

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ  
КРАЉЕВО

Факултет за машинство и грађевинарство  
у Краљеву  
Универзитета у Крагујевцу,  
Број: 1116  
Датум: 13.09. 2013 .год.  
Краљево, Доситејева 19.

## НАСТАВНО - НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Извештај Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Владимира Стојановића, дипл. инж. маш.

Одлуком Наставно – научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, број: 985/7 од 27.08.2013. године именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Владимира Стојановића, дипл. инж. маш., под називом:

**“Планирање експеримента за робусну идентификацију динамичких система”**

На основу прегледа докторске дисертације, Комисија подноси Наставно - научног већу следећи:

## ИЗВЕШТАЈ

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

Докторска дисертација кандидата Владимира Стојановића дипл. маш. инж., под називом: “Планирање експеримента за робусну идентификацију динамичких система” представља резултат научноистраживачког рада кандидата у области робусне идентификације динамичких система.

Претрагом литературе утврђено је да су у овом тренутку веома интензивна истраживања у подручју генерисања оптималних улазних сигнала. Повећана брзина конвергенције алгоритама идентификације чини их веома повољним за практичну примену. Главни циљ докторске дисертације је добијање математичког модела система користећи теорију идентификације. Модел се тражи у класи стохастичких модела за случај негаусовог шума. Такав модел је предуслов за пројектовање широке класе индустријских регулатора.

У постојећој литератури су разматрани рекурзивни алгоритми идентификације и планирање експеримента засновани на грешци предикције и на претпоставци да стохастички поремећај има Гаусову расподелу. Главни допринос тезе јесте синтеза рекурзивних алгоритама идентификације уз планирање експеримента за следећи случај који у литератури није разматран:

- ✓ Модели са грешком излаза (ОЕ модели)
- ✓ Поремећаји су негаусови при чему постоји априорна информација о класи расподеле којима поремећај припада. Применом стохастичке теорије игара одређује се најнеповољнија расподела на класи расподела за коју се врши синтеза робусног алгорита.

Такође је претрагом литературе утврђено да се за генерисање улазних сигнала са задатом аутоковаријансом користи алгоритама који је заснован на идејама из предиктивног управљања. Генеришу се бинарни сигнали са задатом аутоковаријансом и нултом очекиваном вредношћу. Ови сигнали имају особину да дају максималну енергију за дату амплитуду. Постојећа литература не нуди рекурзивни алгоритама који генерише бинарне сигнале са жељеном аутоковаријансом на произвољном интервалу. Управо тај простор кандидат је искористио да уопшти постојећи алгоритама и модификује га да генерише бинарне сигнале са произвољном очекиваном вредношћу.

Са друге стране, оправданост разматрања идентификације система у присуству негаусовог шума мерења потврђена је у пракси. Наиме, у мерењима постоје опсервације које су неконзистентне са већином популације опсервација (аутлајери) чије присуство значајно деградира перформансе линеарних рекурзивних алгоритама који су засновани на претпоставци да је шум мерења има Гаусову расподелу. Због тога је синтеза робусних алгоритама од примарног значаја. Као оквир за реализацију робусних алгоритама идентификације у литератури се предлаже Масрељез-Мартинов филтар (робусни Калманов филтар). Овај филтар има малу осетљивост на присуство аутлајера у поређењу са стандардним Калмановим филтром. Оригинално предложени робусни Калманов филтар укључује две величине које није лако одредити у практичним условима. Такође, релевантна литература не нуди робусни алгоритама који у случају чистог Гасовог шума даје резултате као и Калманов филтар, који представља оптимални филтар за линеарне системе, у смислу најмање средње квадратне грешке. Да би се искоренили недостаци постојећих алгоритама идентификације и повећала флексибилност у циљу практичне примене у тези су предложене две хеуристичке модификације. Оправданост оваквих интервенција је у овој докторској дисертацији показана теоријском анализом а илустрована интензивним симулацијама.

## **2. Оцена оригиналности научног рада кандидата**

Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Владимира Стојановића, дипл. инж. маш., под називом: "Планирање експеримента за робусну идентификацију динамичких система" представља резултат оригиналног научног рада и отвара простор за истраживања која су мало рађена у свету. Обрађена тема је веома актуелна и представља допринос развоју робусне идентификације стохастичких система у циљу повећања квалитета математичких модела добијених применом теорија вероватноће, стохастичких процеса и математичке статистике.

Кандидат је извршио критичку анализу и систематизацију постојећих знања, искустава и научних резултата водећих светских истраживача у области истраживања

ове докторске дисертације. На основу извршене анализе кандидат је утврдио предности и недостатке до сада коришћених метода, и на основу њих дефинисао конкретан предлог алгоритама за генерисање улазних сигнала као и алгоритама за робусну идентификацију стохастичких система. У дискусији кандидат је добијене резултате поредио са резултатима из релевантне литературе и у одређеним сегментима проширио постојећа теоријска знања из области истраживања, што је верификовано објављивањем два рада у међународним часописима са СЦИ листе (M23).

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

Владимир Стојановић је рођен 5. јуна 1983. године у Краљеву, где је завршио основну школу и природно математички смер Гимназије. Машински факултет у Краљеву универзитета у Крагујевцу је уписао 2002. године. Као студент генерације, дипломирао је 12. фебруара 2007. године на групи за аутоматско управљање и флуидну технику са просечном оценом 9.57 (девет и 57/100). Дипломски рад из предмета Индустијски роботи одбранио је са оценом 10. Његов успех током студирања потврђују многобројне стипендије и награде које је примао. Неке од њих су: стипендија од Министарства просвете Републике Србије, универзитетска стипендија, стипендија од града Краљева, стипендија из фонда Владе за младе таленте као и награда од Регионалне привредне коморе Краљево.

Након дипломских студија, уписао је Докторске академске студије на Машинском факултету у Краљеву, такође на групи за аутоматско управљање и флуидну технику. Положио је све испите на Докторским академским студијама са просечном оценом 9.85 (девет и 85/100).

На седници Стручног већа за техничко - технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, одлуком бр. 28/8 од 12.01.2011. год., званично је добио сагласност да ради на предложеној теми докторске дисертације: **“Планирање експеримента за робусну идентификацију динамичких система”**, која припада ужој научној области: робусна идентификација динамичких система и адаптивно управљање, односно у ширем смислу области аутоматског управљања и флуидне технике.

Од уписа докторских студија па све до почетка 2011. год. био је истраживач-стипендиста Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије, а ради укључивања у реализацију научноистраживачких пројеката који се финансирају из буџета Републике Србије. Од 2011. год. запослен је као истраживач-сарадник на Машинском факултету Краљево. На тај начин је до сада учествовао у реализацији четири научноистраживачка пројеката из области технолошког развоја код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Као аутор и коаутор објавио је више научних радова у међународним часописима као и на међународним и домаћим научним скуповима, од којих се издвајају:

Радови у међународним часописима са СЦИ листе [M23]:

1. V. Filipovic, N. Nedic, V. **Stojanovic** (2011): Robust identification of pneumatic servo actuators in the real situations. *Forschung im Ingenieurwesen - Engineering Research*. Volume 75, Number 4, pp. 183-196, (ISSN: 0015-7899), (IF:0.348, M23)
2. V. **Stojanovic**, V. Filipovic (2013): Adaptive input design for identification of output error model with constrained output. *Circuits Systems and Signal Processing*. DOI:10.1007/s00034-013-9633-0 (ISSN: 0278-081X), (IF:0.982, M23)

Најзначајнија саопштења са међународног научног скупа штампана у целини [M33]:

3. V. Filipovic, V. **Stojanovic** (2010): Robust Kalman filter as parameter estimator for Output Error models, Part 1: experiment design for the case of constant parameters. X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements. pp. 359-362, Nis, Serbia, November 10<sup>th</sup>-12<sup>th</sup>, (ISBN: 978-86-6125-020-0), (M33)
4. V. **Stojanovic**, V. Filipovic, N. Nedic (2011): Stochastic Model of a Pneumatic Actuator. VII International Triennial Conference – Heavy Machinery 2011. Volume 7, No 3, Session C, pp. 47-52, Vrnjaska Banja, June 29<sup>th</sup> – July 2<sup>nd</sup>, (ISBN: 978-86-82631-58-3), (M33)
5. V. **Stojanovic**, V. Filipovic (2012): Adaptive Input Design for Identification of Output Error Model with Constrained Output. XI Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements. pp. 156-159, Nis, Serbia, November 14<sup>th</sup>-16<sup>th</sup>, (ISBN: 978-86-6125-072-9), (M33)
6. V. Filipovic, V. **Stojanovic**, N. Nedic, D. Prsic (2012): TARX Model for Pneumatic Cylinder and Identification. XI Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements. pp. 260-263, Nis, Serbia, November 14<sup>th</sup>-16<sup>th</sup>, (ISBN: 978-86-6125-072-9), (M33)
7. V. Filipovic, V. **Stojanovic** (2010): Robust Kalman filter as parameter estimator for Output Error models, Part 2: The case of time-varying parameters. X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements. pp. 363-366, Nis, Serbia, November 10<sup>th</sup>-12<sup>th</sup>, (ISBN: 978-86-6125-020-0), (M33)

Најзначајније саопштење са домаћег научног скупа штампано у целини [M63]:

8. V. **Stojanovic**, N. Nedic, V. Filipovic (2009): Генерисање улазних сигнала за идентификацију динамичких система засновану на грешци излаза. ХИПНЕФ 2009, стр. 337-342, Врњачка Бања, 14. –16. Октобар, (ISBN:978-86-81505-48-9)

Сви наведени резултати су директно из проблематике којом се бави ова докторска дисертација.

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

Докторска дисертација кандидата Владимира Стојановића, дипл. инж. маш., под насловом: “Планирање експеримента за робусну идентификацију динамичких система”, у потпуности, како по обиму тако и по садржају, одговара одобреној теми дисертације, одлуком бр. 1016/4 од 16.11.2010. године од стране Наставно-научног већа Машинског факултета Краљево и Стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу одлуком бр. 28/8 од 12.01.2011. године.

Вишегодишњи рад и оригинални резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације изложени су на 111 страна. У дисертацији је приказано 73 графичке илустрације, 4 табеларна приказа и цитирано је 89 библиографских података. Излагање је сврстано у 7 поглавља (којима претходе захвалност, резиме на српском и енглеском језику, садржај и списак ознака и скраћеница):

1. Увод
2. Доприноси у подручју истраживања
3. Планирање експеримента
4. Робусна идентификација стохастичких линеарних система
5. Робусна идентификација стохастичких нелинеарних система
6. Робусна идентификација пнеуматског цилиндра
7. Закључак и предлози за наставак истраживања

На крају рада је дат списак коришћене литературе.

Теза је организована на следећи начин:

У *првом, уводном поглављу*, кандидат је указао на потребу и значај истраживања идентификације система у присуству негаусовог шума мерења. Пошто у мерењима постоје опсервације које су неконзистентне са већином популације опсервација (аутлајери), чије присуство може значајно деградирати перформансе линеарних рекурзивних алгоритама, указано је на неопходност синтезе робусних алгоритама идентификације. Такође је указано да применом планирања експеримента алгоритми идентификације постају још погоднији за примену јер се повећава њихова брзина конвергенције.

У *другом поглављу* је дат преглед истраживачких резултата везан за планирање експеримента као и резултата из области робусне идентификације динамичких система.

Први део *трећег поглавља* се односи на формирање алгоритма за генерисање бинарних сигнала на бази аутоковаријационе функције шума " $1/f$ " ограниченог опсега, који је заснован на идејама предиктивног управљања. Кандидат је алгоритам за генерисање бинарних сигнала, који је предложен у релевантној литератури уопштио тако да генерише бинарне сигнале са произвољном очекиваном вредношћу (не мора бити 0). Резултати симулација илуструју веродостојност предложеног алгоритма за генерисање улазних бинарних сигнала. У другом делу овог поглавља је разматрана идентификација ОЕ (output error) модела за случај да постоји ограничење варијансе излазног сигнала. Показано је, у форми теореме, да се оптимални улазни сигнал, уз ограничења на излаз, добија применом регулатора минималне варијансе и стохастичке референце. Предложена је адаптивна двостепена процедура за генерисање улазног сигнала за идентификацију динамичких система. Резултати симулација показују супериорност идентификације применом развијене адаптивне методологије за генерисање улазног сигнала у односу на идентификацију параметара система у отвореној повратној спрези применом псеудо случајне бинарне поворке сигнала (PRBS) која се уобичајено користи.

Основни фокус *четвртог поглавља* представља формирање алгоритма идентификације линеарних стохастичких система у присуству негаусових шума. Као природни оквир за решавање ових проблема узет је Масрелез-Мартинов (Masreliez-Martin) филтар, који има малу осетљивост на присуство аутлајера у поређењу са стандардним Калмановим филтром (Kalman filter). Посматра се случај када шум процеса има Гаусову расподелу, а шум мерења негаусову расподелу. Промена параметара система описана је методом случајног корака у којој је одговарајући шум моделиран као Гаусов стохастички процес. Кандидат је предложио две хеуристичке модификације које повећавају флексибилност, у смислу практичне примене робусног

Калмановог филтра. Кандидат је теоријском анализом показао а кроз резултате симулација илустровао да једна од модификација повећава брзину конвергенције предложеног робусног алгоритма за процену стања. У случају малих промена параметара, утицај трансформације резидуала се може занемарити и тиме додатно повећати практична употребљивост предложеног робусног филтра, што представља другу модификацију. Интензивне симулације су оправдале овакве интервенције.

*Пето поглавље* има за циљ да представи робусни алгоритам за упоредну естимацију стања и параметара стохастичких нелинеарних система у присуству негаусових шума. У првом делу поглавља, кандидат је најпре формулисао проширени Масрељез-Мартинов филтар за естимацију стања стохастичких нелинеарних система. На сличан начин, као у четвртом поглављу, извршене су хеуристичке модификације које значајно повећавају практичну употребљивост филтра. Кандидат је теоријском анализом показао а кроз резултате симулација илустровао да уведена хеуристичка модификација повећава брзину конвергенције предложеног робусног алгоритма за процену стања. У другом делу овог поглавља кандидат је као основу користио претходно добијени робусни алгоритам у циљу формирања алгоритма за упоредну процену стања и параметара нелинеарних стохастичких система. Промена параметара система описана је методом случајног корака у којој је одговарајући шум моделиран као Гаусов стохастички процес. Посматра се случај када шум процеса има Гаусову расподелу, а шум мерења негаусову расподелу. Бенефиције предложеног робусног алгоритма за упоредну процену стања и параметара нелинеарних стохастичких система илустроване су интензивним симулацијама.

У *шестом поглављу* је на примеру модела пнеуматског цилиндра показано да је немогуће извести тачан математички модел комплексних нелинеарних система и да велики број важних детаља није могуће уврстити у модел. Као природни покушај да се проблем разреши, кандидат је предложио примену теорије идентификације. Наведени разлози, уз позивање на релевантну литературу, оправдавају да се модел пнеуматског цилиндра представи као стохастички линеарни систем са временски променљивим параметрима. Кандидат је затим формулисао робусни алгоритам за идентификацију временски променљивих система, заснован на моделима са грешком излаза. Практични аспекти добијених резултата верификовани су кроз експеримент на пнеуматском цилиндру који се налази у лабораторији Центра за аутоматско управљање и флуидну технику, Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву. Резултати експеримента су показали добру робусност у односу на неконзистентне опсервације (аутлајере), као и супериорност у поређењу са алгоритмом идентификације за системе са променљивим параметрима који се користи у литератури.

У *последњем, седмом поглављу*, су дата закључна разматрања са предлозима за наставак научноистраживачког рада на овим проблемима.

## **5. Научни резултати докторске дисертације**

Радам на дисертацији кандидат је дошао до резултата и закључака који имају своје место и значај како у научнотеоријском тако и у практичном смислу, од којих се издвајају следећи:

- Формулисан је алгоритам за генерисање бинарних сигнала са жељеном аутоковаријансом. Развијени алгоритам, за разлику од оригинално изведеног у литератури, може генерисати сигнале који су дефинисани на произвољном интервалу.

- Предложена је адаптивна двостепена процедура за генерисање оптималног улазног сигнала за идентификацију ОЕ модела при ограничењу излаза.
- Развијен је робусни алгоритам за естимацију параметара линеарних стохастичких система који је заснован на модификованом Масрељез-Мартиновом филтру. Извршене хеуристичке модификације Масрељез-Мартиновог филтра значајно повећавају његову практичну употребљивост, што је показано теоријском анализом а илустровано кроз резултате симулација.
- Предложена је робусна процедура за естимацију стања нелинеарних стохастичких система која се заснова на модификованом проширеном Масрељез-Мартиновом филтру. Извршене хеуристичке модификације проширеног Масрељез-Мартиновог филтра значајно повећавају његову практичну употребљивост, што је показано теоријском анализом а илустровано интензивним симулација.
- Развијена је робусна процедура за упоредну естимацију параметара и стања нелинеарних стохастичких система која се заснова на модификованом проширеном Масрељез-Мартиновом филтру. Практични аспект добијених резултата илустрован је интензивним симулацијама.
- Формулисан је робусни алгоритам за идентификацију временски променљивих система, заснованог на моделима са грешком излаза. Практични аспекти добијених резултата верификовани су кроз експеримент на пнеуматском цилиндру који се налази у лабораторији Центра за аутоматско управљање и флуидну технику, Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву.

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

Докторска дисертација кандидата Владимира Стојановића, дипл. инж. маш., под насловом: **“Планирање експеримента за робусну идентификацију динамичких система”**, даје низ значајних резултата који могу бити изузетно корисни у теорији и пракси.

Присуство случајности се у реалним практичним проблемима не може занемарити. Последњих неколико деценија, интензивно су проучавани проблеми рекурзивних алгоритама идентификације стохастичких система. Сходно томе многе савремене инжењерске примене као што су управљање извршним органима, дистрибутивним системима, савременим оптичким уређајима или роботима захтева употребу алгоритама идентификације у реалном времену. Такође важни савремени примери укључују естимацију стања и параметара ради предикције олуја, цунамија, ширења загађујућих материја, као и процене колико брзо се развија тумор коштаног ткива, колики је ризик од пуцања бране или краха грађевинских објеката под утицајем кише, снега, ветра, земљотреса итд. Поред тога, теорија идентификације се успешно примењује за решавање практичних проблема и у разним другим областима, као што су комуникационе технологије, навигација и системи праћења, економетрија, биоинформатика, финансије, итд.

Може се закључити да је рад на припреми и изради докторске дисертације донео читав низ практичних и конкретних инжењерских решења која могу у наредном периоду да се интегришу у широк спектар процеса.

## 7. Начин презентирања резултата научној јавности

Део резултата ове дисертације је већ публикован и верификован кроз радове у међународним научним часописима са СЦИ листе као и на међународним научним скуповима.

Практични аспекти научноистраживачког рада представљени су домаћој стручној јавности кроз реализацију пројекта **TR 33026**, Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије.

Комисија сматра да истраживања и резултати докторске дисертације пружају обиман и користан материјал, који може и надаље да се користи за презентовање на научним скуповима и објављивање радова у међународним и домаћим часописима. Поменута дисертација може да буде врло инспиративна за даљи рад за истраживаче и научнике који се баве проблематиком генерисања оптималних улазних сигнала и робусном идентификацијом динамичких система.

На основу свега изложеног комисија доноси следећи

### ЗАКЉУЧАК

Докторска дисертација кандидата Владимира Стојановића, дипл. инж. маш., под насловом: **“Планирање експеримента за робусну идентификацију динамичких система”**, у потпуности, како по обиму тако и по квалитету, одговара одобреној теми дисертације, одлуком бр. 1016/4 од 16.11.2010. године од стране Наставно-научног већа Машинског факултета Краљево и Стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу одлуком бр. 28/8 од 12.01.2011. године.

Разматрана научна тема је веома актуелна и даје значајан научни допринос области робусне идентификације стохастичких система.

Докторска дисертација је резултат оригиналног научног рада кандидата у оквиру поменуте области. Кандидат је у приказу истраживања користио уобичајену и стандардизовану стручну терминологију, док су структура докторске дисертације и методологија излагања у складу са универзитетским нормама.

Значајан део резултата до којих је кандидат дошао у току израде ове дисертације је публикован у више радова, који су објављени у међународним научним часописима са СЦИ листе као и на међународним научним конференцијама, и на тај начин је верификован.

На основу свега изложеног, Комисија за преглед и оцену докторске дисертације, једногласно је закључила да докторска дисертација под насловом:

**“Планирање експеримента за робусну идентификацију динамичких система”**


кандидата Владимира Стојановића, дипл. инж. маш., по квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности задовољава стручне, научне и законске критеријуме за израду докторске дисертације, па са задовољством предлаже Наставно-



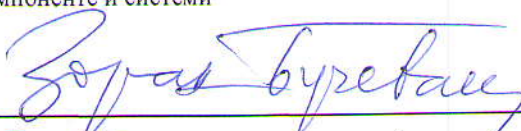
научном већу Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, да на основу овог Извештаја и спроведене процедуре, докторску дисертацију прихвати као успешно урађену и да кандидата позове на јавну усмену одбрану.

Краљево, 11.09.2013. год.

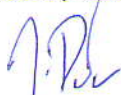
**Чланови Комисије:**



**др Новак Недић**, редовни професор  
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву-председник  
Научна област: Системи аутоматског управљања и флуидне управљачке компоненте и системи



**др Зоран Бучевац**, редовни професор  
Машински факултет у Београду-члан  
Научна област: Аутоматско управљање



**др Зоран Рибар**, редовни професор  
Машински факултет у Београду-члан  
Научна област: Аутоматско управљање



**др Драган Пршић**, доцент  
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву-члан  
Научна област: Аутоматско управљање, флуидна техника и мерења



**др Војислав Филиповић**, ванредни професор  
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву-ментор  
Научна област: Аутоматско управљање, флуидна техника и мерења