

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

На 741. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду од 27.12.2011. године, одређени смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Мр Горана С. Квашчева, дипл. инж. под насловом "Робусна идентификација индустријских процеса". Дисертацију смо прегледали и имамо част да Наставно-научном већу Електротехничког факултета поднесемо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Наслов и обим дисертације

Мр Горан С. Квашчев је пријавио и предао на преглед и оцену докторску дисертацију под насловом **"Робусна идентификација индустријских процеса"**. Дисертација садржи насловну страну, садржај, пет поглавља, закључак и списак коришћене литературе.

1.2. Хронологија одобравања и израде дисертације

Докторску дисертацију под насловом "Робусна идентификација индустријских процеса" кандидат је пријавио у 12.4.2011. године и Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на својој 731. седници 19.4.2011. године именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: проф. др Жељко Ђуровић (ментор), проф. др Бранко Ковачевић, проф. др Срђан Станковић и проф. др Новак Јауковић.

На својој 732. седници, одржаној 24.05.2011. године, Наставно-научно веће Електротехничког факултета је усвојило извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници одржаној 6.6.2011. године, а на захтев Електротехничког факултета, дало сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата мр Горана Квашчева под насловом "Робусна идентификација индустријских процеса".

На основу предлога Комисије за студије трећег степена Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: проф. др Жељко Ђуровић (ментор), проф. др Бранко Ковачевић, проф. др Србијанка Турајлић, проф. др Владимир Стевановић и доц. др Стевица Граовац.

1.3. Место дисертације у одговарајућој научној области

Дисертација припада научној области Аутоматика (Управљање системима и обрада сигнала) за коју је матични факултет Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

1.4 Кратка биографија

Мр Горан С. Квашчев је рођен у Кикинди, 12 јула 1975. године, где је завршио основну школу и гиманзију. Електротехнички факултет у Београду уписао је 1994. године. Дипломирао је 05.09.2000. године са темом "Примена ПЛЦ контролера у реализацији аутоматског подешавања ПИ регулатора из одскочног одзива" оценом 10. У току студирања остварио је просечну оцену 8.86.

1.5 Стручна делатност

По дипломирању се запослио на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, Катедра за аутоматику, где је тренутно у звању асистента, при чему активно учествује у настави, као и раду на пројектима. Постдипломске студије, смер Управљање системима на Електротехничком факултету у Београду, уписује 2000. године. Магистрирао је 2005. године одбраном тезе "Даљи развој и упоредна анализа процедура за експериментално пројектовање и подешавање индустријских регулатора"

Кандидат је објавио два рада у водећим међународним часописима, као и тридесетак радова у домаћим часописима и на конференцијама. Учествовао је на више ТЕМПУС, ФП7 и два WUS пројекта, као и на више пројекта финансираних од Министарства за науку Републике Србије.

Кандидат држи вежбе на предметима основних и мастер студија: Сигнали и системи, Системи аутоматског управљања, Моделирање и идентификација, Управљање у реалном времену, Управљање индустријским процесима, Неуралне мреже, Системи одлучивања у медицини и Практикум из софтверских алата.

1.6 Основни подаци о објављеним радовима из области дисертације

Категорија M23 (међународни часописи са IMPACT фактором)

1. Kvascev, G.S.; Djurovic, Z.M.; Kovacevic, B.D.; "Adaptive recursive M-robust system parameter identification using the QQ-plot approach", Control Theory & Applications, IET, Vol. 5 Issue 4, pp. 579 – 593, DOI: 10.1049/iet-cta.2009.0647, 2011.
2. M. R. Mataušek, G. S. Kvašček, "A unified step response procedure for autotuning of PI controller and Smith predictor for stable processes", Journal of Process Control, Volume 13, Pages 787-800, December 2003.

Радови у националним и међународним часописима (без IMPACT фактора)

1. Nebojša Radmilović, Slaviša Stojaković, Goran Kvašček "One Solution of Master Controller in Thermal Power Plants", Journal of Automatic Control, Vol 18(1), Pages 5-8, October 2008.
2. A. Marjanović, G. Kvašček, 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.
3. Goran S. Kvašček, Aleksandra Lj. Marjanovic, and Željko M. Đurovic, "Robust adaptive system identification of steam separator process in thermal power plants", Electronics, vol. 15, no. 2, pp. 49-53, 2011.

Радови на међународним конференцијама

1. Goran S. Kvascev, Zeljko M. Djurovic, Veljko D. Papic: "One approach to fault detection in steam temperature control system", Conference DECOM-IFAC-09, Ohrid
2. Goran Kvascev, Predrag Tadic, Ruben Puche Panadero, Predrag Todorov, " Thermal Power Plant Fan Drive Load Distribution Control", IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency, CMTEE 2010, Vilamoura, Portugal, March 29-31, 2010
3. P. Tadic, Z. Djurovic, G. Kvascev, V. Papic, "Coal-shortage detection in power plants by means of fixed size sample strategy", IFAC Conf. on Control Methodologies & Tech. for Energy-Efficiency, Vilamoura, Portugal, March 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. Aleksandra Lj. Marjanović, Željko M. Đurović, Goran S. Kvašček, Predrag R. Tadić, "Fault Detection and Isolation in Steam Separator System Using Hidden Markov Models", 9th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD 2011), Hungary

Радови на домаћим конференцијама

1. Rakić, A. Ž., Kvašček, G. S. and Kovačević, B. D. "Maneuver target tracking using robust min-max kalman filtering", Konferencija TELFOR 2001, Beograd.
2. Goran Kvašček, Milena Petrović, Nebojša Radmilović, Slaviša Stojaković "Raspodela uglja po mlinskim krugovima termoelektranih blokova", LII Konferencija ETRAN 2008, Palić
3. Nebojša Radmilović, Slaviša Stojaković, Goran Kvašček, "Jedno rešenje glavnog regulatora u termoelektrani", LII Konferencija ETRAN 2008, Palić
4. Goran Kvašček, Branko Kovačević: "Detekcija otkaza u sistemu ubrizgavanja", LIII Konferencija ETRAN 2009, Vrnjačka Banja
5. Nebojša Radmilović, Milena Milojević, Nikola Krajnović, Goran Kvašček: "Modelovanje i upravljanje sistemom loženja mazutom u termoelektranama ", LIII Konferencija ETRAN 2009, Vrnjačka Banja
6. Goran Kvascev, Branko Kovacevic, "Recursive robust identification based on QQ-plots", LIV Conf, ETRAN, 2010, Donji Milanovac, Serbia.

7. Vesna Petkovski, Goran Kvašček, "Primena Kaskadne Strukture Regulacije za Kontrolu Temperature Sveže Pare u Termoenergetskim Postrojenjima", **LIV** Konferencija ETRAN 2010, Donji Milanovac
8. Goran Kvašček, Kovačević Branko "Rekurzivna Robusna Identifikacija Sistema Zasnovana na QQ-krivama", **LIV** Konferencija ETRAN 2010, Donji Milanovac
9. Goran Kvašček, Aleksandra Marjanović, Nasar Aldian Ambark Shashoa, „Robusna Adaptivna Identifikacija Parametara Separatora Pare Kotlovskih Termoenergetskih Postrojenja“, **LV** Konferencija ETRAN 2011, Banja Vrućica (Teslić)
10. Aleksandra Marjanović, Goran Kvašček, Predrag Todorov, "Jedan Pristup Detekciji Otkaza na Bazi Identifikacije Procesa i Sekvencijalnog Testiranja Hipoteza", **LV** Konferencija ETRAN 2011, Banja Vrućica (Teslić)

2. Опис дисертације

2.1. Структура и садржај дисертације

Дисертација се састоји из пет поглавља, а после петог поглавља је дат закључак и списак коришћене литературе. По форми и садржају задовољава стандарде за докторску дисертацију.

2.2 Кратак приказ појединих поглавља

У првом поглављу је приказана класична теорија идентификације и моделовања система, као примена ових алгоритама који се користе у пракси. Представљена је процедура коју је потребно спровести за успешно моделовање система, дефинисана је перзистентна побуда, као и аспекти избора параметара модела: ред модела, критеријумске функције, транспортно кашњење. Анализа је урађена за МА (*Moving-Average*) и АРМА (*Auto-Regressive Moving-Average*) моделе, са једним и више улаза и излаза, и на тај начин је обухваћен велики број случајева који се могу појавити и применити у пракси приликом моделовања линеарних система.

Друго поглавље је посвећено минималној робусној естимацији параметара, где је прво дата мотивација примене оваквог приступа, дефинисани су појмови квалитативне, квантитативне и *min-max*-не робустности. У овом поглављу је такође анализирана и егзистенција и јединственост оптималног робусног естиматора, као и поступак пројектовања таквог естиматора.

Наредно поглавље је посвећено развоју новог робусног адаптивног алгорита за идентификацију параметара процеса који може да буде примењив и случају када у мерном систему постоје недостаци који доводе до појаве изразито лоших мерења, који могу да наруше ефикасност естимације параметара класичним методама. У оквиру ове главе приказана је рекурзивна М-робусна естимација параметара, као и његова примена на конкретни проблем у индустријској пракси. Први корак у његовој примени је била процена параметара који дефинишу функцију густине вероватноће мерног шума. Претпостављена је *e*-контаминирана Гаусова расподела, где је контаминација такође претпостављена у форми нормално расподељеног процеса велике варијансе. Применом QQ дијаграма, било је могуће одбирке резидуала класификовати у две класе (класу номиналних резидуала и класу резидуала са такозваним '*outlier*'-има), а затим ефикасно естимирати потребне параметре који дефинишу ове две класе. На основу овако дефинисаних параметара било је, даље, могуће пројектовати робусни естиматор, када је позната функција густине вероватноће. Наведене естимационе процедуре се реализују на покретним прозорима података, па овакав алгоритам инхерентно поседује и особину адаптивности. Другим речима, његова примењивост остаје валидна и у случају нестационарних статистика мерног шума.

Последњи део тезе је посвећен примени развијене методе идентификације у циљу детекције отказа на конкретном индустријском постројењу. Конкретно, изабран је систем за сепарацију свеже паре у термоенергетским постројењима. Експериментална мерења и верификација предложеном методом спроведена су на блоку 1, термоелектране ТЕКО у Дрмну, на систему сепарације паре, тј. котловском бубњу. У овом систему постоји мерење нивоа воде које је од великог значаја, а у оквиру кога долази до честе појаве нерегуларних мерења импулсног карактера. Како се за циљ имала детекција отказа појединих подсистема у сепаратору паре, искоришћена је предложена процедура за адаптивну робусну естимацију параметара система, да би се затим редукцијом димензија вектора

добijenih parametara mogao projektovati jednostavan klasifikator. Na taj начин je moguće izvršiti blagovremenu detekciju отказа, промене стања сензора и актуатора, и повећати расположивост система, омогућити ефикасно и благовремено одржавање, као и смањити трошкови рада постројења.

У завршном поглављу је дат критички осврт на рад, и издвојени су теоријски и практични доприноси рада и анализирани су могућности практичне примене развијене методе. На крају су представљени планирани правци даљег развоја и истраживања.

3. Оцена дисертације

3.1 Савременост, оригиналност и значај

Идентификација непознатог система на основу одбирака сигнала на његовом улазу и излазу је добро познат проблем (радови Содерстрома, Стоике, Калмана, Љунга) који, уколико се лоше постави итекако може да резултује нетачним решењима која нити су јединствена нити независна од одбирака сигнала (радови Хадамарда). Када су нека априорна знања о процесу доступна, тада процес идентификације може да се посматра као процедура која ће да побољша ова знања. Ове априорне информације се могу поставити као ограничења у простору могућих модела и онда сам алгоритам идентификације постаје изводљивији (радови Тихонова, Арсенина, Морозова). Овакав приступ је врло успешан ако се примени на естимацију алгебарских и динамичких афиних система чији су зашумљени одбирци сигнала познати, нарочито под претпоставком да мерни шум поседује неке добре статистичке особине (радови Калмана, Бегелија и Соверинија). Међутим, у пракси се врло често срећемо са процесима о којима не знамо довољно, или је знање о њима врло сложено да би се једноставним математичким апаратом исказало, па је последњих година све присутнији приступ идентификације система коришћењем алтернативних техника такозваног меког рачунања. Са друге стране, приступ у идентификацији непознатих процеса често зависи од коначне намене модела који ће произићи из идентификације. Последњих година је врло актуелна тема детекције отказа у системима на бази модела (радови Патона, Гертлера, Изермана, Франка, Динга). У овој области се идентификовани модел користи у тачно одређену сврху детекције промене понашања система која је узрокована отказом неке од компоненти која систем чини.

У овој докторској дисертацији пажња је посвећена различитим аспектима примене идентификације процеса у циљу детекције и изолације отказа (FDI, Fault Detection and Isolation). Овакав приступ FDI проблему спада у групу метода које су засноване на моделима процеса и у литератури се даља детекција може вршити или на основу евалуације резидуала или на основу анализе добијених параметара идентификованог система. У тези је изабран други приступ, у коме се врши анализа добијених параметара.

У оквиру ове докторске дисертације дат је нови приступ за робусну естимацију параметара система заснованог на примени QQ-дијаграма. Применом предложене процедуре на реалном објекту, могуће је извршити детекцију преласка система из исправног стања рада у неки од режима отказа, као и изолацију отказа у смислу детекције компоненте код које је настао квар.

Значај проблема који је анализиран у овој дисертацији се огледа у томе да се применом предложених техника повећава расположивост, сигурност, поузданост и ефикасност индустријских постројења. Рана детекција отказа у системима, заснована на ваљаној идентификацији процеса је од изузетне важности, како би се могла извршити благовремена интервенција на систему и спречити тежа хаварија или прекид производног процеса. Показано је да се употребом робусне идентификације може извршити одређивање стања система са високом поузданошћу, без обзира на шум мерења који значајно одступа од уобичајено претпостављене нормалне расподеле.

3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

Коришћена литература у дисертацији у потпуности задовољава све критеријуме доброг покривања области истраживања, адекватности и савремености анализе најновијих резултата и

трендова развоја у области истраживања. Као литература су коришћени фундаментални радови из области идентификације (радови Љунга, Ципкина, Содерстрема, Калмана, Акаикеа,...), обраде сигнала (радови Хубера, Барката, Диксона, Тукија, Хампела, Папулиса, Барнета, Луиса,...), детекције отказа (Патон, Франк, Динг, Изерман, Гертлер), али и велики број новијих истраживања објављених у часописима из области аутоматике, експлоатације и одржавања термоенергетских система (радови и монографије Флина, Џоунса, Бреда, Пинтелона,...), чиме је јасно указано на место доприноса учињених у овој дисертацији.

3.3 Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

Меотодологија примењена приликом израде ове докторске дисертације може се сумирати кроз следећи низ активности:

- проучавање проблематике естимације параметара индустријских процеса
- преглед класичних метода за естимацију параметара
- анализа појаве импулсног шума у мерењима са индустријских постројења
- пројектовање робусног естиматора у циљу минимизације утицаја импулсног шума у оквиру мерења
- симулација рада алгоритма на често коришћеном примеру управљања ракетом
- анализа проблема детекције отказа у индустријским постројењима као праћење кретања естимираних параметара модела процеса
- анализа добијених резултата

Кључно место у овом истраживању као општа научна метода заузела је метода моделовања и робусне естимације параметара модела процеса, која је верификована кроз бројне симулације и на реалном процесу.

3.4 Оцена примењивости и верификације остварених резултата

На често коришћеном примеру у литератури, управљања ракетом, демонстрирана је примена предложеног алгоритма, а затим и извршено поређење са класичним методама идентификације, и са до сада у литератури представљеним робусним методама за идентификацију. Показано је да се нова метода (означена са ARA, Adaptive Robust Algorithm) успешно бори са појавом импулсног шума високог интензитета, значајно ефикасније од класичних метода, па и до сада представљених робусних алгоритама. Урађене симулације показују ефикасност датог ARA алгоритма и потврђује се да се и за различите статистике шума процеса и импулсног шума које нису претпостављене нормалне расподеле (у раду су анализирани случајеви када шум мерења има и униформну или Laplace-ову расподелу) постижу бољи резултати него применом до сада познатих процедура. На тај начин се потврдила ефикасност предложене ARA робусне процедуре.

У циљу илустрације примене адаптивне робусне процедуре идентификације одабран је котловски сепаратора паре, термоелектрана Костолац Дрмно, блок Б1 номиналне снаге 330 MW У оквиру овог система који је од круцијалног значаја за рад блока, налази се мерење нивоа воде у сепаратору (добош). Ово мерење је због саме природе посредног мерења нивоа (ниво се прерачунава на основу мерења притисака у сепаратору) у великој мери зашумљено импулсним шумом високог интензитета. У оквиру овог примера примене робусне идентификације, циљ је постизање ефикасне естимације кретања параметара система у смислу детекције стања система. Класичне рекурзивне методе које раде у реалном времену давале су резултате који се нису могли користити за детекцију отказа са захтеваним перформансама.

Након примене предложеног алгоритма добија се кретање параметара функције преноса од протока напојне воде и свеже паре до нивоа. Затим је извршена редукција димензија вектора параметара функције преноса димензије девет на дводимензиони вектор па је урађена

визуелизација у 2D простору. Исправан рад система и сваки тип отказа јасно се репрезентује кроз тачку у дводимензионој равни, при чему се ове тачке групишу у оквиру своје класе и могуће је пројектовати класификаторе који ће поуздано детектовати тип отказа или исправан режим рада свих подсистема. На овај начин је могуће утврдити неисправност мерача протока напојне воде, свеже паре или давача нивоа воде у сепаратору. Предложени алгоритам је врло ефикасан и у смилу детекције промене карактеристика појединих компоненти, као што су нпр. померај мерне бленде мерача протока воде или паре. Ефикасност и употребљивост предложеног метода на реалном систему потпуности потврђује примењивост предложене методе.

3.5 Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Резултати досадашњег научноистраживачког рада мр Горана Квашчева указују на његову упорност, креативност, иницијативност, самосталност, одговорност и зрелост, па тиме задовољавају све критеријуме Закона о високом образовању и јасно показују да кандидат поседује све услове за самосталан научни рад.

4. Остварени научни допринос

4.1 Приказ остварених научних доприноса

Рад на овој дисертацији је резултовао следећим доприносима: дат је преглед најважнијих приступа у проблему детекције и изолације отказа у системима, приказане су најчешће коришћене технике за идентификацију процеса у индустрији, дат је преглед различитих приступа у домену робусне естимације параметара, а затим је предложен нови метод за робусну идентификацију система који је заснован на техници QQ-криве М-робусном естиматору. Извршена је детаљна анализа у смислу ограничења предложеног метода и извршено је исцрпно поређење предложеног метода са робусним и конвенционалним техникама за естимацију параметара система. Затим је извршена је примена развијеног метода на примеру идентификације сепаратора паре у термо-енергетским постројењима и постављени су основи за даљу детекцију и изолацију отказа на овом систему.

4.2.Подаци о објављеном научном раду у вези са дисертацијом

Кандидат је у току истраживања публиковао више радова из области дисертације, а рад "*Adaptive recursive M-robust system parameter identification using the QQ-plot approach*" је у часопису *IET Control Theory Application* прихваћен као *full paper* и штампан је у 2011 години, број 4. У оквиру рада је предложен поступак који омогућава минимизацију утицаја импулсног шума на идентификацију параметара. Ова процедура се заснива на адаптивној М-робусној естимацији параметара заснованој на примени QQ-дијаграма. У раду је представљен алгоритам који се састоји од следећих корака: класификација података применом QQ-дијаграма на „добра“ и „лоша“ мерења на основу степена контаминације, естимација статистика ове две класе података, а затим естимација функција густине вероватноће шума процеса, и пројектовање робусног естиматора параметара процеса који ће минимизовати утицај импулсних мерења високог интензитета.

4.3.Могућа даља истраживања

Даље истраживање у овој области би било посвећено пројектовању класификатора, који би са унапред захтеваном тачношћу детекције отказа и појаве лажног аларма вршили одређивање стања система. Затим би се анализирао брзина реакције таквог система, у смислу брзине детекције отказа у зависности од вероватноће појаве лажног аларма. Тада би било могуће испројектовати класификатор који би са унапред жељеном вероватноћом тачне детекције стања, у оквиру предефинисаног времена био у стању да изврши поуздано

алармирање особља и доведе до благовремене реакције која би спречила теже хаварије у индустријским постројењима.

5. Закључак и предлог

На основу свега изложеног, Комисија констатује да дисертација испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације на Електротехничком факултету у Београду. Комисија сматра да докторска дисертација мр Горана Квашчева, под насловом **"Робусна идентификација индустријских процеса"**, садржи оригиналне научне доприносе, па има задовољство и част да предложи Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да ову дисертацију прихвати и одобри њену усмену јавну одбрану.

У Београду 28.12.2011. године

Чланови Комисије:

др Жељко Ђуровић, редовни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др Бранко Ковачевић, редовни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др Србијанка Турајлић, редовни професор у пензији
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др Владимир Стевановић, редовни професор
Машински факултет Универзитета у Београду

Др Стевица Граовац, доцент
Електротехнички факултет Универзитета у Београду