

# УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

## Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву

Доситејева 19

Краљево, 36 000

Факултет за машинство и грађевинарство

у Краљеву

Универзитета у Крагујевцу,

Број: 912

Датум: 14.07.2016 год.

Краљево, Доситејева 19.

### НАСТАВНО – НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** *Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата  
мр Саше Продановић, дипл. инж. маш.*

На предлог Наставно – научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, Одлука број: 828 од 29.06.2016. год. као и Одлуке број IV-04-696/10 од 13.07.2016. год., Већа за техничко – технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Саше Продановић, дипл. инж. маш., под насловом:

#### **„ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПИД РЕГУЛАТОРА ЗА МУЛТИВАРИЈАБИЛНЕ ПРОЦЕСЕ“**

На основу увида у приложену докторску дисертацију, Извештаја о подобности кандидата и теме докторске дисертације која је одобрена за израду Одлуком Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, број: 540 од 16.05.2013. год. и Одлуком стручног већа за техничко – технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, број: 389/9 од 10.07.2013. год. и Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно – научног већу следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### **1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области**

Докторска дисертација кандидата, мр Саше Продановић, дипл. инж. маш., под називом „Пројектовање ПИД регулатора за мултиваријабилне процесе“ је резултат научноистраживачког рада кандидата, који представља значајан допринос у области аутоматског управљања.



Велика разноликост и сложеност индустријских система условљава примену управљачких алгоритама пројектованих на бази доброг познавања природе управљаног објекта. Данас се у пракси најчешће сусрећу регулатори подешени за једноструко преносне (*single input single output – SISO*) системе, па чак и регулатори подешени методом покушаја и промашаја. Овај приступ се већ више деценија настоји превазићи. Наиме, разматрање система као да има једну улазну и једну излазну величину даје задовољавајуће резултате само у случају његове незнатне спрегнутости и код слабије наглашених захтева на квалитет његовог понашања. Међутим у већини система постоји мање или више изражена интеракција између управљачких петљи, где једна улазна величина може да утиче на промену више излазних величина. Ситуација се додатно усложњава због чињенице да поремећаји знатно више ремете управљање мултиваријабилних система. Због тога схватање и моделовање система као мултиваријабилног (вишеструко преносног – *multi input multi output – MIMO*) као и пројектовање управљачког система (регулатора) за квалитетно управљање свим његовим излазним величинама привлачи велику пажњу истраживача. У том смеру је реализована и ова докторска дисертација.

Пројектовање распрезивача и ПИД регулатора као и анализа и побољшање управљања користећи њихове различите комбинације представљају главни допринос дисертације. Истраживање различитих алгоритама управљања вршено је за системе са две улазне и две излазне величине (*two input two output - TITO*) из разлога што се многи системи у индустрији могу веома прецизно описати на овај начин и зато што се објекти представљени са матрицом преносних функција реда већег од два могу разматрати као скуп више  $2 \times 2$  објеката. У циљу добијања што јасније слике о квалитету пројектованих распрезивача, они су поређени у комбинацији са истим регулаторима. Аналогно томе поређени су регулатори за објекте, који су распрегнути помоћу истог распрезивача. Њихов заједнички ефекат на особине система управљања је валоризован на основу симулацијама добијених временских одзива система упоређених са резултатима из литературе за објекте који су веома често предмет истраживања.

ПИД регулатори су веома чести у пракси. Стога је њихова примена у мултиваријабилним системима разматрана и у овој дисертацији. С тим у вези остварено је побољшање методе децентрализованог релејног теста за пројектовање мултиваријабилних регулатора. Такође је предложен приступ одређивања мере поремећаја, које разматрани систем управљања може успешно компензовати.

Пројектовањем алгоритама управљања и њиховим тестирањем на објектима различите природе, као и након анализе остварених резултата и њиховог поређења са скоријим истраживачким резултатима, основна хипотеза докторске дисертације: „За мултиваријабилне процесе могуће је пројектовати мултиваријабилне регулаторе, као и аутоматизовати њихово подешавање применом релејног експеримента“, је потврђена.

Узимајући у обзир теоријски и практични аспект, остварени резултати представљају веома значајан допринос у истраживању на пољу мултиваријабилних система аутоматског управљања са акцентом на пројектовање два саставна дела управљачког система: ПИД регулатора и распрезивача.



## **2. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области**

Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата, мр Саше Продановић, дипл. инж. маш., резултат оригиналног научног рада кандидата. Обрађена тема је веома актуелана и значајна за развој науке у области управљања мултиваријабилних система, тј. пројектовања управљачког система састављеног од ПИД регулатора и распрезивача. Поштујући научне принципе, кандидат је детаљно и студиозно обрадио тему примењујући адекватна знања из научних дисциплина, које је условила њена мултидисциплинарност. Према томе, оригинални научни рад кандидата има шири значај за област аутоматског управљања.

У оквиру свог истраживања кандидат је анализирао и према деловима дисертације груписао научне и стручне резултате, који су објављени у релевантној литератури. Оригинално истраживање и резултата кандидата огледа се у приступу пројектовању регулатора, који се знатно разликује од често коришћеног пројектовања на основу показатеља особина система у комплексном домену. Поред теоријских истраживања, кандидат је провео и обимна нумеричка истраживања, како при пројектовању управљачког система тако и за анализу и валидацију квалитета добијених алгоритама управљања. У ту сврху математички је моделовао један индустријски процес, док је остале преузео из литературе да би омогућио упоредивост резултата.

Коришћењем различитих теоријских знања и искустава, уз развијање одговарајућих и веома комплексних симулационих модела, кандидат је показао способност за самостално бављење научноистраживачким радом.

## **3. Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области**

Мр Саша Продановић, дипл. инж. маш., је рођен 26.09.1977., године у Сарајеву. Дипломирао је 2004. године на Машинском факултету, Универзитета у Источном Сарајеву, одсек производно машинство, смер производна техника, са оценом 10 (десет) и просечном оценом у току студирања 8,00 (осам). У звању асистента на Машинском факултету, Универзитета у Источном Сарајеву је радио од 2004. – 2009. Последипломске студије је завршио 2009. године одбранивши магистарски рад под насловом „Анализа и побољшање система управљања нивоом кондензата у кондензатору турбине термоелектране Гацко“, на Машинском факултету Краљево, Универзитета у Крагујевцу, на смеру системи аутоматског управљања, са просечном оценом у току студирања 9,33 (девет и 33/100). У звању вишег асистента на Машинском факултету, Универзитета у Источном Сарајеву ради од 2009. године.

Као аутор и коаутор објавио је више радова из области аутоматског управљања на домаћим и међународним конференцијама и у међународним часописима од којих је један



у часопису са SCI листе. Учествовао је у реализацији 2 пројекта, које је суфинансирало Министарство науке и технологије Републике Српске као и 2 Tempus пројекта. У наставку су приказани најважнији радови, који садрже резултате истраживања у области докторске дисертације.

#### **I Рад у међународном научном часопису са SCI листе - [M<sub>23</sub>]**

1. **Prodanović SLj**, Nedić NN, Filipović VŽ, Dubonjić LjM, “Modified approach to distillation column control“, *Hemijska Industrija*, (2016) DOI:10.2298/HEMIND160326028P, ISSN 0367-598X

#### **II Рад на међународном скупу штампан у целини - [M<sub>33</sub>]**

1. **S. Prodanović**, N. Nedić, V. Filipović, “Improved Auto-tuning PID Controller of Level in Condenser of Turbine in Thermal Power Plant Using Saturation-relay Feedback“, *Proceedings of the X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements*, Niš, Serbia, 2010., pp. 68-71, ISBN 978-86-6125-020-0
2. N. Nedić, V. Filipović, **S. Prodanović**, “Auto-tuning of PID Controller for System Turbine-Condenser in the Thermal Power Plant“, *Proceedings of the Seventh Triennial International Conference Heavy Machinery*, Vrnjačka Banja, Serbia, 2011., pp. 1-6, ISBN 978-86-82631-58-3
3. N. Nedić, V. Filipović, **S. Prodanović**, “Energy Saving in the Power Plants Using Automatic Control“, *Proceedings of the 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems ECOS*, Novi Sad, Serbia, 2011., pp. 1843-1855, ISBN 978-86-6055-016-5
4. **S. Prodanović**, N. Nedić, V. Filipović, “Comparison of Two Mathematical Models for Control System of Level in Condenser of Turbine in the Thermal Power Plant“, *Proceedings of the Process Technology and Environmental Protection, PTEP*, Zrenjanin, Serbia, 2011., pp. 185-189, ISBN 978-86-7672-152-8
5. V. Filipović, N. Nedić, **S. Prodanović**, “Reduced Energy Cost through the Furnace Pressure Control in Power Plants“, *Proceedings of the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems ECOS*, Perugia, Italy, 2012., pp. 367; 1-9, ISBN 978-88-6655-322-9
6. N. Nedić, **S. Prodanović**, “Some Modifications in the Process Identification and Tuning of Controller of Level in Condenser in Thermal Power Plant“, *Proceedings of*



the XI International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements SAUM, Niš, Serbia, 2012., pp. 382-385, ISBN 978-86-6125-072-9

7. N. Nedić, **S. Prodanović**, “Comparison of Two Approaches to Identification Process of Condenser in Thermal Power Plant“, Proceedings of the Eighth Triennial International Conference Heavy Machinery, Zlatibor, Serbia, 2014., pp. D.17-D.22, ISBN 978-86-82631-74-3
8. **S. Prodanović**, V. Brašić, “Simulation results of parameter estimation for a given ARX model-system identification“, Proceedings of the Eighth Triennial International Conference Heavy Machinery, Zlatibor, Serbia, 2014., pp. D.79-D.84, ISBN 978-86-82631-74-3
9. **S. Prodanović**, N. Nedić and V. Brašić, “Some Considerations of Mutual Coupling in Multivariable Processes“, Proceedings of the XII International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, Niš, Serbia, 2014., pp. 257-260, ISBN 978-86-6125-117-7
10. **S. Prodanović**, N. Nedić, Lj. Lukić, “Possibilities for Disturbance Rejection in the Decoupled TITO Process“, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Scientific Conference MMA 2015 - Flexible Technologies, Andrijevica, Serbia, 2015., pp. 71-74, ISBN 978-86-7892-722-5
11. **S. Prodanović**, A. Košarac, “A Comparative Analysis of Direct and Inverted Decoupling for TITO Process“, Proceedings of the V International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection (IIZS 2015), Zrenjanin, Serbia, 2015., pp. 223-227, ISBN 978-86-7672-259-4
12. **Prodanović S**, Nedić N, “Control improvement of a double actuator electrohydraulic servosystem for structural testing“, Proceedings of the 15<sup>th</sup> Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics YSESM 2016, Rimini, Italia, 2016. (у штампи)

### III Рад у часопису националног значаја - [M<sub>53</sub>]

1. A. Košarac, **S. Prodanović**, M. Zeljković: “Possibilities for Interactive Control of Machine Tools in the Virtual Reality Environment”, ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering, Tome IV (2013) – FASCICULE 4 [October - December], pp. 105-108, ISSN 2067-3809
2. **S. Prodanović**, N. Nedić, „Non-conventional Control of Level and Temperature in the Flow Tank“, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal

#### **4. Оцена о испуњености обима и квалитета докторске дисертације у односу на пријављену тему**

Докторска дисертација кандидата, мр Саше Продановић, дипл. инж. маш., под називом „Пројектовање ПИД регулатора за мултиваријабилне процесе“, је написана на 104 стране, при чему је цитирана литература наведена у 72 библиографске јединице. Докторска дисертација је изложена кроз 8 поглавља.

1. Увод
2. Опис концепта сложеног мултиваријабилног система
3. Преглед досадашњих истраживачких резултата
4. Математички модели конкретних мултиваријабилних система
5. Пројектовање мултиваријабилних П, ПИ И ПИД регулатора
6. Пројектовање распрезивача у циљу разлагања сложеног система
7. Примена релејног теста за пројектовање мултиваријабилних регулатора
8. Закључци

Литература

Прилози

Изјаве аутора

У уводу, као првом поглављу, скренута је пажња на проблеме, који се јављају при управљању мултиваријабилних (вишеструко преносних) система. Наведени су разлози за истраживање ове врсте система као и коришћени приступи.

Концепт мултиваријабилног система дат је у другом поглављу. Представљене су његове основне особине и разлике у односу на једнострукто преносни систем. Приказани су математички показатељи квалитета понашања, који се често користе за анализу и синтезу ових система.

У трећем поглављу обухваћен је преглед досадашњих истраживачких резултата у пројектовању мултиваријабилних регулатора. Научни резултати су наведени из два дела. Прво су наведени доприноси у пројектовању распрежућег управљања путем распрезивача



као одвојеног елемента у оквиру управљачког система, а затим методе пројектовања регулатора, који у својим елементима садржи функцију распрезања.

Четврто поглавље садржи функционалне шеме и математичке моделе објеката, чије је управљање у овом истраживању побољшано. Неки модели су изведени у дисертацији на основу физичких закона који владају у њима, а неки су узети из литературе где су добијени методама идентификације и до сада су као веома репрезентативни и тачни коришћени у радовима многих истраживача. Разматрани модели су послужили за оцену квалитета предложених алгоритама управљања.

Пето поглавље чине различити типови централизованог распрежућег управљања. Пројектовани су: директни распрезивач са децентрализованим ПИ регулатором, инверзни статички распрезивач у комбинацији са П, ПИ и ПИД регулатором и поједностављени распрезивач са ПИД регулатором пројектованим методом Д – декомпозиције. Такође, предложен је приступ за одређивање могућности система у погледу компензације дејства поремећаја.

У шестом поглављу су дефинисане мере интеракције. Изведени су парцијални индекси интеракције, који квантификују ниво спрегнутости. Сваки овај индекс изражава утицај спрежања на одговарајући показатељ квалитета одзива. Поред тога, предложен је итеративни приступ пројектовању распрезивача на основу задовољавања постављених квантитативних ограничења на поједине параметре одзива. Назначене су предности овог начина пројектовања за случајеве када се не познаје и када се познаје математички модел система.

Побољшање децентрализованог релејног теста за пројектовање мултиваријабилних П, ПИ и ПИД регулатора је изложено у поглављу седам. Једноставност и могућност *on-line* имплементације без познавања математичког модела система наводе на веома честу употребу релејног теста, а то континуирано наглашава потребу за његовим истраживањем и усавршавањем. У предложеном приступу релејни тест се проводи за претходно распрегнут објекат управљања. Предложене су модификације одговарајућих параметара неопходних за његову реализацију.

Закључци су наведени у осмом поглављу. Наглашени су кључни научни доприноси у дисертацији и предложени су могући правци даљих истраживања.

Даље је дат списак коришћених библиографских јединица. У прилозима су дати блок дијаграми који се односе на разматрање дејства поремећаја и Матлабов код за реализацију итеративног подешавања распрезивача. Одговарајуће изјаве аутора дисертације су на њеном самом крају.

На основу свега наведеног, Комисија закључује да су у потпуности испуњени очекивани резултати наведени у Извештају комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације, број 389/9 од 10.07.2013. године и да је испоштован оквирни садржај рада наведен у поменутом Извештају.



## 5. Научни резултати докторске дисертације

У оквиру докторске дисертације кандидат је дао преглед и извршио анализу досадашњих истраживачких резултата из области. У свом истраживању, кандидат је остварио резултате од научног и практичног значаја, који се наводе у наставку:

- Разматрајући интензитет спрезања  $2 \times 2$  система, уведени су парцијални индекси интеракције, који се односе на појединачне показатеље квалитета одзива система, у циљу квантификавања нивоа спрегнутости.
- Разматрани су различити типови централизованог распрежућег управљања за више објеката. Пројектован је директни распрезивач са децентрализованим ПИ регулатором за управљање нивоа и температуре у проточном резервоару.
- Пројектован је инверзни статички распрезивач у комбинацији са П, ПИ и ПИД регулатором за управљање силама на клипњачама електрохидрауличког сервосистема, који се користи за тестове структуре. Размотрена су два метода пројектовања регулатора у комбинацији са поменутиим распрезивачем: први користећи појединачни релејни тест, а други помоћу аутоматизованог алата у софтверу Матлаб.
- Пројектован је управљачки систем, који је комбинација поједностављеног распрезивача и ПИД регулатора пројектованог методом Д – декомпозиције и испитан је за управљање бинарне дестилационе колоне.
- Предложен је приступ за одређивање границе интензитета поремећаја, који систем може успјешно компензовати у складу са постављеним захтевима.
- Развијен је итеративни приступ пројектовању распрезивача заснован на задовољавању постављених ограничења на поједине параметре одзива. Коришћењем симулација разграничене су могућности примене предложене методе на реалном систему без познавања његовог математичког модела и за случај када је математички модел претходно познат.
- Усавршен је децентрализовани релејни тест за пројектовање мултиваријабилних П, ПИ и ПИД регулатора као основа за њихово самоподешавање. Побољшање је остварено његовом применом на претходно распрегнут објекат и модификацијама одговарајућих параметара неопходних за реализацију ове методе пројектовања.

## 6. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси

Постигнути резултати у оквиру докторске дисертације на пољу пројектовања управљачког система представљају добру базу за даља истраживања у оквиру теорије аутоматског управљања. Предложени приступ, као улазне податке за синтезу, узима унапред



дефинисане вредности показатеља квалитета одзива управљаног објекта. Такође омогућава остваривање компромиса између њихових граничних вредности при дефинисању жељеног понашања система. Наведене чињенице изражавају његову флексибилност и корисност у погледу применљивости на различите моделе система аутоматског управљања (САУ) коришћењем нумеричких симулација. Кориштећи доступне и идентификацијом добијене моделе из литературе, анализирана је доказана применљивост предложених алгоритама управљања на широк спектар различитих објеката у пракси. У прилог практичној примени уведених алгоритама управљања иде и незауостављива компјутеризација управљачких система у индустрији.

## **7. Начин презентовања резултата научној јавности**

Део резултата из ове дисертације је већ представљен научној јавности објављивањем радова у међународним и националним научним часописима и на међународним научним конференцијама.

Комисија сматра да истраживања и научни резултати докторске дисертације представљају користан и обиман материјал за објављивање у међународним и националним научним часописима и на међународним и националним научним конференцијама, који се баве тематиком аутоматског управљања.

## **8. Закључак и предлог Комисије**

На основу увида у резултате истраживања презентоване у докторској дисертацији и на основу свега претходно наведеног Комисија доноси следећи

### **ЗАКЉУЧАК**

Докторска дисертација кандидата мр Саше Продановића, дипл. инж. маш., у потпуности је реализована сагласно плану истраживања и постављеним хипотезама. Дисертација представља оригиналан резултат вишегодишњег научноистраживачког рада кандидата уз коришћење савремених метода као и савремене научне и стручне литературе. Кандидат је показао висок степен стручног знања, способност и зрелост за самосталан научноистраживачки рад.

Докторска дисертација кандидата мр Саше Продановића, дипл. инж. маш., по квалитету, обиму и резултатима истраживања задовољава све формалне и суштинске услове одређене Законом о високом образовању и Правилником Универзитета у Крагујевцу и Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву.



На основу свега наведеног, предлажемо Наставно – научном већу Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву и Већу за техничко – технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, да прихвате докторску дисертацију кандидата мр Саше Продановића, дипл. инж. маш. под насловом:

**„ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПИД РЕГУЛАТОРА ЗА МУЛТИВАРИЈАБИЛНЕ ПРОЦЕСЕ“**

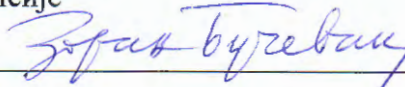
као успешно урађену и да позову кандидата на усмену јавну одбрану дисертације.

У Краљеву,

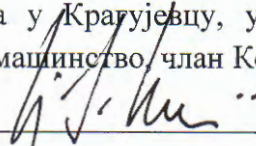
јул, 2016. године

**ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ**

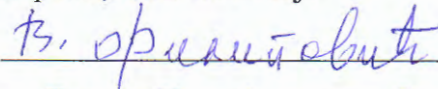
1. **др Зоран Бучевац**, редовни професор, Машински факултет Универзитета у Београду, ужа научна област: Аутоматско управљање, председник Комисије



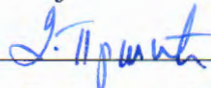
2. **др Љубомир Лукић**, редовни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производно машинство, члан Комисије



3. **др Војислав Филиповић**, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Аутоматско управљање, флуидна техника и мерења, члан Комисије



4. **др Драган Пршић**, доцент, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Аутоматско управљање, флуидна техника и мерења, члан Комисије



5. **др Љубиша Дубоњић**, доцент, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Аутоматско управљање, флуидна техника и мерења, члан Комисије

