

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Петра Д. Мандића**, дипл. инж. маш., студента Докторских студија

Одлуком број 1043/2 од 13.06.2019 године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Петра Д. Мандића под насловом

„Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања“

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Петар Д. Мандић, дипл. инж. маш., уписао је прву годину докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2011/2012 године. Кандидату је одобрено мировање статуса студента на Докторским студијама у трајању од два семестра у школској 2014/15 години (решење 9/12388 од 21.09.2015 године), и продужење статуса студента на Докторским студијама у трајању од два семестра у школској 2018/19 години (решење 9/14016 од 04.10.2018 године).

Кандидат је поднео захтев за одобрење теме докторске дисертације број 1980/1 од 18.09.2017 године на Катедри за механику Машинског факултета Универзитета у Београду. Кандидат је за ментора предложио др Михаила Лазаревића, редовног професора Машинског факултета у Београду. На основу сагласности Катедре за механику број 1980/2 од 28.09.2017 године, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је 19.10.2017 године Одлуку број 1980/2 о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и научне заснованости теме докторске дисертације у саставу:

- др Михаило Лазаревић, редовни професор (ментор), Машински факултет, Универзитет у Београду,
- др Александар Обрадовић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду,
- др Томислав Шекара, ванредни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду,

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду донело је Одлуку број 61206-4754/2-17 од 27.11.2017 године којом се даје сагласност на предлог теме

докторске дисертације кандидата Петра Мандића, дипл. инж. маш., под насловом: **„Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања“**. На основу обавештења редовног проф. др Михаила Лазаревића да је кандидат Петар Мандић, дипл. инж. маш., завршио докторску дисертацију под насловом: **„Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања“** и предлога Катедре за механику број 1043/1 од 06.06.2019 године, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је на седници одржаној 13.06.2019 године донело Одлуку број 1043/2 којом се именују чланови Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Михаило Лазаревић, редовни професор (ментор), Машински факултет, Универзитет у Београду,
- др Александар Обрадовић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду,
- др Зоран Митровић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду,
- др Радиша Јовановић, ванредни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду и
- др Томислав Шекара, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом **„Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања“** припада области техничких наука - **машинство**, ужој научној области - **Механика**, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан. Ментор др Михаило Лазаревић је редовни професор на Катедри за механику Машинског факултета Универзитета у Београду. Као аутор или коаутор до сада је публикувао 32 рада на SCI листи.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат, Петар Д. Мандић, дипломирани инжењер машинства и студент Докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду, рођен је 06.11.1984 године у Котору, Република Црна Гора. Основну школу и гимназију (природно-математички смер) завршио је у Херцег Новом. Машински факултет Универзитета у Београду уписао је школске 2003/2004. године. Дипломирао је 2011. године са просечном оценом 8.89 (осам и 89/100) и оценом 10 на дипломском испиту из предмета Механика робота. Дипломске студије завршио је по старом наставном плану и програму.

Докторске студије уписао је школске 2011/2012. године на Машинском факултету Универзитета у Београду. Од 19.12.2011. до 05.03.2014. године био је запослен на Машинском факултету Универзитета у Београду као истраживач сарадник, на научном пројекту ТР 33047 Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије под називом "Интелигентни системи управљања климатизације у циљу постизања енергетски ефикасних режима у сложеним условима експлоатације". Од 06.03.2014. запослен је на Машинском факултету Универзитета у Београду као асистент на катедри за механику. Држао је аудиторне и лабораторијске вежбе на Основним и Мастер академским студијама, и то из следећих предмета: Механика робота, Механика 1, Механика 2, Механика 3, Механика М, Биомеханика ткива и органа, Биомеханика локомоторног система. Учесник је научно-билатералног пројекта између Републике Србије и НР Кине, бр. пројекта 3-12 (2016-2017) као и текућег билатералног пројекта између Републике Србије и Италије, *ADFOCMEDER*, (2019-2021).

Поседује знање енглеског језика на конверзацијском нивоу, италијанског на средњем и немачког језика на основном нивоу. Познаје програмске језике и пакете Matlab, C програмски језик, AutoCad, Solid Works, MS Office, TIA Portal. Члан је Српског друштва за механику, и међународне IUTAM организације.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Петра Мандића, дипл. инж. маш., под насловом „**Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања**“ је документ формата А4, штампан једнострано, написан на српском језику, ћириличним писмом. Написана је на укупно 135 нумерисаних страна укључујући и Литературу која садржи 149 референци. Илустрована је са 52 слике, садржи 267 нумерисаних израза, и 10 табела.

Докторска дисертација садржи следећа Поглавља:

1. Увод;
2. Математички модел роботског система;
3. Примена методе Д-разлагања у стабилизацији механичких система;
4. Метода пројектовања класичног и фракционог ПИД регулатора применом доминантног подешавања полова и Д-разлагања под ограничењима на перформансе;
5. Нумерички резултати управљања роботским манипулатором са шест степени слободе;
6. Закључак и научни доприноси дисертације;

На почетку дисертације дат је резиме на српском и енглеском језику, док је на крају дат списак од 149 референци као и биографски подаци кандидата.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље, поред прегледа литературе, садржи и кратак увод у рачун нецелобројног реда (фракционог рачуна).

Друго поглавље бави се моделовањем механичких система са више степени слободе, са акцентом на роботске системе. За извођење математичког модела роботског манипулатора коришћен је тзв. Родригов приступ, која је заснована на примени Родригове матрице трансформација координата. Коришћењем овог приступа, могуће је на јединствен начин одредити основне геометријске и динамичке параметре разматраног система, као и кинематичке величине потребне за добијање диференцијалних једначина кретања механичког система у коваријантном облику. Посебна пажња у овом поглављу посвећена је математичком опису дисипативних сила које делују на дати роботски систем. Тачније, предложен је фракциони модел дисипативних сила трења које се јављају у зглобовима роботских сегмената при њиховом релативном кретању. Затим је дат математички модел роботског манипулатора са интегрисаном динамиком актуатора, чиме се додатно повећава ред система. На крају поглавља показано је како се изведени нелинеарни модел робота може апроксимирати линеарним моделом, у случају постојања редуктора великог преносног односа између мотора и роботских сегмената.

Треће поглавље посвећено је стабилизацији кретања механичких система типа инверзног клатна. Тачније, два типа клатна су разматрана у овој дисертацији, ротационо (Фурутино) и транслаторно инверзно клатно. За њихову стабилизацију око нестабилног положаја

равнотеже коришћен је ПД регулатор фракционог реда. Подешавање параметара регулатора омогућено је применом методе Д-разлагања. Добијене области стабилности у параметарској равни израчунате су прво за случај линеарне зависности параметара, да би затим дати резултати били проширени и за случај нелинеарне зависности истих. На тај начин, уместо у равни два параметра, како је то уобичајено у литератури, добијене су области стабилности у простору, односно у функцији три подешљива параметра. На крају поглавља приказани су експериментални резултати управљања трансаторним инверзним клатном, где је показано да применом предложеног фракционог регулатора се добија систем са бољим перформансама.

У четвртом поглављу метода доминантног подешавања полова у комбинацији са техником Д-разлагања искоришћена је за пројектовање класичног и фракционог ПИД регулатора. Доминантни полови затвореног система управљања се одређују на основу задатих перформанси као што су време смирења и прескок. Применом методе Д-разлагања добија се опсег вредности пропорционалног појачања k_p регулатора за које је обезбеђена доминантност датих полова. Даљи избор параметара врши се са циљем што бољег потискивања немерљивог поремећаја који делује на процес, и водећи рачуна о робустности система и осетљивости на шум. Затим су извршене симулације управљања за три карактеристична процеса у индустрији. Предложена метода упоређена је са неким од већ постојећих процедура подешавања ПИД-а, да би се показала ефикасност исте. Такође, на основу добијених резултата види да примена фракционог регулатора даје систем са бољим перформансама у односу на класични регулатор, а за исте вредности параметара робустности.

У петом поглављу приказани су резултати симулације управљања роботског манипулатора са шест степени слободe. На основу 3Д модела робота добијени су динамички параметри манипулатора неопходни за формирање диференцијалних једначина кретања. Због присуства редуктора великог преносног односа, нелинеарни роботски систем се са довољном тачношћу може апроксимирати линеарним моделом. Тиме је омогућена примена линеарних закона управљања који су изведени у претходним поглављима. Решен је задатак позиционог управљања где су се добили очекивани одзиви кретања роботских сегмената. На крају поглавља, приказана је још једна метода управљања роботским манипулатором која се заснива на употреби фракционог интегралног компензатора. Подешавање параметара компензатора извршено је решавањем оптимизационе процедуре засноване на принципу симетричног оптимума. Овим приступом добијени су одзиви роботских сегмената без појаве прескока, а перформансе система се због робустног система управљања задржавају у жељеним границама и при промени номиналних параметара процеса.

Шесто поглавље садржи закључак и научне доприносе дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под насловом „**Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања**“ кандидата Петра Мандића, представља наставак актуелног истраживања у области моделовања и управљања механичких система, са посебним освртом на роботске системе. Приликом поступка моделовања и управљања датих система коришћена је савремена математичка теорија нецелобројног реда (фракциони рачун), која има све већу примену у техници у последњих пар деценија. При формирању математичког модела механичког система коришћен је такозвани Родригов приступ, чија је предност то што је веома погодан за примену на

рачунару, па се поступак моделовања сложених система са три и више степени слободe знатно поједностављује и убрзава, а могућност појаве грешке у моделу смањује. Управљање механичких система типа инверзног клатна представља отворен проблем у савременој литератури, и то је управо једна од истраживачких области ове тезе. Оригинални приступ за решавање проблема стабилизације наведених механичких система огледа се у примени методе Д-разлагања, која је овде уопштена за случај линеарних фракционих система. Већина роботских манипулатора и процеса у индустрији управља се пропорционално интегрално диференцијалним (скраћено ПИД) регулатором, за чије су пројектовање у овој тези коришћене методе модерне теорије управљања са применом фракционог рачуна.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Прегледом цитиране литературе у уводном делу дисертације закључује се да је кандидат Петар Мандић дао актуелни приказ постојеће и референтне литературе. Дат је преглед релевантних резултата из области моделовања роботских система, теорије нецелобројног рачуна са применом у техничким системима и управљања роботским манипулаторима. Посебан критички осврт дат је на примени савремених метода теорије управљања попут технике Д-разлагања, методе доминантног подешавања полова, као и различитих алгоритама за подешавање параметара ПИД регулатора, класичног (целобројног) и фракционог реда.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Резултати приказани у овој докторској дисертацији добијени су применом следећих научних метода (теорија) добро познатих научној и стручној јавности:

- Методе аналитичке механике;
- Методе математичког моделирања;
- Теорија рачуна нецелобројног реда;
- Теорија стабилности система - метода Д-разлагања;
- Методе теорије управљања системом;
- Савремене методе оптимизације;

3.4. Применљивост остварених резултата

Приказани резултати кандидата Петра Мандића имају потенцијалну примену у области моделовања и управљања механичких система. Коришћењем теорије нецелобројног реда приликом формирања математичког модела роботског система може се остварити боље поклапање између реалног и моделованог понашања система. Такође, с обзиром на велику заступљеност ПИД регулатора класичног(целобројног) и посебно овде фракционог реда у управљању роботских система и других процеса, методе подешавања његових параметара које су приказане у тези имају свакако могућност шире примене у пракси, што се може и видети на основу приказаних експерименталних резултата управљања транслаторним инверзним клатном.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Петар Мандић је током израде докторске дисертације показао да је самосталан у постављању, препознавању и решавању научно-истраживачких задатака као и да успешно влада научно-истраживачким методама. Поседује темељно и широко знање из области теоријске механике и теорије стабилности и управљања система, као и познавање нумеричких метода за решавање постављених проблема користећи савремене софтверске алате. Резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самостални научно-истраживачки рад. Кроз рад на дисертацији кандидат је стекао потреба знања за претрагу и одабир референтне литературе, као и за писање научних радова, што је потврђено бројним ауторским и коауторским радовима.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру рада на докторској дисертацији под називом „**Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања**“, кандидат Петар Д. Мандић остварио је следеће научне доприносе

- Решавање проблема стабилизације ротационог инверзног (Фурутиног) клатна управљаног пропорционално-диференцијалним (ПД) регулатором фракционог реда методом Д-разлагања. Ова метода примењена је на класу линеарних диференцијалних једначина фракционог реда, и то прво за случај линеарне зависности параметара. Добијени резултати су затим искоришћени и генерализовани за случај нелинеарне зависности истих. Такође, уместо у равни два параметра, како је то уобичајено у литератури, добијене су области стабилности у простору, односно у функцији три подешљива параметра. Овај допринос приказан је у Поглављу 3 докторске дисертације. Међународно је научно верификован у раду [3] (одељак 4.3 Верификација научних доприноса), категорије M22, на коме је кандидат први аутор и једини докторанд. Експериментални резултати управљања транслаторним инверзним клатном научно су верификовани у радовима [1] и [4].
- Пројектовање пропорционално-интегрално-диференцијалног (ПИД) регулатора целобројног (класичног) и нецелобројног (фракционог) реда применом методе доминантног подешавања полова и технике Д-разлагања, под ограничењима на перформансе система. Параметри регулатора се подешавају са циљем што ефикаснијег потискивања немерљивог поремећаја који делује на процес, притом водећи рачуна о робустности система, осетљивости на шум, времену смирења, као и о дозвољеном прескоку. Овај допринос приказан је у Поглављу 4 докторске дисертације. Међународно је научно верификован у раду [2] (одељак 4.3 Верификација научних доприноса), категорије M21a, на коме је кандидат први аутор.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Механички системи типа инверзног клатна су веома компликовани за управљање јер су нелинеарни и поседују мањак управљачких величина у односу на број степени слободe система. Овде је метода Д-разлагања искоришћена за одређивање домена стабилности линеаризованог система у равни подешљивих параметара регулатора. На основу

Љапуновљеве индиректне теореме добијене области стабилности важиће и за нелинеарни систем, али само у блиској околини равнотежног стања.

При експерименталном управљању трансляторног инверзног клатна, употребљена је ефикасна нумеричка метода за апроксимацију ирационалних функција како би се имплементирао закон управљања фракционог регулатора. Експериментални подаци су показали да фракциони ПД регулатор постиже боље перформансе система у поређењу са класичним регулатором.

Метода подешавања параметара ПИД регулатора приказана у овој дисертацији применљива је за управљање роботских система, као и за различите типове процеса, са и без транспортног кашњења, рационалне и ирационалне преносне функције, као и оне са дистрибуираним параметрима. Фракциони ПИД регулатор због већег броја подешљивих параметара омогућава постизање бољих перформанси и робустности система.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси предметне докторске дисертације су верификовани следећим радовима:

Категорија M14:

- [1] **P.D. Mandić**, M.P. Lazarević, T.B. Šekara, *Stabilization of inverted pendulum by fractional order PD controller with experimental validation: D-decomposition approach*, in: A. Rodić, T. Borangiu (Eds.), *Adv. Intell. Syst. Comput.*, Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 29–37. doi:10.1007/978-3-319-49058-8_4. (Print ISBN 978-3-319-49057-1)

Категорија M21a:

- [2] **P.D. Mandić**, T.B. Šekara, M.P. Lazarević, M. Bošković, *Dominant pole placement with fractional order PID controllers: D-decomposition approach*, *ISA Trans.* 67 (2017) 76–86. doi:10.1016/j.isatra.2016.11.013. (IF=3.394). (ISSN 0019-0578)

Категорија M22:

- [3] **P.D. Mandić**, M.P. Lazarević, T.B. Šekara, *D-decomposition technique for stabilization of Furuta pendulum: fractional approach*, *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.* 64 (2016) 189–196. doi:10.1515/bpasts-2016-0021. (IF=1.156) (ISSN 2300-1917)

Категорија M33:

- [4] **P.D. Mandić**, M.P. Lazarević, T.B. Šekara, R.Ž. Jovanović, *Stabilization of the cart pendulum system by fractional order control with experimental realization*, in: *Int. Conf. Fract. Differ. Its Appl.*, Novi Sad, Serbia, 2016. (ISBN 978-86-7892-830-7)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа и анализе докторске дисертације, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је докторска дисертација под називом **„Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања“** кандидата **Петра Д. Мандића**, дипл. инж. маш., урађена према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и да је у складу са Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду. На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији, Комисија констатује да је кандидат **Петар Д. Мандић**, дипл. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања. Кандидат је дошао до оригиналних научних резултата који су успешно и верификовани. Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да докторска дисертација под називом **„Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања“** представља оригиналан и вредан научни рад са научним доприносима у области машинства, ужа научна област Механика, па сходно члану 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду, Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да Реферат прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упути Реферат на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидат **Петар Д. Мандић**, дипл. инж. маш., позове на јавну одбрану.

У Београду, 28.06. 2019. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Михаило Лазаревић, редовни професор, ментор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Александар Обрадовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Зоран Митровић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Радиша Јовановић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Томислав Шекара, редовни професор
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет