

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Машински факултет

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Јелене З. Видаковић**,
дипл. инж. маш. –мастер

Одлуком бр. 1489/2 од 12.07.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Јелене З. Видаковић**,
дипл. инж. маш.–мастер, под насловом

Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона

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 Јелена З. Видаковић, дипл. инж. маш.–мастер, уписала је прву годину докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2010/2011. године. Кандидат је поднео захтев за одобрење теме докторске дисертације број 2115/1 од 28.10.2013. године на Катедри за механику Машинског факултета Универзитета у Београду. Кандидат је за ментора предложила др Михаила Лазаревића, редовног професора Машинског факултета у Београду. На основу сагласности Катедре за механику број 2115/02 од 12.11.2013. године, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је 14.11.2013. године Одлуку број 2115/03 о именовану 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 у Београду
- др Александар Обрадовић, редовни професор, Машински факултет у Београду
- др Владимир Квргић, виши научни сарадник, Институт ЛОЛА у Београду

Комисија за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и научне заснованости теме докторске дисертације је 22.11.2013 године поднела Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду Извештај број 2115/04, у коме предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да одобри тему докторске дисертације под насловом „**Напредни алгоритми управљања**

манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона“, наводећи да Кандидат испуњава све законом предвиђене услове за израду докторске дисертације, и да је предложена тема научно утемељена и адекватна и да пружа могућност остваривања значајних научних доприноса.

Одлуком Наставно-научног већа број 2115/5 од 28.11.2013. године прихваћена је тема докторске дисертације под насловом: **„Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона“** кандидата Јелене З.Видаковић, дипл. инж. маш.–мастер, док је за ментора именован др Михаило Лазаревић, редовни професор.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду донело је Одлуку број 61206-5959/2-13 од 16.12.2013. године којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Јелене З. Видаковић, дипл. инж. маш.–мастер, под насловом: **„Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона“**.

Декан Машинског факултета је дана 30.12.2013. године донео закључак број 2685/1 којим се одобрава рад на теми докторске дисертације **„Напредни алгоритми управљања у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона“**, кандидата Јелене З. Видаковић, дипл. инж. маш.–мастер, и којим се за ментора именује др Михаило Лазаревић, редовни професор. У временском периоду 2015/16 школске године, одлуком надлежне Комисије број 11376 од 4.10.2016 као и током 2016/17 школске године, одлука број 9/12413 од 12.10.2017, кандидат је имао статус мировања због здравствених проблема.

На основу обавештења проф. др Михаила Лазаревића да је кандидат Јелена З. Видаковић, дипл. инж. маш.–мастер, завршио докторску дисертацију под насловом: **„Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона“** и предлога Катедре за механику број 1489/1 од 14.06.2018. године, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је на седници одржаној 12.07.2018. године донело Одлуку број 1489/2 којом се именују чланови Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Михаило Лазаревић, редовни професор (ментор), Машински факултет у Београду
- др Александар Обрадовић, редовни професор, Машински факултет у Београду
- др Данило Петрашиновић, ванредни професор, Машински факултет у Београду
- др Томислав Шекара, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,
- др Владимир Квргић, виши научни сарадник, Институт Михајло Пупин, Београд

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом **„Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона“** припада области техничких наука-машинству, ужој научној области Механика, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Јелена З. Видаковић је рођена у Гњилану, Република Србија 3. јула 1982. године. Основну школу “Душан Јерковић” завршила је у Ужицу. Гимназију „Миодраг Миловановић Луне“ у Ужицу, друштвено-језички смер, завршила је 2001. године.

Машински факултет Универзитета у Београду уписала је 2001. године, где је 2009. године дипломирала на Катедри за аутоматско управљање са просечном оценом на студијама 8.19. Дипломски рад под насловом „*Опита питања нула и полова вишеструко-преносних система аутоматског управљања*” је одбранила са оценом 10, чиме је стекла звање дипломираног машинског инжењера, еквивалент мастер. Следеће године уписује докторске студије на Машинском факултету, Универзитета у Београду. На докторским студијама положила је све испите предвиђене Програмом усавршавања са просечном оценом 9,77.

Године 2010. се запошљава у Лола Институту у Београду, где почиње да се бави научно-истраживачким радом. Од 2011. године ангажована је на пројекту Министарства Просвете, Науке и Образовања ТР 35203 под називом „*Развој уређаја за тренинг пилота и динамичку симулацију лета модерних борбених авиона и то 3-осне центрифуге и 4-осног уређаја за просторну дезоријентацију пилота*“.

Учествовала је на преко двадесет националних и међународних научних скупова, међу којима се издвајају конференција немачког друштва за механику и примењену математику GAMM 2013, ЕРЕ-РЕМС 2012 која је водећа европска конференција из области енергетске електронике и погона организована од стране ЕРЕ друштва (European Power Electronics and Drives Association) и IEEE-PELS (IEEE power electronics society), Медитеранске конференције за embedded системе (МЕСО), конференције Српског друштва за механику и др. До сада је публиковала четири коауторска рада у часописима међународног значаја са СЦИ листе, један рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком, седам радова у часописима националног значаја. Коаутор је једне монографије националног значаја, и једног техничког решења из категорије *Битно побољшан постојећи производ*.

Кандидат одлично познаје рад у следећим програмским пакетима: MatLab, Simulink, Adobe Illustrator. Такође, поседује знање из С програмског језика, програмског пакета Maple. Кандидат одлично влада енглеским језиком и познаје основе француског језика.

Јелена З. Видаковић је члан је Српског друштва за механику (које је колективни члан међународне научне организације IUTAM), а такође је члан међународне организације IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Јелене Видакововић, дипл. инж. маш.–мастер, под насловом „**Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона**“ написана је на српском језику, садржи: 186 стране формата А4, 64 слике и 6 табела.

Докторска дисертација садржи следећа поглавља:

1. Уводна разматрања
2. Основе развоја манипулатора у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона.
3. Кинематички модел центрифуге.
4. Развој напредних алгоритама планера трајекторије за центрифугу за тренажу пилота савремених борбених авиона.

5. Динамички модел центрифуге.
6. Развој система управљања и методе за избор мотора центрифуге и уређаја за просторну дезоријентацију пилота.
7. Закључна разматрања и научни допринос дисертације.

На крају дисертације дат је списак од 149 референци у оквиру пописа коришћене литературе. Осим наведеног, докторска дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, садржај, биографију аутора, списак слика и списак табела, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У **првом поглављу** кандидат Јелена З. Видаковић даје:

- Приказ основних проблема везаних за неповољне утицаје услова лета са којима се сусрећу пилоти савремених борбених авиона услед суперманеврабилних трајекторија лета;
- Формулисање основних задатака система за тренажу пилота савремених борбених авиона-центрифуге за тренажу пилота савремених борбених авиона и уређаја за просторну дезоријентацију пилота, са описом изабраних конфигурација уређаја;
- Формулисање проблема истраживања са аспекта примена метода моделовања и управљања у роботизи;
- Дефинисање циљева истраживања, као и научних метода које се примењују у оквиру дисертације;

У **другом поглављу** представљене су основе развоја система за тренажу пилота савремених борбених авиона-центрифуге за тренажу пилота савремених борбених авиона и уређаја за просторну дезоријентацију пилота (УПДП). Прво је описан значај и улога система за тренажу пилота са посебним освртом на центрифугу за тренажу пилота савремених борбених авиона (у даљем тексту центрифуга) и уређај за просторну дезоријентацију пилота који се могу представити и описати као одговарајући роботски мнипулатори. Након тога, дата је темељна анализа досадашњих изведених решења за ова два уређаја, и описана је усвојена конфигурација датих система. Основно кретање центрифуге је обртање првог члана центрифуге тзв. руке („крака“) центрифуге око вертикалне осе. Рука центрифуге носи кардански улежиштену гондолу, која представља реплику кокпита, обртну око 2 осе које се секу на седишту пилота: осе ваљања (*roll* осе) и осе пропињања-понирања (*pitch* осе). За изабрану конфигурацију уређаја за просторну дезоријентацију, ротација руке око вертикалне (планетарне) осе представља примарно кретање. Рука носи жирокопски гондолски систем са три осе ротације која даје *yaw* (скретање), *pitch* и *roll* могућности. Даље, описане су методе за синтезу трајекторија разматраних манипулатора у сагласности са постављеним технолошким захтевима који су усвојени на основу анализе релевантних процедура, стандарда, тренутне праксе и досадашњих изведених решења везаних за дате уређаје. Након тога, представљене су основне фазе при развоју система управљања датим системима за тренажу пилота методама моделовања и управљања роботским манипулаторима, при чему се центрифуга моделира као манипулатор са три степена слободе са цилиндричним зглобовима, а УПДП као манипулатор са четири степена слободе са цилиндричним зглобовима, (УПДП има додатну другу осу која је паралелна са првом, вертикалном осом). С обзиром да је развој система за тренажу пилота савремених

борбених авиона веома скуп, а такође и у циљу смањивања укупног времена потребног за развој, веома је корисно размотрити потенцијалне управљачке стратегије паралелно са дизајном механичке структуре.

На основу приказаних кинематичких задатака центрифуге и УПДП-а, дат је осврт на употребу постојећег система за управљање, програмирање и праћење рада робота, тзв. робот контролера Л-ИРЛ као управљачке јединице ових уређаја. На крају је дата анализа неопходних задатака везаних за реализацију нових функција и процедура (у софтверском смислу) постојећег програмског језика за програмирање робота Л-ИРЛ у оквиру развоја планера трајекторије везаним за остваривање жељених кретања центрифуге и уређаја УПДП. На основу закључака дате анализе, услед комплексности развоја алгоритама за управљање кретањем центрифуге за тренажу пилота савремених борбених авиона којим се реализује кинематички задатак датог уређаја везан за захтевану линеарну промену апсолутне вредности убрзања у центру гондоле, као и због изузетно кинематички и динамички (у смислу потребних великих вредности момената у зглобовима са наглим променама њихових вредности) захтевних трајекторија овог уређаја, акценат ове дисертације је дат на управљање центрифуге за тренажу пилота савремених борбених авиона. Управљање УПДП уређајем је дато у смислу примене развијених метода за управљање кретањем центрифуге, уз напомену да су разлике у кинематичким моделима ова два уређаја мале.

У **трећем поглављу** је приказано добијање адекватног напредног кинематичког модела центрифуге. Ради анализе сложености примене на разматрани роботски манипулатор са три степена слободе, могућности имплементације у управљачки систем у смислу развијених техника програмирања кретања манипулатора, као и провере тачности добијених решења, кинематички модели центрифуге развијени су применом више метода. За развој кинематичког модела центрифуге коришћена је Денавит-Хартенберг конвенција, затим Родригов приступ а развијена је и једна нова, напредна метода за решавање директног задатка кинематике роботског манипулатора у простору дуалних кватерниона. Одређивање угаоних брзина и убрзања сегмената манипулатора и линеарних брзина и убрзања значајних тачака сегмената манипулатора и енд-ефектора је спроведена класичним приступом-применом општих теорема кинематике, применом матричног Родриговог приступа који се заснива на дуалним објектима вектора, као и применом Јакобијан матрице манипулатора. Посебно су одређене и сингуларне позиције центрифуге.

У оквиру овог поглавља дато је поређење и анализа примена датих метода за дефинисање кинематичког модела разматраног роботског манипулатора са три степена слободе кретања. На крају овог поглавља дат је кратак осврт и на генерисање кинематичког модела УПДП-а који се добија одговарајућом, једноставном модификацијом кинематичког модела центрифуге.

У **четвртном поглављу** приказан је развој напредних алгоритама у оквиру развоја планера трајекторије центрифуге решавањем инверзног задатка кинематике за задате линеарне профиле интезитета убрзања у центру инерције гондоле (у пресеку *roll* и *pitch* осе) центрифуге за тренажу пилота савремених борбених авиона. У оквиру Л-ИРЛ језика, развијена је нова инструкција кретања, тзв. GMOVE инструкција на основу претходно развијених алгоритама која омогућава оператеру задавања жељених профила трајекторија центрифуге.

Посебно је овде представљен и разматран случај када на пилота делује G_z - оптерећење. G_z представља пројекцију G -оптерећења у правцу z осе координатног система придруженом пилоту, помоћу које се може сагледати дејство гравито-

инерцијалних сила, и дефинисана са $G=a/g$; a интензитет укупног убрзања које делује на пилота, а g је убрзање Земљине теже. Показано је да се интензитет укупног убрзања у центру инерције гондоле остварује кретањем првог члана, тј. руке центрифуге, док друга и трећа оса служе за остваривање задатих вредности G_x и G_y оптерећења.

При захтеву за линеарни прираштај апсолутне вредности убрзања a (G) у центру инерције гондоле, добијена је диференцијална једначина која дефинише жељену промену угаоне брзине руке центрифуге. Дата диференцијална једначина нема решење у аналитичком облику и у овом поглављу су приказане три нумеричка поступка која су коришћена за њено решавање. При свим примењеним методама, усваја да је убрзање a константно у току једног интерполационог периода, чија је дужина трајања од 5ms који одговара периоди одабирања примењеног управљачког система Л-ИРЛ.

У оквиру првог поступка, дата диференцијална једначина се решава у оквиру сваког интерполационог периода. Добија се аналитичко решење жељене промене угаоне брзине у облику Јакобијеве елиптичке функције, које се затим развија у ред ради имплементације у одговарајући алгоритам управљања.

Другим нумеричким поступком, задата диференцијална једначина се решава по угаоној брзини применом више нумеричких метода као што су Ојлерова метода, модификована Ојлерова метода, имплицитна трапезоидна метода, предиктор-коректор метода (уз естимацију грешке), и класична метода Рунге Кута четвртог реда. Спроведена је компаративна анализа добијених решења применом предложених метода као и поређење тачности добијених решења применом сугерисана претходна два поступка.

Трећом предложеним поступком уз примену нумеричке Ојлерове методе дата диференцијална једначина се решава по угаоној брзини, при чему се занемарују чланови вишег реда, тј. који се множе трећим и четвртим степеном периоде одабирања Δt . Ради поређења тачности развијених алгоритама базираних на описаним нумеричким методама, спроведене су адекватне симулације за различите позитивне вредности прираштаја $n < 9$ убрзања a . У програмском окружењу *Matlab*, направљена је програмска процедура у којој је могуће доделити различите како позитивне тако и негативне вредности прираштаја оптерећења n . Са аспекта сложености израчунавања, као и тачности, најбоље се показао трећи примењени поступак.

Након тога, дато је кинематичко објашњење и графичка илустрација за решавање дате диференцијалне једначине са задатим негативним прираштајем убрзања n при коме се јавља проблем комплексних вредности у решењима, као и одговарајуће решење у превазилажењу насталог проблема. Такође, на крају поглавља разматрана је и проблематика која се односи на тзв. заглађивање разматраног профила убрзања. Основа алгорита заглађивања задате апсолутне вредности убрзања a (G) у центру инерције гондоле је базирана на аритметичкој прогресији, чиме је омогућено да се реализују “глаткије” трајекторије зглобова манипулатора, а које су значајне са аспекта управљања кретањем и продужавања века трајања мотора.

У **петом поглављу** су приказани одговарајући динамички модели центрифуге добијени у облику Лагранжеових једначина друге врсте методе (коваријантни облик) као и применом тзв. Њутн-Ојлерове методе (применом општих теорема динамике) у рекурзивном облику. У овим моделима искоришћени су изрази за брзине и убрзања карактеристичних тачака манипулатора одређена у трећем поглављу. На основу спроведене симулације потребних момената у зглобовима за кинематски најзахтевније трајекторије центрифуге, може се извршити иницијални избор актуатора овог уређаја. Посебно, симулацијама при решавању директног задатка динамике роботског манипулатора омогућена је и процена величина утицаја нелинеарности и динамичког спрезања међу члановима роботског манипулатора током кретања, који има велику

важност приликом избора адекватног алгоритма за управљање кретањем роботског манипулатора.

У **шестом поглављу** спроведена је и описана процедура за избор актуатора заснована на динамичком моделу датих манипулатора- центрифуге и УПДП уређаја у оквиру развоја одговарајућих серво-управљачких система. Приказане методе и процедуре за циљ имају како остваривање задатих перформанси система, тако и постизање што мање сложености управљачког система ради једноставније имплементације, а водећи рачуна о цени развоја и експлоатације уређаја. Примена алгоритма апроксимативне директне динамике при процедури за одабир актуатора центрифуге је представљена. Развијена је метода симулације директне динамике роботског манипулатора којом се дефинише утицај нелинеарности динамичког модела и величина динамичког спрезања између чланова манипулатора током кретања, за усвојене репрезентативне трајекторије манипулатора, кроз доприносе ових величина у одређивању потребних момената у зглобовима. На основу датих симулација, закључено је да су дати утицаји динамичког спрезања веома мали на кретање руке центрифуге, а да то није случај са другим чланом (прстеном) и трећим чланом (гондолом).

Као последица претходног, за прву осу предложено је конвенционално управљање базирано на негативној повратној спреси, а за другу и трећу осу је потребно размотирити потенцијалне предности које се остварују напредним централизованим методама управљања. За другу и трећу осу изабрана је *feedforward* метода компензације поремећаја, односно распрезања у виду *Методe израчунатог момента (Computed torque method)*. Ради симулације перформанси система управљања на основу којих се реализује одговарајући избор методе управљања, развијена је метода за реалистичну симулацију перформанси система управљања са аспекта актуатора која се заснива на следећим карактеристикама: 1) особине деформабилности пројектоване механичке структуре се узимају у обзир кроз ограничавања појачања примењених ПИД регулатора (ПД позициони и ПИ брзински регулатор) на основу релевантних природних учестаности механичке структуре; 2) модел објекта управљања у виду механичког модела актуатора заснива се на ефективној инерцији мотора (аксијални момент инерције сведеног на осу мотора који се одређује на основу динамичког модела манипулатора); 3) ограничења изабраних мотора су узета у обзир у датој симулацији. Симулација перформанси система управљања у програмском пакету *Simulink* спроведена је како за центрифугу тако и за УПДП уређај.

Такође у овом поглављу, извршена је анализа утицаја деформабилности механичке структуре центрифуге на ефикасност развијених алгоритама управљања на основу спроведене структуралне анализе у САЕ окружењу- САТИА.

У **седмом поглављу** детаљно су систематизовани остварени научни резултати и дати правци могућих, односно будућих истраживања заснованих на резултатима постигнутих у овој докторској дисертацији.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под насловом „*Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона*“ кандидата Јелене Видаковић, дипл. инж. маш.–мастер, представља савремен и оригиналан приступ и допринос савременим методама проучавања управљачких

система специфичних роботских манипулатора у оквиру система за тренажу пилота савремених борбених авиона-центрифуге за тренажу пилота савремених борбених авиона и уређаја за просторну дезоријентацију пилота (УПДП). Ово је посебно значајно када се има у виду, да је по питању ове проблематике објављен релативно мали број савремених научних радова, који се односе на конкретан тип центрифуге и уређаја за просторну дезоријентацију пилота.

Оригиналност у приступу решења проблема огледа се у радовима који су публиковани у истакнутим светским часописима и саопштењима на међународним научним скуповима, од којих треба издвојити међународну конференцију немачког друштва за механику и примењену математику GAMM 2013, и EPE-PEMC 2012 која је водећа европска конференција из области управљања и енергетске електронике од стране EPE друштва (European Power Electronics and Drives Association) на којима је кандидат Јелена Видаковић изложила научне радове везано за тему докторске дисертације. У дисертацији су коришћени постојећи приступи и конвенције познати у роботизици (Денавит-Хартенберг конвенција, Родригов приступ) као и нови приступ у простору дуалних кватерниона, уз оригинална побољшања истих као и налажење одговарајућих решења линеарних/нелинеарних диференцијалних једначина применом аналитичких, нумеричких и апроксимативних метода.

У складу са модерним истраживачким трендовима, кандидат у дисертацији примењује савремене методе управљања и нумеричке анализе проширеном методом коначних елемената. У оквиру докторске дисертације примењени су савремени истраживачки поступци и коришћење актуелних софтверских решења за нумеричке симулације.

Дисертација се може оценити успешном, узевши у обзир да је кандидат Јелена Видаковић дала нове моделе и њихова решења, као и нове алгоритме управљања који могу бити од великог значаја за практичну реализацију управљања разматраним системима као и за будућа истраживања.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Због сложене природе процеса развоја управљања роботским манипулаторима, као и због особености датих роботских манипулатора у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона, у дисертацији је коришћена обимна литература из области механике робота (кинематичког и динамичког моделовања роботских манипулатора), управљања роботских система –(области развоја управљачких јединица за индустријске роботе), нумеричких метода, специфичних области симулације лета и симулације параметара лета у системима за тренажу пилота и др. С обзиром на осетљиву област примене, као и због великих трошкова развоја система за тренажу пилота за примене у војној авијацији, постоји мали број радова у литератури који описују карактеристике, и поготово развој постојећих система за тренажу пилота савремених борбених авиона. У другом поглављу докторске дисертације дат је преглед постојеће литературе и анализа досадашњих решења за дата два система за тренажу пилота, чиме је остварен релевантан приказ постојећег стања у домену коме припадају проблеми разматрани у докторској дисертацији. Коришћена литература има карактер научног, савременог и актуелног извора информација, а осим прегледа постигнутих резултата, указује на могуће правце даљег научно-истраживачког рада у тој области.

Коришћена научна литература је послужила кандидату као почетна основа за конципирање смерница и усвајање примењених метода, што је показано кроз изложене оригиналне доприносе у дисертацији. Највећи број библиографских јединица представљају радови из истакнутих међународних часописа, књига, зборника радова са

конференција, као и објављених техничких извештаја истакнутих научно-истраживачких институција.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

За истраживања у овој докторској дисертацији примењене су теоријске и нумеричко симулационе научно-истраживачке методе:

Методе аналитичке механике и динамике система крутих тела су примењене за описивање система за тренажу пилота савремених борбених авиона-центрифуге за тренажу пилота савремених борбених авиона и уређаја за просторну дезоријентацију пилота (УПДП);

Методе математичког моделирања и методе линеарне алгебре су коришћене за добијање адекватних кинематичких и динамичких модела разматраних система;

Такође су заступљене нумеричке методе, аналитичке и апроксимативне методе за решавање диференцијалних једначина у оквиру ефикасног решавања инверзног задатка кинематике центрифуге и УПДП;

Метода (компаративне) анализе у оцени предложених кинематичких/ динамичких модела разматраних роботских манипулатора је коришћена;

Метода синтезе управљања кретањем механичких система је коришћена у циљу реализације напредног управљања центрифуге за тренажу пилота савремених борбених авиона и уређаја за просторну дезоријентацију пилота (УПДП);

У циљу одређивања главних /модалних карактеристика као и процене и утицаја деформабилности роботских манипулатора спроведена је нумеричка симулација и модална анализа применом методе коначних елемената.

Ове изабране методе су адекватне за проблематику истраживања и правилно су коришћене у фази развијања модела, синтези управљања, анализи резултата на бази спроведене симулације и при извођењу релевантних закључака.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације кандидата Јелене З. Видаковић, дипл. инж.маш., применљиви су у научном смислу и имају практичну примену у домену приказаних система за тренажу пилота, као и у општем домену роботике и динамике система крутих тела.

Основна водила при развоју модела наменских роботских манипулатора (центрифуга и уређај за просторну дезоријентацију пилота) и алгоритама управљања истих, изложених у докторској дисертацији, је њихова применљивост у практичном смислу. Приказани развој кинематичких и динамичких модела применом најзначајних и најкоришћенијих метода и конвенција за троосну центрифугу је значајан такође и у смислу општег случаја роботског манипулатора са цилиндричним зглобовима са више степени слободе. Приказане нумеричке методе које су укључивале одговарајуће нумеричке поступке у оквиру развоја алгоритама планера трајекторије се могу применити при развоју сличних алгоритама везаних за синтезу трајекторија роботског

манипулатора у општем смислу. Развијени алгоритми планера трајекторије су имплементирани у постојећи проширени језик за програмирање робота, за потребе програмирања кретања центрифуге и УПДП-а. Развијена методологија омогућава проучавање других роботских конструкција и механизма које садрже сличне структурне елементе.

Закључци добијени испитивањем овог типа структура могу бити укључени у процес пројектовања и управљања нових сличних структура. Предложене методе моделовања објекта управљања, развоја управљачког система, симулација перформанси система управљања и методе избора актуатора које су приказане за манипулаторе у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона су применљиве и за роботске манипулаторе са више степени слободе у општем случају.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде дисертације показао да је самосталан у постављању, препознавању и решавању научно-истраживачких задатака као и да успешно влада научно-истраживачким методама. Резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самостални научно-истраживачки рад. Посебно, кандидат је поред поседовања завидног знања из механике робота, теорије кватерниона, показао и знање из нумеричких метода, теорије аутоматског управљања, као и примене савремених софтверских алата, што свакако пружа солидну основу за даљи квалитетан самосталан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос ове докторске дисертације се темељи на проширивању и продубљивању научних сазнања и достигнућа у области моделовања и управљања роботских серијских манипулатора у општем смислу, са посебним освртом на усвојене специфичне задатке и намене манипулатора у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона. На основу изложеног целокупног материјала који је дат у докторској дисертацији, досадашње искуство и научно-истраживачки рад кандидата, као и објављене радове, научни резултати овог рада могу се систематизовати и сумирати кроз следеће опште и посебне доприносе.

Дати преглед постојеће литературе на тему развоја и примене, као и преглед савремених изведених решења за дата два система за тренажу пилота- центрифуге за тренажу пилота савремених борбених авиона и уређаја за просторну дезоријентацију пилота, представља својеврсни допринос ове дисертације, због непостојања савремених општих прегледних радова из дате области.

Приказани су и развијени кинематички модели за центрифугу која је моделована као одговоарајући роботски манипулатор са три степена слободе применом најзаступљенијих конвенција и метода моделовања у механици робота (Денавит-Хартенберг, Родригов приступ) уз примену одговарајуће компаративне анализе истих.

Такође, развијен је нови кинематички модел тј. ефикасно решен директан задатак кинематике манипулатора у простору дуалних кватерниона који се одликује мањом сложености примене и израчунавања, као и већом нумеричком стабилношћу услед избегавања проблема са сингуларним позицијама манипулатора, у односу на приказане

најкоришћеније кинематичке моделе.

У склопу развоја нових функција и процедура планера трајекторије центрифуге којим се остварује жељена линеарна промена интезитета укупног убрзања у центру инерције гондоле центрифуге, дат је приказ и примена-нових нестандартних поступака за решавање добијене нелинеарне диференцијалне једначине применом нумеричких метода са различитим дискретизационим техникама, као и поређење тачности и сложености израчунавања са стандардним нумеричким методама за решавање диференцијалних једначина тог типа.

Предложен је и развијен један нови алгоритам заглађивања профила интезитета убрзања у центру инерције гондоле на бази линеарне промене прираштаја интезитета убрзања применом аритметичке прогресије, који се може применити за заглађивања профила линеарних или угаоних позиција, брзина и убрзања чланова манипулатора и енд-ефектора у оквиру употребе дискретних планера трајекторије роботских манипулатора.

Приказан је развој динамичког модела манипулатора центрифуге у рекурзивном облику применом методе базиране на примени основних теорема динамике крутог тела и Лагранжеових једначина друге врсте у коваријантном облику са освртом на предности коришћених метода.

Приказана је метода симулације динамичког модела роботског манипулатора којом се одређује и процењује утицај нелинеарности и динамичког спрезања чланова манипулатора у динамичком моделу манипулатора кроз њихов утицај и допринос у потребном (покретачком) моменту у зглобовима манипулатора.

Дата је и нова процедура за избор актуатора роботског манипулатора базирана на апроксимативном динамичком моделу манипулатора којом се дефинише најмањи актуатор из листе понуђених актуатора који има потенцијал да оствари задато кретање манипулатора. Развијена је метода симулације перформанси система управљања у простору координата мотора која узима у обзир карактеристике механичке структуре система и ограничења изабраних мотора. Применом ове методе за центрифугу и УПДП уређај, дато је поређење стандардне децентрализоване методе ПИД управљања са примењеном централизованом *методом израчунатог момента*.

Приказан је комплетан поступак развоја система управљања центрифугом за тренажу пилота савремених борбених авиона, троосног манипулатора са цилиндричним зглобовима који остварује кинематички и динамички изузетно захтевне трајекторије, који се базира на симулацијама развијеног кинематичког и динамичког модела манипулатора, као и методама реалистичних симулација предложених децентрализованих и централизованих метода управљања. Предложене методе управљања за центрифугу су примењене и на четворосни уређај за просторну дезоријентацију пилота. Предложене методе моделовања, развоја управљачког система, симулација перформанси система управљања и методе избора актуатора су примењиве и на општи случај роботског манипулатора са више степени слободе.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа литературе и сагледавања постојећих решења из области докторске дисертације, констатујемо да су овде презентовани резултати истраживања оригинални, значајни и да се могу применити у даљим теоријским као и практичним истраживањима. Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, може се закључити да су пружени одговори на сва релевантна питања и решени проблеми са којима се кандидат сусрео у

току истраживања. Установљене чињенице истраживања су корак напред и воде ка унапређењу постојећих метода за анализу и синтезу динамике система крутих тела, односно у механици робота, као и напредном управљању датих роботских система. Методе разрађене у овом раду за решавање линеарних и нелинеарних диференцијалних једначина на бази аналитичких, апроксимативних и нумеричких поступака поседују велику примењивост не само у оквиру разматране теорије, већ и шире.

Развијени нумерички модели и комплетан поступак развоја система управљања поседују велику примењивост у области разматране теорије а посебно за практичну примену.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси кандидата Јелене З. Видаковић, дипл. инж. маш.–мастер, верификовани су следећим радовима:

Категорија врхунски међународн часописи (M21)

1. Vladimir Kvrđić, **Jelena Vidaković**, Maja Lutovac, Goran Ferenc, Vojkan Cvijanović.: A control algorithm for a centrifuge motion simulator, *-Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 4, pp. 399-412, 2014 (**IF = 2.305** за 2014. годину) (DOI: 10.1016/j.rcim.2014.01.002).

Категорија међународни часописи (M23)

2. **Jelena Vidaković**, Vladimir Kvrđić, Mihailo Lazarević.: Control System Design for a Centrifuge Motion Simulator Based on a Dynamic Model, *-Strojniški Vestnik -Journal of Mechanical Engineering*, vol. 64, no. 7-8, pp. 465-474, 2018 (**IF = 1.182** за 2018. годину) (DOI: 10.5545/sv-jme.2018.5272).
3. Goran Ferenc, Zoran Dimić, Maja Lutovac, **Jelena Vidaković**, Vladimir Kvrđić.: Open Architecture Platforms for the Control of Robotic Systems and a Proposed Reference Architecture Model, *-Transactions of FAMENA*, vol. 37, no. 1, pp. 89-100, 2013 (**IF = 0.233** за 2013. годину) (ISSN 1333-1124, UDC 004.45:004.896).

Научни радови у часописима међународног значаја верификованих посебном одлуком, категорија (M24)

4. **Jelena Vidaković**, Mihailo Lazarević, Vladimir Kvrđić, Zorana Dančuo, Goran Ferenc.: Advanced quaternion forward kinematics algorithm including overview of different methods for robot kinematics, *-FME Transactions*, vol. 42, no. 3, pp. 189-199, 2014 (DOI: 10.5937/fmet1403189V).

Научни радови саопштени на скупу међународног значаја, штампани у целини, категорија (M33)

5. **Jelena Vidaković**, Mihailo Lazarević, Vladimir Kvrgić, Maja Lutovac Banduka, Stefan Mitrović.: „Control system design of spatial disorientation trainer“, -*Proceedings of the 6th International Congress of Serbian Society of Mechanics 2017*, Tara Serbia, 2017, pp. C3a 1-10 (ISBN 978-86-909973-6-7).
6. **Jelena Vidaković**, Vladimir Kvrgić, Goran Ferenc, Zorana Dančuo, Mihailo "Lazarević.: “Kinematic and Dynamic Model of the Human Centrifuge”, -*Proceedings of the 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics 2013*, Vrnjačka Banja, Serbia, 2013, pp. 627-632 (ISBN 978-86-909973-5-0).
7. **Jelena Vidaković**, Goran Ferenc, Maja Lutovac, Vladimir Kvrgić.: “Development and Implementation of an Algorithm for Calculating Angular Velocity of Main Arm of Human Centrifuge”, -*Proceedings of the 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition 2012, IEEE*, Novi Sad, Serbia, 2012, pp. DS2a-17 (1-6) (ISBN 978-1-4673-1971-3).

Категорија врхунски часопис националног значаја (M51)

8. **Jelena Vidaković**, Mihailo Lazarević, Vladimir Kvrgić, Zorana Dančuo, Maja Lutovac.: Comparison of numerical simulation models for open loop flight simulations in human centrifuge, -*Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics PAMM*, vol. 13, no. 1, pp. 485-486, 2013 (DOI: 10.1002/pamm.201310235).

Саопштења са међународних скупова штампана у изводу (M34)

9. **Jelena Vidaković**, Aleksandar Stepanović, Mihailo Lazarević, Vladimir Kvrgić, Danijel Divnić: “Usage of CAE environment within control algorithms design for a centrifuge motion simulator”, -*The 10th International Symposium on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering 2018-Book of abstracts*, Novi Sad, Serbia, 2018, pp. 80-81 (ISBN 978-86-6022-059-4).

Поглавља у националној монографији (M45)

10. Лазаревић, М., **Видаковић, Ј.**, Цајић, М., Мандић, П.. “Кинематички и динамички модел центрифуге” и “Један нови алгоритам управљања за одређивање угаоне брзине крака хумане центрифуге при режиму рада у отвореној петљи”, поглавља у монографији „Прилог моделирању и управљању роботских и адаптронских система”, Машински факултет Универзитета у Београду ,2014, ISBN 978-86-7083-833-8.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „**Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона**“ кандидата **Јелене З. Видаковић**, дипл. инж. маш. – мастер, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је докторска дисертација урађена према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета Универзитета у Београду. Комисија са задовољством констатује да је кандидат **Јелена З. Видаковић**, дипл. инж. маш.-мастер, на основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији, успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања при чему је кандидат дошао до оригиналних научних резултата који су и успешно верификовани.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да докторска дисертација под називом „**Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона**“ представља оригинални научни рад кандидата са научним доприносима у области машинства, ужа научна област Механика па сагласно томе и 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 упуту Реферат на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

У Београду 17.08. 2018. 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 Данило Петрашиновић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

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

.....
др Владимир Квргић, виши научни сарадник,
Универзитет у Београду, Институт Михајло Пупин