке моделирања, и 2) рачунска сложеност. Ови недостаци су у алгоритмима развијеним у оквиру ове тезе у значајној мери ублажени.

Пре свега, употреба честичног филтра као опште методе за естимацију стања произвољног нелинеарног система омогућава примену технике проширења стања у циљу процене

3

- [13] Julier, S.J. и J.K. Uhlmann: *Unscented filtering and nonlinear estimation*. Proceedings of the IEEE, 92(3):401–422, Март 2004, ISSN 0018-9219.
- [14] Andrieu, Christophe, Arnaud Doucet, Sumeetpal S. Singh, Vladislav B. Tadic: *Particle methods for change detection, system identification, and control*. Proceedings of the IEEE, 92(3):423–438, 2004.
- [15] Arulampalam, M.S., S. Maskell, N. Gordon, T. Clapp: *A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking*. IEEE Transactions on Signal Processing, 50(2):174–188, Фебруар 2002, ISSN 1053-587X.
- [16] Doucet, A. и A.M. Johansen: *A tutorial on particle filtering and smoothing: fifteen years later*. Handbook of Nonlinear Filtering, стране 656–704, 2009.
- [17] De Freitas, N.: *Rao-Blackwellised particle filtering for fault diagnosis*. Aerospace Conference Proceedings, том 4, стране 1767–1772. IEEE, 2002.
- [18] Li, Ping, Visakan Kadiramanathan: *Fault detection and isolation in nonlinear stochastic systems—A combined adaptive Monte Carlo filtering and likelihood ratio approach*. International Journal of Control, 77(12):1101–1114, 2004.

поремећаја. У оквиру ове тезе је показано да се, коришћењем таквог приступа, може практично анулирати утицај поремећаја на процес доношења одлуке о присуству и типу отказа. Даље, развојем нове, робусне технике за секвенцијално тестирање хипотеза је у значајној мери смањена вероватноћа појаве лажних аларма у ситуацијама када реални систем не одговара у потпуности претпостављеном моделу. Коначно, сама природа стохастичког модела и честичног филтра као алата за естимацију његовог стања пружају могућност експлицитног квантификовања непрецизности модела, односно дејства непознатих улаза, кроз варијансе и расподеле шума процеса и мерења. Робусност развијених алгоритама демонстрирана је у оквиру тезе исцрпним симулацијама под различитим околностима, које су подразумевале дејство поремећаја, односно пертурбације модела. При томе су коришћени модели стандардних индустријских процеса, често сретаних како у пракси тако и у релевантној литератури: сепаратор паре у термоелектрани, систем три спојена резервоара и каскадна веза континуалних реактора са мешањем.

Нумеричка сложеност уско је повезана са самом природом честичног филтра, који се ослања на Монте Карло симулације. Да би апроксимације добијене на овај начин биле адекватне, неопходан је релативно велики број честица, од којих свака са собом носи изванредан број потребних рачунских операција. При томе, број честица расте са димензијом модела. У оквиру ове дисертације коришћена је техника маргинализације у циљу ублажавања овог проблема. Она користи евентуалну условну линеарност дела модела система у циљу ефективног смањења димензије стања, чиме се посредно умањује и број потребних честица. Осим тога, практичној применљивости развијених алгоритама свакако ће допринети и непрекидни пораст процесорске моћи индустријских контролера.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Мр Предраг Тадић је истраживању и изради ове докторске дисертације посветио шест година. Током овог времена значајну пажњу је посветио изучавању тангентних научних дисциплина као што су класична теорија детекције и изолације отказа, теорија статистичке обраде сигнала, теорија детекције и тестирања хипотеза, теорија естимације стања нелинеарних стохастичких модела. Изучавајући ове области, а истовремено радећи на својој дисертацији, кандидат је показао систематичност, упорност, креативност, самосталност, зрелост и могућност примене и синергије резултата из различитих научних области. Проблем којим се бави ова дисертација је веома актуелан а добијени резултати у великој мери превазилазе недостатке које постојећа решења показују. Остварени доприноси су оригинални и они сами по себи потврђују способност кандидата за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни доприноси ове докторске дисертације могу бити систематизовани на следећи начин:

1. Исцрпним прегледом релевантне литературе извршена је систематизација целокупне области детекције и изолације отказа на основу квантитативних модела, уз анализу предности, недостатака и услова под којима је свака од метода применљива. Са тог становишта, сачињени преглед представља квалитетан и детаљан увод у област дијагнозе отказа, без обзира на линеарност модела надзираног система. Истовремено, материјал

садржан у овој дисертацији, представља драгоцен садржај од кога се може кренути у сваком будућем истраживању везаном за проблеме предиктивног одржавања техничких система.

2. Анализиран је велики број доступних решења везаних за дијагнозу отказа у нелинеарним системима, са посебним освртом на технике које се базирају на честичним филтрима. Указано је на њихове недостатке у погледу практичне применљивости, нумеричке сложености, осетљивости на грешке моделирања и дејство поремећаја, као и опсега очекиваних вероватноћа лажних аларма и пропуштених детекција.
3. Први пут је, у овој дисертацији, уведен концепт наменског честичног филтра. Тиме је омогућена примена добро познатог резултата наменских опсервера за детекцију и изолацију отказа на сензорима система описаних нелинеарним моделима. Понуђене су две варијанте базиране на наменском честичном филтру. Прва се састоји од једног честичног филтра са адаптивном структуром повратне спреге, а друга је базирана на низу наменских честичних филтара од којих је сваки неосетљив на отказе тачно једног сензора.
4. Предложена је ефикасна метода за потискивање утицаја поремећаја на процес дијагнозе отказа. Ово је веома битан практичан проблем, с обзиром на то да поремећаји најчешће доводе до лажних аларма, који изазивају беспотребне застоје у производњи. Показано је да поремећаји могу бити естимирани помоћу честичног филтра, техником проширења вектора стања, чиме се омогућава компензација њиховог утицаја на тачност коначне одлуке о присуству и типу отказа.
5. Предложеним алгоритмима остварује се естимација стања толерантна на отказе сензора. Наиме, осим што врше дијагнозу отказа, предложени алгоритми су у стању да генеришу поуздане естимације стања и излаза система, чак и у присуству отказа на сензорима или актуаторима. Ово омогућава имплементацију алгоритама управљања толерантних на отказе, тако што ће се на улаз регулатора доводити естимирани, а не мерени излази процеса.
6. Развијена је нова метода за секвенцијално тестирање хипотеза. У питању је генерализација добро познатог CUSUM теста, алата који је оригинално намењен бинарном тестирању хипотеза са прецизно дефинисаним статистичким моделима. Предложеном модификацијом је омогућено тестирање вишеструких хипотеза. При томе је развијеним адаптивним механизмом обезбеђена и робусност у односу на евентуалне грешке у статистичким моделима хипотеза.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Унапређење научних знања у поређењу са постојећим стањем састоји се у развоју: 1) три нова алгоритма за детекцију и изолацију отказа на бази честичних филтара, и 2) нове методе за робусно секвенцијално тестирање вишеструких хипотеза. У оквиру сличних решења доступних у литератури није експлицитно вођено рачуна о осетљивости на дејство поремећаја и грешке моделирања. При конструисању алгоритама предложених у овој тези, ови фактори узети су у обзир од најранијих етапа развоја, чиме је значајно унапређена могућност примене у реалним постројењима. Осим тога, предложена је метода за смањење нумеричке сложености коришћењем маргинализације у системима код којих се може уочити условна линеарност једног дела модела.

У оквиру тезе је развијена и нова техника поређења веродостојности у циљу избора најадекватнијег из низа честичних филтара. Она заправо представља једну нову технику секвенцијалног тестирања вишеструких хипотеза, коју одликује висок степен робусности у односу на грешке моделирања. Тиме је унапређена шира област теорије детекције.

Треба истаћи да развијене методе подразумевају да постоји релативно детаљан модел надзираног система. Ово није реална претпоставка у случају комплексних, дистрибуираних индустријских процеса, осим у хијерархијским структурама у којима се поједини подсистеми могу посматрати као релативно независне целине, са малим степеном међусобне интеракције. Међутим, иста примедба важи за *све* методе базирание на квантитативним моделима, те се у том смислу не може третирати као недостатак који је особен овде понуђеним методама.

У оквиру тезе није разматран утицај расподеле шума мерења на остварене резултате. Перформансе честичног филтра не зависе од ове расподеле, под претпоставком да је она прецизно унапред дефинисана. Међутим, било би интересно анализирати његове перформансе у случајевима када стварна расподела не одговара претпостављеној – на пример, у присуству тзв. outlier-а, које карактеришу расподеле са тешким „реповима“. Са друге стране, ово отвара простор за истраживање у широј области робусне естимације, што ипак није био предмет истраживања ове тезе.

Као последњи корак у анализи практичне применљивости би требало извршити имплементацију развијених алгоритама на индустријском хардверу (програмабилном логичком контролеру, односно микро-контролеру), и обавити тестирања на реалним процесима. Осим тога, нека од питања која је истраживање оставило отвореним наведена су и у самој тези. Пре свега, применљивости концепта наменског честичног филтра, у смислу опсервабилности нелинеарног модела надзираног система, треба да буде теоријски испитана и утемељена. Такође, требало би извршити анализу перформанси развијеног секвенцијалног теста вишеструких хипотеза, у смислу кашњења детекције и средњег времена између лажних аларма. Коначно, детекција и изолација отказа представља само први корак у методологији предиктивног одржавања. Као правац даљег истраживања намеће се анализа могућности употребе неких од развијених метода не само на дијагнозу квара, већ и на предикцију његове временске еволуције. Тиме би се отворио простор за оптимално планирање сервисних радњи, чиме би се минимизирали застоји постојења и пратећи финансијски губици. Као генерална примедба може се навести управо недостатак економских анализа овог типа, које, коначно, представљају најбољи аргумент у прилог практичној имплементацији развијених метода.

4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада, у ужој области теме докторске дисертације, кандидат мр Предраг Тадић објавио је следеће радове.

Категорија M21:

1. **Predrag Tadić**, Željko Đurović: Particle filtering for sensor fault diagnosis and identification in nonlinear plants, *Journal of Process Control*, vol. 24, no. 4, pp. 401-409, 2014 (IF=2.179) (ISSN 0959-1524), DOI: 10.1016/J.PROCONT.2014.02.009

Категорија M51:

1. **Predrag R. Tadić**, Miloš S. Stanković, Srdjan S. Stanković, Željko M. Djurović: An Application of Decentralized Estimation in a Fault Detection Problem, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 373-387, 2009 (ISSN 1451-4869). DOI:10.2298/SJEE0903373T
2. A. Marjanović, G. Kvaščev, **P. Tadić**, Ž. Đurović: Application of predictive maintenance techniques in industrial systems, *Serbian journal of electrical engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 263-279, 2011 (ISSN 1451-4869), DOI: 10.2298/SJEE1103263M

Kategorija M33:

1. **Predrag Tadić**, Miloš Stanković, Srđan Stanković, Željko Đurović: Consensus Based Decentralized Estimation Applied to Fault Detection and Isolation, *6th IFAC International Workshop on Knowledge and Technology Transfer in Developing Countries: Automation and Infrastructure, DECOM – TT 2009*, Ohrid, Makedonija, 26-29 septembar 2009
2. **Predrag Tadić**, Željko Đurović, Goran Kvašček: Coal-Shortage Detection in Power Plants by Means of a Fixed Size Sample Strategy, *IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency – IFAC CMTEE 2010*, Vilamoura, Portugal, 29-31 mart 2010
3. **P.R. Tadić**, Ž.M. Đurović, G.S. Kvašček: Application of a Fixed-Size Sample Hypothesis Testing Algorithm to Leakage Diagnosis in a Three-Tank System, *X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements*, Niš, Srbija, 10-12 novembar 2010
4. Goran Kvascev, **Predrag Tadic**, Zeljko Djurovic: An Application of Model Based Fault Detection in Power Plants, *Proceedings of the 8th ACD 2010 European Workshop on Advanced Control and Diagnosis*, pp. 130-134, 18-19 November, 2010, Ferrara, Italy
5. V. Todorovic, **P. Tadic**, Z. Djurovic: Expert System for Fault Detection and Isolation of Coal-Shortage in Thermal Power Plants, *Conference on Control and Fault Tolerant Systems SysTol'10*, Nice, France, October 2010
6. **Predrag Tadić**, Željko Đurović, Branko Kovačević, Veljko Papić: Data Preprocessing Method for Simplifying the Application of Change Detection Algorithms, *9th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD 2011)*, Budimpešta, Mađarska, 17-18 novembar 2011
7. Aleksandra Lj. Marjanović, Željko M. Đurović, Goran S. Kvašček, **Predrag R. Tadić**: Fault Detection and Isolation in Steam Separator System Using Hidden Markov Models, *Proceedings of the 9th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD 2011)*, 17-18 November 2011, Budapest, Hungary
8. **Predrag Tadić**, Željko Đurović, Branko Kovačević, Veljko Papić: Fault Diagnosis for Steam Separators Based on Parameter Identification and CUSUM Classification, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT2012)*, Athens, 2012
9. **Predrag Tadić**, Goran Kvašček, Željko Đurović, Branko Kovačević: Sensor fault diagnosis in nonlinear plants: a marginalised particle filter approach, *1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN 2014*, Vrnjačka Banja, Serbia, June 2-5, 2014 (ISBN 978-86-80509-70-9)

Kategorija M63:

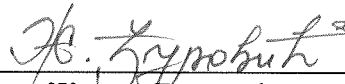
1. **Tadić Predrag**, Stanković Srđan, Đurović Željko, Miloš Stanković: Konsenzus decentralizovana estimacija u problemima detekcije i izolacije otkaza, *LIII Konferencija ETRAN 2009*, Vrnjačka Banja
2. **Predrag Tadić**, Željko Đurović: Detekcija i izolacija grešaka metodom testiranja hipoteza na osnovu uzorka fiksne veličine, *LIV Konferencija ETRAN 2010*, Donji Milanovac
3. **Predrag Tadić**, Veljko Papić, Željko Đurović: Smanjenje računске složenosti algoritama za testiranje hipoteza linearnim preslikavanjem mernog vektora, *LV Konferencija ETRAN 2011*, Banja Vrućica (Teslić)
4. **Predrag Tadić**, Goran Kvašček, Željko Đurović: Dijagnoza kvarova senzora u separatoru termoelektrane testom generalizovanog količnika verodostojnosti, *LVI Konferencija ETRAN*, 11-14. jun 2012, Zlatibor
6. **P. Tadić**, B. Kovačević: Namenski estimatori za detekciju i izolaciju otkaza senzora u nelinearnim procesima, *LVII Konferencija ETRAN*, 03-06. jun 2013, Zlatibor

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

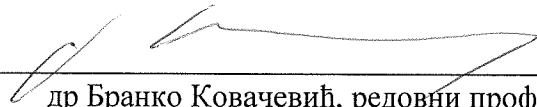
На основу свега изложеног, Комисија сматра да дисертација испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације. Узимајући у обзир све наведене научне доприносе, новопредложене алгоритме на бази честичних филтара за дијагнозу отказа у системима описаним произвољним стохастичким нелинеарним моделима у простору стања, њихову примењивост на реалне индустријске системе, показану зрелост кандидата и његову способност за самостални научно-истраживачки рад, Комисија сматра да докторска дисертација кандидата мр Предрага Тадића 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 "Статистичка обрада сигнала за дијагностику грешака и предиктивно одржавање система" кандидата мр Предрага Тадића, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

у Београду,
26.03.2015.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



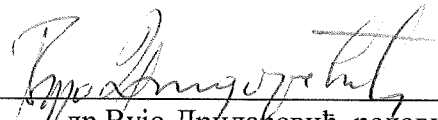
др Жељко Ћуровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



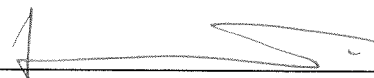
др Бранко Ковачевић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Драган Денић, редовни професор
Универзитет у Нишу – Електронски факултет



др Вујо Дрндаревић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Горан Квашчев, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет