

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Александре Марјановић

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5015/10-3 од 13. јула 2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Александре Марјановић под насловом

„Управљање температурном расподелом у котловима термоенергетских система на бази extremum seeking стратегије”

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

Кандидаткиња је тему докторске дисертације под називом „Управљање температурном расподелом у котловима термоенергетских система на бази extremum seeking стратегије“ пријавила Комисији за студије трећег степена на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, 23.06.2016. године и за ментора предложила проф. др Жељка Ђуровића.

Комисија за студије трећег степена разматрала је на својој седници одржаној 28.06.2016. године 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 седници одржаној 11.07.2016. године (број одлуке 5015/10-1), именovalo је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: проф. др Бранко Ковачевић, проф. др Мирослав Крстић (*University of California, San Diego, USA*), доц. др Жељко Ђуришић и доц. др Горан Квашчев.

На седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 01.11.2016. године, усвојен је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (број одлуке 5015/10-2).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници од 21.11.2016. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Управљање температурном расподелом у котловима термоенергетских система на бази extremum seeking стратегије“ (број одлуке 61206-5814/2-16).

Кандидат је предао докторску дисертацију 22.06.2017. године.

Комисија за студије трећег степена потврдила је на својој седници одржаној 28.06.2017. године испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Факултета је на својој седници, одржаној 13.07.2017. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: проф. др Жељко Ђуровић, проф. др Бранко Ковачевић, проф. др Мирослав Крстић (*University of California, San Diego, USA*), доц. др Горан Квашчев и доц. др Предраг Тадић (број одлуке 5015/10-3).

На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 3058/2 од 28.12.2010. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2010/2011, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета. По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно Статуту Универзитета 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

Александра Љ. Марјановић је рођена 16.09.1986. године у Ваљеву. Основну и средњу школу је завршила у Ваљеву. Електротехнички факултет у Београду је уписала 2005. године. На Одсеку за сигнале и системе дипломирала је 2009. године са просечном оценом 9.89. Мастер студије на истом одсеку завршила је са просечном оценом 10.00. Докторске студије на Електротехничком факултету је уписала 2010. године на модулу Управљање системима и обрада сигнала, где је положила све испите са просечном оценом 10.00. Ментор докторске тезе јој је проф. др Жељко Ђуровић.

По завршетку основних студија 2009. године добила је стипендију Фондације др Зоран Ђинђић за стручно усавршавање у Немачкој, где је у периоду од шест месеци обављала праксу на Institutу IHP GmbH (Innovations for High Performance Microelectronics). У току јула 2013. године, боравила је на Универзитету у Сан Дијегу, Калифорнија (UCSD, Cymer Center for Control Systems and Dynamics), под надзором проф. Мирослава Крстића. У току 2013. и 2014. године била је полазник курсева Европског института за управљање (EECI – European Embedded Control Institute).

У звање сарадника у настави на Одсеку за Сигнале и системе на Електротехничком факултету у Београду изабрана је октобра 2010. године. Од октобра 2011. године изабрана је у звање асистента при истој катедри, где је ангажована на рачунским и лабораторијским

вежбама из више предмета. Један је од коаутора уџбеника Сигнали и системи – Збирка решених задатака, који се користи у извођењу наставе на предмету Сигнали и системи. У току рада на Факултету, учествовала је на неколико пројеката, између осталог: FP7 пројекат PRODI (Power plants robustification based on fault detection and isolation algorithms), пројекат Министарства за науку и технолошки развој Повећање енергетске ефикасности и расположивости у системима за производњу и пренос електричне енергије развојем нових метода за дијагностику и рану детекцију отказа, EUREKA пројекат NEUROTAMP (New Approach to Temperature Process Control Based on Soft Computing Methods), TEMPUS пројекат NeReLa, пројекат билатералне сарадње између Италије и Србије RODEO (Robust decentralized estimation for large-scale system),...

Област истраживања Александре Марјановић обухвата обраду сигнала, теорију естимације, препознавање облика, моделирање и идентификацију система и њихову примену у оптимизацији процеса управљања и пројектовању техника за детекцију и изолацију отказа. Досадашњи резултати кандидата приказани су кроз неколико публикација и то: 7 радова у међународним часописима, 2 рад у домаћем часопису, 16 радова на међународним конференцијама, 12 радова на домаћим конференцијама.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација под насловом “Управљање температурном расподелом у котловима термоенергетских система на бази extremum seeking стратегије” написана је на 116 страна куцаног текста на српском језику, латиничним писмом. Текст дисертације је организован у шест поглавља којима су додељени следећи наслови: 1. Увод; 2. Карактеристике и могућности унапређења процеса сагоревања; 3. Преглед управљачких стратегија у термоенергетским системима; 4. Extremum seeking kao strategija za upravljanje složenim sistemima; 5. Моделирање и управљање процесом ложења у котлу; 6. Закључак. На почетку дисертације дати су Резиме на српском и енглеском језику, Садржај, Листа слика (укупно 65), Листа табела (укупно 2). Иза последњег поглавља дат је списак коришћене литературе са 119 референци наведене по редоследу цитирања у тексту дисертације и Биографија кандидата.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводно поглавље је истиче значај и предмет истраживања докторске дисертације, а истовремено даје и преглед битних истраживања у овој области. Ово поглавље објашњава важност надгледања и праћења процеса сагоревања са јасно назначеним предностима и недостацима постојећих процедура, а са циљем даљег унапређења овог процеса. У недостатку истовремено тачног и брзог модела, акценат је стављен на могућност визуелизације понашања пламена коришћењем мреже интелигентних сензора која се састоји од одговарајућег броја пирометарских јединица постављених по различитим хоризонталним пресецима котла. Поред тога, наглашен је значај корекције учешћа додавача млинова за потребе управљања расподелом температуре, што до сада у литератури није разматрано. Ово поглавље даје и кратак преглед савремених трендова у оптимизацији процеса сагоревања, са посебно наглашеним покушајима за управљање просторном расподелом температуре. Коначно, дат је кратак историјски развој области extremum seeking-a, са објашњеним могућностима примене ове методе у регулацији сложених процеса, без захтева за познавањем модела.

Друго поглавље даје преглед битних глобалних карактеристика блока у термоелектрани, са акцентом на блок ТЕНТ Б1. Детаљно је приказано котловско постројење са описом протока масе у трактовима вода-пара и ваздух-димни гас и представљена улога најзначајнијих актуатора (вентилатора свежег ваздуха, млинова,...), као и принципа рада пирометарске јединице и инсталисаног система за визуелизацију у ТЕНТ-у Б1. У оквиру њега је објашњена улога пирометарског сензорског система у стварању 3D слике о температурној расподели у котлу. Додатно, у оквиру овог поглавља дата су и теоријски елементи процеса сагоревања, са јасно дискутованим последицама неадекватног температурног поља, тј. постојања нежељених, високих температура у котлу у смислу већих температурних губитака, наступања постепених и наглих отказа, великих количина шљаке и чађи, као и штетних оксида азота и сумпора. На основу свега тога, истакнут је значај и могућности праћења и унапређења процеса сагоревања.

Треће поглавље даје теоријски преглед конвенционалних и неконвенционалних управљачких структура које се најчешће користе у електроенергетским постројењима и постојећих решења у оптимизацији појединих подсистема од интереса. Најбројније примене се односе на ПИД регулаторе и њихове модификације, који покривају преко 90% свих управљачких структура у индустрији. Због велике примене, временом су развијене и напредније структуре ПИД регулатора које обухватају и могућности адаптације структуре и параметара. Додатно су описане примене напреднијих управљачких алгоритама који се односе на оптимално управљање (минимизацију/максимизацију унапред задате критеријумске функције) и примену вештачке интелигенције (неуралне мреже, фази логика,...). Они се користе онда када линеарни закони управљања не постижу задовољавајуће перформансе. Коначно, са становишта унапређење постојећег процеса прерасподеле ложења битно је објаснити и тренутно решење примарне регулације у ТЕНТ-у Б1, које је описано у овом поглављу.

Четврто поглавље нуди решење регулационог задатка применом ES управљања које не захтева експлицитно познавање улазно-излазне карактеристике система, већ само постојање екстремне вредности која одговара жељеном понашању система у затвореној спрези и доступност мерења улаза и излаза. У оквиру овог поглавља дат је преглед постојећих примена ES управљања у индустрији. Детаљно су приказани општи принципа екстремум сеекинг стратегије, као и различитих структура овог алгорита доступних у литератури. Посебна пажња је посвећена ES стратегији на бази синусоидалног пертурбационог сигнала и илустрацији утицаја промене појединих значајних параметара ове структуре на понашање поступка оптимизације. На самом крају, објашњено је проширење алгорита на мултиваријабилну структуру, који ће и бити разматрана у регулацији расподеле температуре.

Централни доприноси ове тезе су приказани у поглављу пет. Анализа мерења прикупљених у ТЕНТ-у Б1 потврдила је потребу за унапређењем постојеће структуре регулације, као и иницијалне хипотезе да се на расподелу температура може утицати корекцијом ложења. Детаљна анализа утицаја појединих брзина дозатора одговарајућих активних млинова на промену пирометарским системом измерених температура на различитим висинама и позицијама дата је применом корелационе анализе. У наредном кораку је описана процедура идентификације процеса чији је резултат добијање адаптивног модела на коме ће бити тестирана предложена структура регулације. Прилагођење изабране методе идентификације нестационарним условима у котловском постројењу предложено је у форми рекурзивног алгорита, која омогућава праћење промена радних режима уз одговарајуће прилагођење параметара модела. Након тога је дат опис одговарајућих корака у примени ES стратегије у смислу формирање адекватне критеријумске функције на основу релевантних мерења прикупљених са пирометарског система и избора параметара контролера за конкретан проблем корекције ложења, као и резултати симулације рада овакве регулационе структуре. Примена ES алгорита је разматрана и за потребе регулације температуре паре на излазу из испаривача. Коначно, како би се створила јасна слика о универзалности и применљивости добијених закључака и резултата, предложена управљачка стратегија, са адекватним

корекцијама структуре и параметара, је имплементирана и на мерењима прикупљеним на блоку ТЕНТ А6.

У последњем, шестом поглављу сумирани су остварени резултати и дати могући правци даљег рада.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Термоелектране представљају већинске произвођаче електричне енергије у свету. Због тога и строгих захтева по питању заштите животне средине, унапређење процеса сагоревања је од суштинског значаја. У прилог томе говори и чињеница да је велики број радова у доступној литератури посвећен могућностима унапређења регулације процеса сагоревања. Као последица неадекватне регулације јављају се разни нежељени ефекти попут повећаног таложења на зидовима прегрејача, економајзера, загрејача ваздуха и других подсистема котла, убрзане корозије прегрејача и загрејача, прегревања цеви конвекцијом, повећане температуре димних гасова на излазу из котла, која доводи до губитака топлоте и смањења ефикасности, као и повећана емисија оксида азота и сумпора, који су међу водећим загађивачима животне средине. Досадашњи покушаји за унапређењем процеса сагоревања се углавном свode на разна субоптимална решења која подразумевају смањење неког од претходно наведених нежељених продуката сагоревања, попут смањења емисије NOx. Међутим, истраживања су показала да се на све горенаведене негативне аспекте сагоревања може утицати адекватном регулацијом температурне расподеле унутар котла. Са друге стране, јединственог квантитативног критеријума који ће бити мера квалитета температурне расподеле у ложишту нема. У том смислу један од основних оригиналних доприноса ове дисертације јесте предлагање новог прилаза регулацији геометрије пламена кроз формулисање јединствене критеријумске функције на бази мерења са потенцијалним проширењима у циљу укључивања ограничења управљачких променљивих. Савременост теме је подржана и чињеницом да се тек у скорије време у термоелектранама уводе различите врсте напредних сензора који би омогућили нагледање процеса сагоревања, као што је случај са пирометарским сензорским системом који је уведен у појединим термоелектранама у Србији. Коришћење информација које обезбеђује овакав систем је управо предмет истраживања ове дисертације.

Додатни допринос дисертације односи се на систематичан преглед могућности управљања просторном расподелом температуре на основу корекције оптерећења млинова, односно њима сразмерних учешћа одговарајућих добавача, односно брзина одговарајућих дозатора. До сада је корекција оптерећења млинова коришћена углавном за локалне потребе попут смањења оптерећења у случају преоптерећености, међутим кроз истраживање обухваћено овом дисертацијом је показано да се на позицију пламена унутар ложишта може утицати одговарајућом прерасподелом оптерећења међу млиновима. Детаљна корелациона анализа која показује да се повећањем учешћа добавача млина утиче на померање пламена од тог млина, као и да је природа овог утицаја слична по различитим висинама котла, још један оригиналан корак у изради ове дисертације. Неоспорни показатељ актуелности теме јесте и награда за најбољи рад на конференцији POWER-GEN Europe, одржане у Бечу, 2013. године додељена раду "One approach to combustion control in thermal power plant boilers" у којем је представљен део овог истраживања.

Примена *extremum seeking* методологије је веома актуелна у савременој инжењерској пракси, о чему говори и податак са *Google Scholar*-а дат у тези да број радова у току 2016. године који се баве овом тематиком износи преко хиљаду. Овај приступ до сада није коришћен у управљању просторном расподелом температуре, а од додатног су значаја резултати представљени у овој дисертацији који се односе на перформансе ES стратегије у

потискивању поремећаја, као и брзопроменљивим условима какви су у ложиштима термоенергетских система.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе коју је кандидат навео у дисертацији показује да је кандидат детаљно анализирао постојећу литературу и коректно навео референце на радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је 119 библиографских референци. Литература садржи велики број недавно објављених радова из високо-реномираних часописа који су везани за разматрани проблем, што сведочи о актуелности и значају истраживања. Поред радова других аутора, у листи референци налазе се и ауторски и коауторски радови самог кандидата. Говорећи о важности унапређења регулације термоенергетских система као значајни се наводе радови [1-5]. Међу приступима за надгледање и анализу процеса сагоревања у термоелектранама се користе приступи засновани на сложеним теоријским основама, попут CFD анализе [6,7], или на напредним сензорским системима, попут пирометарских [8]. Међу битним приступима оптимизацији процеса сагоревања издвојени су: примена CFD за смањење количине pepela [9], примена генетских алгоритама и неуралним мрежа за оптимизацију садржаја несгорелог угљеника [10], *support vector* машина за смањење емисије NOx [11], регулација пламена на основу његовог помераја у односу на центар ложишта [12] или обликовањем густине расподеле температуре на основу *B-spline* експанзије и MPC-а [13], и друго. Међу литературом битном за ES истакнути су они који доносе битне теоријске [14, 15] и практичне [16, 17] доприносе, са посебно наглашеним применама у енергетским постројењима [18, 19, 20].

- [1] D. Flynn, *Thermal power plant simulation and control*, IET, 2003.
- [2] W. Wojcik, K. Gromaszek, Z. Shegebayeva, B. Suleimenov, and B. Aron. *Optimal Control for Combustion Process*. Przegląd Elektrotechniczny, vol. 90, no. 4, pp. 157-160, 2014.
- [3] M. Stöllinger, B. Naud, D. Roekaerts, N. Beishuizen, and S. Heinz, *Pdf modeling and simulations of pulverized coal combustion—part 1: Theory and modeling*, Combustion and Flame, vol. 160, no. 2, pp. 384–395, 2013.
- [4] M. Stöllinger, B. Naud, D. Roekaerts, N. Beishuizen, and S. Heinz, *Pdf modeling and simulations of pulverized coal combustion—part 2: Application*, Combustion and Flame, vol. 160, no. 2, pp. 396–410, 2013.
- [5] C. Yin, S. Caillat, J. L. Harion, B. Baudoin, and E. Perez, *Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emissions from a 609MW utility tangentially fired pulverized-coal boiler*, Fuel, vol. 81, no. 8, pp. 997-1006, 2002.
- [6] C. Coimbra, J. Azevedo, and M. Carvalho, *3-D numerical model for predicting NOx emissions from an industrial pulverized coal combustor*, Fuel, vol. 73, no. 7, pp. 1128-1134, 1994.
- [7] E. Korytnyi, R. Saveliev, M. Perelman, B. Chudnovsky, and E. Bar-Ziv, *Computational fluid dynamic simulations of coal-fired utility boilers: An engineering tool*, Fuel, vol. 88, no. 1, pp. 9–18, 2009.
- [8] H. C. Zhou, C. Lou, Q. Cheng, Z. Jiang, J. He, B. Huang, Z. Pei, and C. Lu, *Experimental investigations on visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale pulverized-coal-fired boiler furnace*, Proceedings of the Combustion Institute, vol. 30, no. 1, pp. 1699–1706, 2005.
- [9] H. Vuthaluru and R. Vuthaluru. *Control of ash related problems in a large scale tangentially fired boiler using cfd modelling*, Applied Energy, vol. 87, no. 4, pp. 1418–1426, 2010.
- [10] Z. Hao, X. Qian, K. Cen, and F. Jianren, *Optimizing pulverized coal combustion performance based on ANN and GA*, Fuel Processing Technology, vol. 85, no. 2, pp. 113–124, 2004.
- [11] F. Si, C. Romero, Z. Yao, E. Schuster, Z. Xu, R. Morey, and B. Liebowitz, *Optimization of coal-fired boiler scrs based on modified support vector machine models and genetic algorithms*, Fuel, vol. 88, no. 5, pp. 806–816, 2009.

- [12] X. F. Wang and H. C. Zhou, *Simulation on an optimal combustion control strategy for 3-D temperature distributions in tangentially PC-fired utility boiler furnaces*, Journal of Environmental Sciences, vol. 17, no. 2, pp.305–308, 2005.
- [13] X. Sun, H. Yue, and H. Wang, *Modelling and control of the flame temperature distribution using probability density function shaping*, Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 28, no. 5, pp. 401–428, 2006.
- [14] H.-H. Wang and M. Krstic, “Extremum seeking for limit cycle minimization,” IEEE Trans. Autom. Control, vol. 45, pp. 2432–2437, 2000.
- [15] K. Ariyur and M. Krstic, *Real-time optimization by extremum-seeking control*, John Wiley & Sons, 2003.
- [16] N. Killingsworth, S. Aceves, D. Flowers, and M. Krstic, *Extremum seeking tuning of an experimental HCCI engine combustion timing controller*, In IEEE American Control Conference ACC'07, pp. 3665–3670, 2007.
- [17] C. Zhang and R. Ordóñez, *Numerical optimization-based extremum seeking control with application to ABS design*, IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 52, no. 3, pp. 454–467, 2007.
- [18] A. Ghaffari, M. Krstic, and S. Seshagiri, *Power optimization and control in wind energy conversion systems using extremum seeking*, in IEEE American Control Conference (ACC'13), pp. 2241–2246, 2013.
- [19] R. Singh, M. Kearney, C. Manzie, *Extremum-seeking control of a supercritical carbon-dioxide closed Brayton cycle in a direct-heated solar thermal power plant*, Energy, vol. 60, pp. 380–387, 2013.
- [20] E. Schuster, C. Romero, Z. Yao, and F. Si, *Integrated real-time optimization of boiler and post-combustion system in coal-based power plants via extremum seeking*, in IEEE International Conference on Control Applications (CCA'10), pp. 2184–2189, 2010.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру ове докторске дисертације представља комбинацију експерименталних и теоријских метода које су реализоване кроз неколико битних корака:

- Спровођење великог броја експеримената како би се сагледао рад система у различитим условима (за различиту дислокацију млинова, калоријске вредности угља, у присуству поремећаја, итд.). Експерименти су извођени на реалним системима у термоелектранама ТЕНТ А и ТЕНТ Б, током дужих временских периода. Са посебном пажњом је анализиран утицај промене оптерећења млина на промену температуре у ложишту котлова.
- Детаљна анализа снимљених података са циљем уочавања корелације између појединих учешћа млинова и доступних мерења температура. Корелациона анализа спада у непараметарске методе идентификације. За успешну примену корелационе анализе потребно је обезбедити перзистентност побудног сигнала, испитати осетљивост на мерни шум и осигурати стационарност сигнала на улазу и излазу. Приликом прикупљања података и током њихове анализе о овим претпоставкама је вођено рачуна. Корелациона анализа је спроведена за потребе уочавања веза између учешћа додавача и пирометарских температура, на основу којих су предложена адекватна упрошћења регулационе структуре.
- Дефинисање критеријума квалитета расподеле температура на основу доступних мерења је спроведено имајући у виду тенгенцијално ложење котла, које формира жижу лоптастог облика, са температуром која опада са удаљавањем од центра. У складу са тим, и претходно спроведеном корелационом анализом, предложена је критеријумска функција која се формира на основу мерења пирометара на једном од попречних пресека котла. Формулисана критеријумска функција је конвексна са јасно

израженим минимумом једнаким нули, који одговара симетричном пламену (онда када је језгро лоптастог, алтернативно елипсоидног облика), па се решавање овог проблема своди на минимизацију критеријумске ϕ -је. Проширење овакве критеријумске функције уведено је за потребе ограничења над управљачким сигнаlima, а реализовано у форми додатног фактора који има вредност нула када су управљачки сигнали у оквиру ограничења, односно расте како се управљачки сигнал удаљава од задатог опсега.

- Имајући у виду да је процес сагоревања врло сложен систем, за његову регулацију се препоручују управљачке структуре које не захтевају експлицитно познавање модела. Прилагођење стандардне ES структуре са синусоидалним пертурбацијама за примену на конкретном проблему са више улаза, који се у пракси крећу у предефинисаном опсегу је реализовано имајући у виду претходну корелациону анализу. Додатно, дефинисана критеријумска функција је изабрана у складу са даљом применом ES алгоритма. Управљачка структура као улаз прихвата температурна мерења добијених са пирометара, на одговарајући начин формира критеријумску функцију, а затим коришћењем синусоидалних пертурбационих сигнала прерачунава излазе који представљају односе оптерећења млинова у оквиру пара наспрамних млинова. Овакви управљачки сигнали се користе за прерачунавање брзине дозатора, односно оптерећења појединачних млинова, а у складу са захтевом за укупним оптерећењем датим од стране главног регулатора. Приликом озбора параметара контролера, посебна пажња је посвећена размакнутости временских скала динамике самог система и ES алгоритма.
- За потребе теситрања предложене управљачке структуре, формиран је једноставан модел који као улазе има брзине дозатора, сразмерне учешћима додавача млинова, а као излазе температуре очекиване као мерења на пирометрима. Предложен је модел који претпоставља да температура у сваком тренутку зависи од брзина дозатора и претходно измерених температура у котлу. Разматране су различите сложености модела, у смислу различитог реда. У дисертацији је предложена примена рекурзивног алгоритма најмањих квадрата (RLS) са експоненцијално отежињеним фактором заборављања (WRLS) за потребе естимације параметара оваквог модела. Оваква рекурзивна формулација је у складу са променљивим условима рада у котловском постројењу. Валидност оваквог модела је потврђена и поређењем са сложенијим моделом добијеног методом коначних елемената.
- Тестирање предложене управљачке структуре је спроведено кроз симулације у програмском пакету *Matlab*, над претходно поменутиим рекурзивним моделом добијеним из мерења снимљених на блоку термоелектране Никола Тесла Б1, Обреновац. Испитана је и могућност генерализације овакве структуре, односно њена примена у регулацији неког другог блока, па су симулације рађене и за блок термоелектране Никола Тесла А6. Додатно су испитане и перформансе предложене структуре у присуство поремећаја.
- Чувајући претходно предложену форму регулације, анализирана је могућност примене ES алгоритма за унапређења процеса убризгавања корекцијом учешћа додавача. У оваквој поставци, број излаза контролног алгоритма је исти, док су разматрана мерења, односно критеријумска функција другачије. Наравно, параметре контролера је потребно посебно подесити.

3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживања и развој нове управљачке структуре за регулацију температурне расподеле у котловима термоелектрана, обухваћена овом дисертацијом, показују да се повезивање система за визуелизацију процеса сагоревања и корекције управљачких величина ложења може успешно искористити у регулацији расподеле температура у котлу. Томе у прилог говоре и додатна тестирања спроведена у оквиру дисертације, а на котловима других термоелектрана, у којима су другачији радни услови, па чак и структура проблема, у смислу другачијег броја млинова. У складу са тиме, могуће је извршити имплементацију предложене структуре на реалном систему у виду надоградње на постојећи DCS систем са којим би заједно радила на унапређењу свеукупних перформанси котла. То би могло бити реализовано и кроз израчунавање вредности управљачких сигнала које би биле препоручене оператеру, не нужно и реализоване у реалном времену. Предложена структура управљања оставља и могућност да руковалац блока, из техничких разлога, фиксира учешће неког од млинова, како би спречио велике девијације температура аеросмеше, што је свакако једна од предности овакве регулације.

Додатно, кроз саму дисертацију је наглашено неколико закључака и доприноса који се могу користити у овако предложеној целини у случају сличних система, међутим сваки од њих се може користити и појединачно као основа за истраживања која би водила и ка пројектовању управљачких структура прилагођених другачијим системима.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња Александра Марјановић је кроз реализацију у потпуности демонстрирао све релевантне способности за самосталан научно-истраживачки рад. На првом месту, кандидаткиња је зрело предвидела и препознала актуелност, атрактивност и значај изабране теме. Литература коју је приложила је актуелна и релевантна за тему, што говори о систематичном и пажљивом избору. Циљеви дисертације, као и избор и презентација метода за спровођење истраживања и реализацију постављених задатака су јасно дефинисани и образложени. Анализа и дискусија резултата су садржајно и јасно приказани. Такође, закључци дисертације показују висок ниво спремности кандидаткиње да препозна квалитете и уверљиво представи најважније доприносе свог истраживања. 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 превазилазе недостатке постојећих решења. Остварени доприноси су оригинални и они сами по себи потврђују спремност и способност кандидаткиње за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни доприноси који су остварени у тези су следећи:

- Прегледом доступне литературе извршена је анализа већ постојећих структура за регулацију расподеле температуре, као и примене *ES* стратегије у управљању процесима са акцентом на термоенергетска постројења. Овакав преглед нуди детаљан увид у област регулације процеса у термоенергетским постројењима.
- Извршена је детаљна анализа природе и модела расподеле температурног процеса у зависности од учешћа млинова, која је као коначан исход дала јасан увид у утицај

појединих млинова на температуре измерене на различитим котама котла, као и могућности упрошћења врло сложеног управљачког алгоритма у виду смањеног броја контролних варијабли.

- Предложен је нови начин приступања проблему симетрије геометрије пламена у виду јединствене глобалне критеријумске функције на бази мерења температуре са назначеним потенцијалним проширењима у циљу укључивања ограничења управљачких променљивих.
- Предложен је нови приступ управљања температурном расподелом на основу корекције ложења млинова заснован на *ES* алгоритму, који се, захваљујући својој адаптивној природи и чињеници да не користи модел процеса, показао као врло ефикасан у регулацији овог нестационарног процеса, чак и у присуству поремећаја.
- Предложен је модел који претпоставља да температура у сваком тренутку зависи од брзина дозатора и претходно измерених температура у котлу на бази рекурзивног алгоритма најмањих квадрата са експоненцијално отежињеним фактором заборављања, чија је рекурзивна формулација у складу са променљивим условима рада у котловском постројењу.
- Предложен је нови начин унапређења процеса убризгавања на основу прилагођења учешћа додавача, а у циљу регулације температура на улазу у прегрејаче паре.
- Дата је експериментална анализа предложене стратегије на расположивим подацима из термоелектрана Никола Тесла у Обреновцу, уз јасан преглед унапређења, као и потенцијалних изазова.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем циљева истраживања, постављених хипотеза и остварених резултата, Комисија са задовољством може да констатује да је кандидат успешно одговорио на сва битна питања и дилеме које суштински произилазе из проблематике којом се дисертација бави. Међу доприносима дисертације издваја се систематична анализа утицаја прерасподеле ложења на температурно поље унутар ложишта. Овом приликом изведени закључци су генерални за тангенцијално ложене котлове и као такви се могу користити у бројним истраживањима. Међу значајне доприносе дисертације спада и формулисање критеријумске функције као глобалног показатеља симетричности пламена, која зависи искључиво од прикупљених температурних мерења. Област примене *extremum seeking* управљања је проширена и на регулацију температурне расподеле унутар котлова, где до сада није налазило примену. Додатно, показане су врло добре перформансе ове управљачке структуре у брзопроменљивим условима какви владају у котловима, али и при отклањању поремећаја, што је додатни допринос овог истраживања.

Наведени научни доприноси тезе представљају значајне кораке у погледу разумевања утицаја прерасподеле ложења на промену расподеле температуре. Полазећи од свега наведеног, може се закључити да резултати које је постигао кандидат дају чврст оквир и основу за препознавање овог рада као квалитетне докторске дисертације.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси дисертације верификовани су следећим радовима:

Категорија M21:

1. A. Marjanović, M. Krstić, Ž. Đurović, B. Kovačević, Control of Thermal Power Plant Combustion Distribution Using Extremum Seeking, IEEE Transactions on Control System Technology, vol. pp, no. 99, pp. 1-13, 2016. (IF = 3.882), (ISSN: 1063-6536) (DOI: 10.1109/TCST.2016.2627499)
2. N. Shashoa, G. Kvaščev, A. Marjanović, Ž. Đurović, Sensor fault detection and isolation in a thermal power plant steam separator, Control engineering practice, vol. 21, no. 7, pp. 908-916, 2013. (IF = 1.912), (ISSN: 0967-0661), (DOI: 10.1016/j.conengprac.2013.02.012)

Категорија M33:

1. A. Marjanović, P. Tadić, L. Cokić, Ž. Đurović, On Possibility of Modeling the Influence of Coal Firing Process Correction on Steam Drum Outlet Temperature in Thermal Power Plant, 13th International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM2016), Nis, Srbija, 2016.
2. A. Marjanović, M. Krstić, Ž. Đurović, G. Kvaščev, V. Papić, Combustion distribution control using the extremum seeking algorithm, 11th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD2014), Berlin, Germany, 2014.
3. A. Marjanović, S. Vujnović, V. Papić, P. Todorov, Robust adaptive parameter estimation of the thermal power plant combustion process, 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETAN2014), pp. AU11.1.1-5, Vrnjačka Banja, Serbia, 2014.
4. A. Marjanović, M. Jakovljević, G. Kvaščev, Ž. Đurović, Combustion process control based on flame visualization, Power turbines Europe 2013, Lisbon, Portugal, 2013.

Категорија M53:

1. A. Marjanović, M. Krstić, Z. Đurović, G. Kvaščev and V. Papić, Combustion distribution control using the extremum seeking algorithm, Journal of Physics: Conference Series, vol. 570, no. 5, 2014. (ISSN: 1742-6596), (DOI: 10.1088/1742-6596/570/5/052001)

Категорија M63:

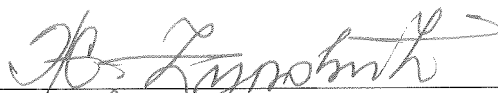
1. A. Marjanović, G. Kvaščev, P. Todorov, Ž. Đurović, Upravljanje prostornom raspodelom temperature u kotlu na osnovu vizuelizacije procesa sagorevanja, ETRAN 2013, Zlatibor, Srbija, 2013. (ISBN 978-86-80509-68-6)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

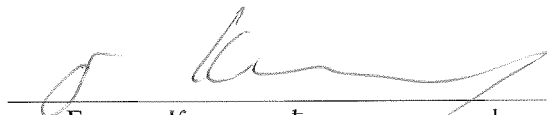
На основу свега изложеног, Комисија сматра да дисертација кандидаткиње Александре Марјановић испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације. Узимајући у обзир све наведене научне доприносе, предложена унапређења регулације температурног поља у котловима термоелектрана модификацијом прерасподеле ложења на бази extremum seeking алгоритма, као и њихову применљивост у реалним постројењима, показану зрелост кандидаткиње и њену способност за самостални научно-истраживачки рад, Комисија сматра да докторска дисертација Александре Марјановић 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 "Управљање температурном расподелом у котловима термоенергетских система на бази extremum seeking стратегије" прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 14.07.2017. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



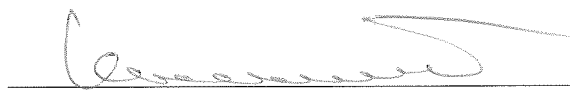
др Жељко Ђуровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



др Мирослав Крстић, редовни професор
University of California – San Diego



др Горан Квашчев, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Предраг Тадић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет