

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Веће научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

361/5

(Број захтева)

21.05.2015. године

(Датум)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији**

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5 тач. 4. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06)“, дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

НИКОЛА (РАДОМИР) СЛАВКОВИЋ

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **НИКОЛА (РАДОМИР) СЛАВКОВИЋ** уписан на Докторске студије 2007. године.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ

Универзитет је дана 27.02.2012. год. својим актом под бр. 06-17338/11-12 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **НИКОЛЕ (РАДОМИР) СЛАВКОВИЋА**
(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 05.03.2015. године, одлуком факултета под бр. 361/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Драган Милутиновић	Ред.проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
2. Др Љубодраг Тановић	Ред.проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
3. Др Радован Пузовић	Ванр.проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
4. Др Милош Главоњић	Ред.проф. у пензији	Производно машинство	Машински факултет Београд
5. Др Бранислав Боровац	Ред. проф.	Мехатроника, роботика и аутоматизација	Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 30.04.2015. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.

2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.

3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности, уколико је таквих примедби било.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –

Број: 361/4

Датум: 30.04.2015. године

Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 30. Закона о високом образовању (Сл.гласник 76/05, 100/07 и 44/10) и чл. 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду и извештаја Комисије у саставу: проф.др Драган Милутиновић, ментор, проф.др Љубодраг Тановић, проф.др Радован Пузовић, др Милош Главоњић, ред.проф. М. Ф. у пензији и проф.др Бранислав Боровац, Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука, о оцени докторске дисертације „Идентификација, моделирање и компензација грешака услед статичке попустљивости робота за обраду“ докторанта Николе Славковића, дипл.инж.маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 30.04.2015. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцену и одбрану докторске дисертације **„ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ“** докторанта **НИКОЛЕ СЛАВКОВИЋА, дипл.инж.маш.**

Извештај о оцени и одбрани докторске дисертације, по истеку рока од 30 дана увида јавности, доставља се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, докторанту, ментору и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији
кандидата Николе Славковића, дипл.инж.маш.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду бр. 361/2 од 05.03.2015.г. именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Николе Славковића, дипл.инж.маш., под насловом:

„ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ”

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

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат је пријавио тему докторске дисертације под називом: „ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ” и за ментора је предложио проф. др Драгана Милутиновића. На основу пријаве кандидата, ННВ МФБгд. је одлуком бр. 104/1 од 12.01.2012.г. прихватило предлог и именovalo Комисију за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу: др Драган Милутиновић, ред. проф. (ментор), др Павао Бојанић, ред. проф., др Милош Главоњић, ред. проф., др Љубодраг Тановић, ред. проф., др Бранислав Боровац, ред. проф. На основу извештаја Комисије и одлуке ННВ МФБгд. поднет је захтев Машинског факултета Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду (захтев бр. 104/3 од 09.02.2012.г.) које је на седници одржаној 27.02.2012.г. донело одлуку да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Николе Славковића, дипл. инж. маш. (одлука бр. 06-17338/11-12 од 27.02.2012.г), а на основу чега је 28.02.2012.г. Декан Машинског факултета у Београду донео закључак бр. 421/1 о одобравању рада на предметној дисертацији под менторством проф. др Драгана Милутиновића.

На основу извештаја проф. др Драгана Милутиновића, ментора, да је докторанд Никола Славковић завршио докторску дисертацију под називом „ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ”, као и предлога Катедре за производно машинство, Наставно-научно веће Машинског факултета донело је одлуку број 361/2 од 05.03.2015. године о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу: др Драган Милутиновић, ред. проф., др Љубодраг Тановић, ред. проф., др Радован Пузовић, ванредни професор, др Милош Главоњић, ред. проф., у пензији, др Бранислав Боровац, ред. проф.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација „ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ” припада области техничких наука (машинство) и ужој научној области Производно машинство. Израдом докторске дисертације руководио је др Драган Милутиновић, редовни професор на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Никола Славковић, дипл. инж. маш. је рођен у Чачку, 19. децембра 1981. године. Основну школу је завршио у Гучи и гимназију у Чачку. Машински факултет у Београду уписао је школске 2000/2001. године. Дипломирао је 30. јануара 2007. године на смеру за Производно машинство са просечном оценом 8,50 (осам и 50/100). Дипломски рад је урадио из предмета Индустијски роботи (ментор: проф. др Драган Милутиновић) и исти одбранио са оценом 10.

Од марта до септембра 2007. године је радио у Институту за вирусологију вакцине и серуме Торлак у Београду, а затим је од септембра 2007. до јуна 2008. године био на одслужењу војног рока. Докторске студије на машинском факултету у Београду је уписао школске 2007/2008 године, када је постао и стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја. У школској 2007/2008. години мировала су му права и обавезе. По решењу бр. 9/9062-1 од 27.05.2014. г. одобрен му је продужетак рока за завршетак докторских студија за два семестра.

Од 7. септембра 2009. године, до данас ради на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду као асистент на предметима Индустијски роботи, Технологија машинске обраде, Машине алатке и роботи нове генерације и CAD/CAM системи. Као студент докторских студија и стипендиста Министарства, а затим и као асистент је кроз усавршавање и рад на више научних и стручних пројеката био аутор и коаутор већег броја радова на домаћим и међународним скуповима и часописима. Коаутор је четири Техничка решења и већег броја инсталација намењених унапређењу наставе и актуелним истраживањима.

За постигнуте резултате у 2010. години је као коаутор награђен годишњом наградом Привредне коморе Београда за техничко унапређење под називом „Реконфигурабилни обрадни систем на бази робота за вишеосну обраду делова већих габарита са сложеним естетским и функционалним површинама од мекших материјала средње и ниже класе тачности“. Овај резултат је настао у оквиру пројекта TP14034: „Развој технологија вишеосне обраде сложених алата за потребе домаће индустрије“ и представљао је основу за истраживања у оквиру ове дисертације. Као члан тима 2011. године је освојио четврто место на такмичењу за Најбољу технолошку иновацију.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Николе Славковића, дипл.инж.маш., под називом „ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ ” изложена је на 148 страница и садржи 120 једначина, 71 слику и дијаграмских приказа, 6 табела и 101 коришћени референтни литературни извор. Докторску дисертацију чине следећих седам поглавља и списак литературе:

1. Увод
2. Роботи за обраду
3. Класификација грешака и приступи компензација грешака услед попустљивости робота за обраду
4. Статичка попустљивост робота
5. Развијени метод off-line компензације грешака изазваних силама резања
6. Експериментална верификација развијеног off-line метода компензације грешака
7. Закључак
8. Литература

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу текста докторске дисертације дате су основне информације о потреби и значају примене робота у вишеосној обради глодањем делова од мекших материјала ниже и средње класе тачности са сложеним естетским и функционалним површинама. Полазећи од основних проблема који представљају главне ограничавајуће факторе за примену робота у обради, дат је списак полазних хипотеза као и основни циљеви и доприноси предметне дисертације. Наводи се да је развојем метода off-line компензације грешака обраде насталих услед статичке попустљивости робота могуће у значајној мери побољшати тачност обраде до нивоа задовољавајућег за предвиђену класу задатака.

У другом поглављу су у оквиру анализе постојећег стања истраживања и развоја у области примене робота за обраду разматрани основни проблеми и правци истраживања примене робота у области вишеосне обраде сложених делова. Посебно су наглашени проблеми комплексности програмирања и крутости односно попустљивости структуре робота. Приказан је и део резултата претходних истраживања у области вишеосне обраде роботима, у којима је кандидат учествовао с обзиром да су, како је наведено, представљали полазну основу за истраживања у оквиру ове дисертације. Детаљније је показан приступ генерализованог кинематичког моделирања експерименталног 5-осног робота вертикалне зглобне конфигурације као и систем управљања и програмирања у G-коду као неопходних предуслова за развој метода off-line компензације грешака обраде насталих услед статичке попустљивости робота.

У трећем поглављу је дата класификација грешака индустријских робота као и извора њиховог настанка. По аналогiji са приказаном процедуром кинематичке калибрације и прегледом постојећих алгоритама компензације грешака изазваних силама резања, постављене су основе методологије моделирања, идентификације и компензације грешака услед статичке попустљивости робота као најутицајнијих негеометријских грешака при обради роботима.

У четвртном поглављу је полазећи од развијеног кинематичког модела робота извршено моделирање, идентификација и анализа статичке попустљивости робота. Развијени приступ моделирања статичке попустљивости робота, за разлику од постојећих модела, даје увид у утицај попустљивости сваког појединачног зглоба на статичку попустљивост робота. С обзиром да овај и слични приступи полазе од резултујуће попустљивости зглобова робота, то је на бази развијеног експерименталног приступа идентификације попустљивости врха робота постављен и експериментално аналитички приступ идентификације резултујуће попустљивости зглобова. У овом поглављу су приказана и два експеримента. Први експеримент се може сматрати експерименталном методом за мерење помераја врха робота изазваних статичким силама у плански уређеним тачкама радног простора у сва три правца Декартовог координатног система. Овај експеримент, поред тога што је омогућио израчунавање односно идентификацију попустљивости врха робота, је представљао и први корак у постављеном експериментално аналитичком приступу идентификације резултујућих попустљивости зглобова робота. Други експеримент је урађен у циљу верификације идентификованих резултујућих попустљивости зглобова и, на бази њих, комплетно постављеног модела статичке попустљивости врха робота. Ово је урађено на примерима обраде глодањем упоређивањем помераја врха робота, за измерене силе резања, и грешака обраде. Након верификације идентификованих попустљивости зглобова робота извршена је и детаљна анализа попустљивости робота за обраду при чему су за разлику од сличних приступа, поред директних, узимане у обзир и индиректне попустљивости.

У петом поглављу је описан развијени off-line метод компензације грешака изазваних силама резања, као један од кључних резултата у овој дисертацији. Метод је развијен за роботе за обраду који се програмирају G-кодом на бази постављеног модела статичке попустљивости робота и механистичког приступа за предикцију сила резања чиме се омогућава предикција помераја врха робота. Основна замисао постављеног метода компензације је да се номинална програмирана путања алата у G-коду модификује на бази предикованих помераја. Робот, програмиран да се креће дуж модификоване путање, услед дејства сила резања, уствари се креће довољно близу номинално програмираној путањи, односно у унапред прописаним границама. Модификација програмиране путање алата се врши применом развијеног алгорита за модификацију програмираног линеарног сегмента. Алгоритам је базиран на уведеном правилу половљења сегмента. Ово правило је изведено анализом могућности модификације програмираног линеарног сегмента користећи аналогiju са познатим алгоритмом који се користи код неких 5-осних машина алатки при корекцији грешака које се јављају због линеарне интерполације оса оријентације алата у унутрашњим координатама.

У шестом поглављу је укратко представљена структура развијеног програма за корекцију G-кода у циљу верификације развијеног off-line метода компензације грешака изазваних силама резања на експерименталном роботу. За верификацију развијеног off-line метода за компензацију грешака насталих под дејством сила резања су описана и извршена два експеримента. У овим експериментима су вршене обраде спољашњих контура на тест радним деловима од алуминијума. Тест делови су пројектовани слично тест деловима за тестирање CNC машина алатки с тим што је план експеримента осмишљен тако да омогући релативно једноставан начин мерења компензованог дела грешке услед статичке попустљивости робота. Добијени експериментални резултати показују ефикасност развијене методе компензације грешака. Примена развијеног метода компензације грешака омогућава да се оствари задата тачност обраде која треба да буде у очекиваним границама за роботе, јер на грешке обраде поред попустљивости структуре робота утичу и динамика робота, крутост моторног вретена са алатом, итд.

У закључку (седмо поглавље) је истакнуто да развој оваквог метода off-line компензације грешака обраде изазваних силама резања код робота који се програмирају у G-коду ствара реалне претпоставке за њихову практичну примену. Развијени метод не захтева улагања у софтвер, адаптацију управљачког система и додатне сензоре, а при том омогућава примену постојећих CAD/CAM система за програмирање 5-осних машина алатки базираних на G-коду. Ово значи да је развијени метод off-line компензације директно применљив од стране програмера и оператера који имају искуства у CNC технологији и програмирању у G-коду што га чини једним од кључних резултата ове тезе. На крају овог поглавља је указано и на друге могуће примене развијеног модела статичке попустљивости робота као и на даље правце у развоју off-line и on-line метода компензације грешака изазваних силама резања при обради.

На крају је наведена литература која је коришћена током спроведених истраживања и рада на реализацији докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Ова дисертација је урађена у оквиру истраживања везаних за пројекте из програма технолошког развоја са тематиком која је данас актуелна у свету. Ова истраживања су се односила на вишеосну обраду роботима делова од мекших материјала ниже и средње класе тачности са сложеним естетским и функционалним површинама и покривала су два кључна проблема у овој области. Први се односио на комплексност програмирања робота за обраду, а други на развој алгоритама компензације грешака насталих услед незадовољавајући крутости робота која се директно одражава на тачност обраде. Кључни резултат ових претходних истраживања, у којима је и кандидат учествовао, је био развој система управљања и програмирања у G-коду и представљао је полазну основу за дефинисање истраживања у овој дисертацији. Главне теме истраживања у области компензације грешака насталих услед незадовољавајуће крутости робота која се директно одражава на тачност обраде, које су данас актуелне и у свету, су обухваћене и у овој дисертацији кроз: анализу и развој метода моделирања статичке попустљивости робота, развој метода експерименталне идентификације попустљивости врха робота, развој експериментално аналитичког приступа идентификације резултујућих попустљивости зглобова робота и анализу и развој метода off-line компензације грешака обраде изазваних предикованим силама резања услед статичке попустљивости робота који се програмирају G-кодом. Добијени резултати ових истраживања су оригинални, објављени су у међународним часописима и на међународним конференцијама и цитирани су од истраживача водећих истраживачких центара у свету.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У изради дисертације је коришћена литература чији је списак дат у поглављу 8. Делом су то цитиране референце, а другим делом библиографија радова који су кандидату били доступни за време израде дисертације. Наведени су и примери познатих школа и фирми чији су програми рада помогли кандидату да конципира и развије сопствену методологију off-line компензације грешака изазваних силама резања при обради роботима. Анализом списка коришћене литературе може се закључити да је кандидат располагао већином доступне референтне

литературе и да ју је проучио у току израде дисертације. Дисертација је рађена упоредо са порастом броја објављених радова о примени робота у вишеосној обради, тако да је Кандидат извршио анализу програма истраживања водећих центара у свету, а онда понудио и свој допринос развоју off-line метода компензације грешака. Учешћем у објављивању резултата свог рада, самостално и као коаутор, показао је да је своје истраживање у оквиру израде докторске дисертације добро позиционирао и планирао.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање је засновано на уобичајеним методима који се користе у моделирању, развоју, калибрацији и испитивању робота, методама везаним за анализу процеса вишеосне обраде резањем великим брзинама као и методама програмирања 5-осних машина алатки. Коришћен је и метод за механистички модел израчунавања сила резања а онда и ови методи: метод пројектовања робота и мултифункционалних обрадних система, метод кинематичког моделирања серијских робота, метод статичког моделирања серијских робота, CAD/CAM за пројектовање делова и технологија за њихову израду, методи управљања и програмирања робота и машина алатки, методе калибрације машина алатки, методи пасивне и активне компензације грешака робота и машина алатки, методе испитивања робота и машина алатки. Тако је дисертација у целости урађена коришћењем ресурса информационих технологија које машинству данас стоје на располагању.

3.4. Применљивост остварених резултата

Главни резултати ове дисертације су: метод моделирања статичке попустљивости робота, метод експерименталне идентификације попустљивости врха робота, нови експериментално аналитички приступ идентификације резултујућих попустљивости зглобова робота и нови метод off-line компензације грешака обраде изазваних предикованим силама резања услед статичке попустљивости робота који се програмирају G-кодом који је базиран на развијеном алгоритму модификације програмиране путање алата према уведеном правилу половљења програмираног линеарног сегмента. Сваки од ових резултата је у спрези са осталима тако да су један другом верификација. Сви ови резултати су реализовани и верификовани кроз четири извршена експеримента. Приказани метод моделирања статичке попустљивости робота поред примене за обраду може бити од користи и за примену у другим контактним задацима. С обзиром да развијени приступ моделирања статичке попустљивости робота омогућава анализу утицаја попустљивости сваког зглоба понаособ на попустљивост врха робота, то резултати ових истраживања могу бити од користи и при пројектовању робота у циљу идентификације и побољшања крутости критичних зглобова.

Развијени и експериментално верификовани метод off-line компензације грешака обраде изазваних предикованим статичким силама резања код робота који се програмирају у G-коду ствара реалне претпоставке за њихову практичну примену. Примена развијеног метода off-line компензације грешака при обради роботима, који се програмирају у G-коду, не захтева улагања у софтвер, адаптацију управљачког система и набавку сензора. Ово значи да роботи за обраду могу бити директно применљиви од стране програмера и оператера који имају искуства у CNC технологији и примени постојећих CAD/CAM система за програмирање 5-осних машина алатки.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидату је била пружена прилика да стекне потребна знања и вештине радећи у пројектном тиму Катедре за производно машинство који је био ангажован на реализацији домаћих пројеката из програма Технолошког развоја. Он је ту прилику са успехом искористио. Такође, успешно је искористио и пружену прилику да учествује у објављивању заједничких резултата истраживања и створио навику да сваки резултат свог истраживања објави, о чему сведочи већи број радова у којима је први аутор. Део тих радова је набројан у одељку 4.3 овог Реферата. Кандидат је показао и способност да организује сарадњу са другим истраживачима у реализацији неког истраживања и објављивање резултата те сарадње. Све ово га квалификује за даљи успешан самостални научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Полазне основе за дефинисање садржаја и циљева ове дисертације су били резултати претходних вишегодишњих истраживања у области обраде роботима у којима је учествовао и кандидат. Овде се пре свега мисли на генерализовани приступ кинематичког моделирања и развој система управљања и програмирања робота за обраду у G-коду. Успешно решавање проблема програмирања робота за обраду у G-коду, је снажно мотивисао кандидата да се, са претходним вишегодишњим искуством у области обраде роботима, одлучи на покушај решавања другог важног проблема у овој области, а то је развој алгоритама компензације грешака насталих услед незадовољавајући крутости робота која се директно одражава на тачност обраде.

Остварени научни доприноси настали као резултат истраживања у оквиру предметне докторске дисертације обухватају:

- Нови приступ односно метод моделирања статичке попустљивости робота који за разлику од постојећих метода моделирања статичке попустљивости робота даје увид у утицај резултујуће попустљивости сваког зглоба робота понаособ на статичку попустљивост врха робота.
- Метод експерименталне идентификације попустљивости врха робота мерењем помераја врха робота изазваних статичким силама у плански одређеним тачкама радног простора у сва три правца Декартовог координатног система. За разлику од постојећих метода овај метод поред идентификације директних попустљивости омогућава и идентификацију индиректних попустљивости.
- Нови експериментално аналитички приступ идентификације резултујућих попустљивости зглобова робота као неопходног предуслова за статичко моделирање попустљивости робота.
- Нови метод off-line компензације грешака обраде изазваних предикованим силама резања услед статичке попустљивости робота који се програмирају G-кодом. Метод је базиран на развијеном алгоритму модификације програмиране путање алата према уведеном правилу половљења програмираног линеарног сегмента.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Развијени и експериментално верификовани метод off-line компензације грешака обраде изазваних предикованим статичким силама резања код робота који се програмирају у G-коду ствара реалне претпоставке за њихову практичну примену. Примена развијеног метода off-line компензације грешака при обради роботима, који се програмирају у G-коду, не захтева улагања у софтвер, адаптацију управљачког система и набавку сензора. Ово значи да роботи за обраду могу бити директно применљиви од стране програмера и оператера који имају искуства у CNC технологији и примени постојећих CAD/CAM система за програмирање 5-осних машина алатки. Развој метода off-line компензације грешака обраде изазваних предикованим статичким силама резања, као кључног резултата ове дисертације, је водио кандидата кроз решавање већег броја практичних проблема али и научних изазова. Неке од тих изазова кандидат је више пута само поменуо у овој дисертацији знајући да ове резултате треба стално дограђивати да би се пратили даљи правци у развоју off-line и on-line метода компензације грешака изазваних силама резања при обради роботима.

4.3. Верификација научних доприноса

Докторанд Никола Славковић је кроз усавршавање и рад на више научних и стручних пројеката био аутор и коаутор 30 радова на домаћим и међународним скуповима и часописима. Коаутор је четири Техничка решења и већег броја инсталација намењених унапређењу наставе и актуелним истраживањима.

Научни допринос докторске дисертације је верификован у следећим радовима објављеним у референтним међународним и домаћим научним часописима и на престижним конференцијама у земљи и иностранству:

M21 Научни рад у врхунском међународном часопису

- [1] Slavkovic, N., Milutinovic, D., Glavonjic, M., **A method for off-line compensation of cutting force-induced errors in robotic machining by tool path modification**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 70, Numbers 9-12, pp. 2083–2096, 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5421-z. (IF=1.779)(ISSN 0268-3768)

M22 Научни рад у истакнутом међународном часопису

- [1] Milutinovic, D., Glavonjic, M., Slavkovic, N., Dimic, Z., Zivanovic, S., Kokotovic, B., Tanovic, Lj., **Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 53, Numbers 9-12, pp. 1217-1229, 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2888-8. (IF=1.103) (ISSN 0268-3768)

M24 Рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком

- [1] Slavkovic, N., Milutinovic, D., Kokotovic, B., Glavonjic, M., Zivanovic, S., Ehmann, K., **Cartesian Compliance Identification and Analysis of an Articulated Machining Robot**, FME Transactions, Vol.41, No.2, 2013, pp 83-95. (ISSN 1451-2092)

M52 Рад у часопису националног значаја

- [1] Slavkovic N., Zivanovic S., Milutinovic D., Glavonjic M., **Compliance Analysis of an Articulated Machining Robot**, Strojarstvo: Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering, Vol.54, No.3, pp 229-235, 2012. (ISSN 0562-1887)

M33 Радови саопштени на скуповима међународног значаја, штампани у целини

- [1] Milutinovic, D., Slavkovic, N., Zivanovic, S., Glavonjic, M., **Low-cost control and programming system for five-axis machining by articulated robots with 5 and 6 DOF**, 5th International Conference on Manufacturing Engineering, Proceedings, ISBN 978-960-98780-9-8, pp. 133-142, Mechanical Engineering Department, School of Engineering, Aristoteles University Thessaloniki, 1.-3. October, 2014.
- [2] Zivanovic, S., Dimic Z., Slavkovic, N., Milutinovic, D., Glavonjic M., **Configuring of virtual robot for machining and application in off-line programming and education**, 1th International Scientific Conference, COMETA 2012, Proceedings, ISBN 978-99938-655-5-1, pp. 125-132, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, B&H, Republic of Srpska, 28.-30. November, 2012.
- [3] Milutinovic, D., Glavonjic, M., Slavkovic, N., Zivanovic, S., Kokotovic, B., Dimic, Z., **Compliance analysis of 5-axis vertical articulated machining robot**, 4th International Conference on Manufacturing Engineering, Proceedings, ISBN 978-960-98780-4-3, pp. 411-422, Mechanical Engineering Department, School of Engineering, Aristoteles University Thessaloniki, 3.-5. October, 2011.
- [4] Milutinovic, D., Glavonjic, M., Slavkovic, N., Dimic, Z., Zivanovic, S., Kokotovic, B., **Machining robot with low-cost control and programming system**, 4th International Conference on Manufacturing Engineering, Proceedings, ISBN 978-960-98780-4-3, pp. 387-396, Mechanical Engineering Department, School of Engineering, Aristoteles University Thessaloniki, 3.-5. October, 2011.
- [5] Milutinovic, D., Glavonjic, M., Slavkovic, N., Kokotovic, B., Milutinovic, M., Zivanovic, S., Dimic, Z., **Machining robot controlled and programmed as a machine tool**, 10th Anniversary international conference on accomplishments in electrical and mechanical engineering and information technology DEMI 2011, Proceedings, pp. 863-872, Faculty of Mechanical Engineering, Banjaluka, 26.-28. May, 2011.
- [6] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Slavković, N., **Rekonfigurabilni obradni sistemi na bazi petoosnog robota**, 9. Međunarodna konferencija o dostignućima elektrotehnike, mašinstva informatike DEMI 2009, Zbornik radova, str.273-280, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, Banja Luka, 28.-29.maja, 2009.

M61 Рад по позиву саопштен на скупу националног значаја штампан у целини

- [1] Tanović, Lj., Bojanić, P., Glavonjić, M., Milutinović, D., Majstorović, V., Puzović, R., Kokotović, B., Popović, M., Živanović, S., Slavković, N., Mladenović, G., Stojadinović, S., **Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema rezultati istraživanja za 2011. godinu**, 38. JUPITER konferencija, Uvodni radovi, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-757-7 , str. UR.76-UR.95, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2012.
- [2] Milutinović, D., Glavonjić, M., Tanović, Lj., Bojanić, P., Puzović, R., Živanović, S., Kokotović, B., Popović, M., Slavković, N., Mladenović, G., **Rezultati istraživanja i razvoja nove generacije obradnih sistema**, 37. JUPITER konferencija, Uvodni radovi, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-724-9, str. UR.51-UR.64, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2011.

M63 Радови саопштени на скуповима националног значаја, штампани у целини

- [1] Milutinović, D., Dimić, Z., Živanović, S., Slavković, N., **Upravljanje i programiranje 6-osnog robota za obradu kao horizontalne i/ili vertikalne 5-osne mašine alatke**, 39. JUPITER konferencija, 35. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-838-3 , str. 3.96-3.103, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [2] Kokotović, B., Slavković, N., **Verifikacije procedure predikovanja sila pri obradi cilindričnim vretenastim glodalima**, 39. JUPITER konferencija, 35. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-838-3 , str. 3.67-3.74, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [3] Milutinovic, D., Glavonjic, M., Slavkovic, N., Zivanovic, S., Kokotovic, B., Dimic, Z., **Compliance modeling and identification of 5-axis vertical articulated robot for machining applications**, 34th International Conference on Production Engineering, Proceedings, ISBN 978-86-6055-019-6, pp. 381-384, Faculty of Mechanical Engineering, Department for Production, IT and Management, Nis, 28.-30. September, 2011.
- [4] Milutinović, D., Glavonjić, M., Slavković, N., Dimić, Z., Živanović, S., Kokotović, B., Tanović, Lj., **Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota za višeosnu obradu**, 36. JUPITER konferencija, 32. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-696-9, str. 3.11-3.21, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2010.
- [5] Tanović, Lj., Bojanić, P., Milutinović, D., Glavonjić, M., Puzović, R., Kokotović, B., Živanović, S., Popović, M., Slavković, N., Mladenović, G., **Razvoj tehnologija višeosne obrade složenih alata za potrebe domaće industrije – Rekapitulacija rezultata na projektu MA14034**, 35. JUPITER konferencija, 31. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-666-2, str.3.39-3.52, Mašinski fakultet, Beograd, jun 2009.
- [6] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., Slavković, N., **Razvoj rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota**, XXXIII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova ISBN 978-86-7083-662-4, str. 151-155, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Beograd, 2009.

M81 Техничко решење

- [1] Milutinović Dragan, Glavonjić Miloš, Slavković Nikola, Dimić Zoran, Kokotović Branko, Živanović Saša, **Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota za višeosnu obradu delova većih gabarita sa složenim estetskim i funkcionalnim površinama od mekših materijala srednje i niže klase tačnosti**, Mašinski fakultet, Beograd, april 2010.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под називом „ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ“ кандидата Николе Славковића, дипл. инж. маш., представља оригиналан научно-истраживачки рад високог ранга у области производног машинства у коме је аутор дао значајан допринос развоју метода моделирања статичке попустљивости робота за обраду, као и решавању низа важних теоријских и практичних проблема везаних за развој метода off-line компензације грешака изазваних предикованим статичким силама резања при вишеосној обради роботима. Комисија такође сматра да је кандидат кроз дисертацију показао висок ниво стручног и теоријског знања које ће му омогућити успешан будући самостални научно-истраживачки рад.

На основу прегледа и оцене докторске дисертације кандидата

Николе Славковића, дипл.инж.маш.

са темом

**Идентификација, моделирање и компензација грешака услед статичке попустљивости
робота за обраду,**

Комисија за оцену и одбрану закључује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима и позитивној пракси у научно-истраживачком раду, као и то да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и да је у складу са Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета у Београду.

Сходно члану 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета у Београду Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај 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.

С поштовањем,

Чланови Комисије:

У Београду, 21.04.2015. године

Др Драган Милутиновић, редовни професор, ментор
Универзитет у Београду - Машински факултет

Др Љубодраг Тановић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

Др Радован Пузовић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

Др Милош Главоњић, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду - Машински факултет

Др Бранислав Боровац, редовни професор
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:361/5
Датум: 30.04.2015. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 63. Статута Машинског факултета Универзитета у Београду број 1876/1 од 04.10.2013. године и члана 37. Правилника о докторским студијама, Наставно-научно веће на седници одржаној 30.04.2015. године, донело је

ОДЛУКУ

I Прихвата се извештај о позитивној оцени урађене докторске дисертације коју је поднео **НИКОЛА СЛАВКОВИЋ**, дипл.инж.маш. и одобрава јавна одбрана дисертације по добијању сагласности од Универзитета, под насловом: „**ИДЕНТИФИКАЦИЈА, МОДЕЛИРАЊЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА ГРЕШАКА УСЛЕД СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ**“

II Универзитет је дана 27.02.2012. године, својим актом број 06-17338/11-12 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата.

III Радови кандидата у часопису међународног значаја:

- Slavkovic, N., Milutinovic, D., Glavonjic, M., **A method for off-line compensation of cutting force-induced errors in robotic machining by tool path modification**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 70, [Numbers 9-12](#), pp. 2083–2096, 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5421-z. (IF=1.779)(ISSN 0268-3768)
- Milutinovic, D., Glavonjic, M., Slavkovic, N., Dimic, Z., Zivanovic, S., Kokotovic, B., Tanovic, Lj., **Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 53, [Numbers 9-12](#), pp. 1217-1229, 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2888-8. (IF=1.103) (ISSN 0268-3768)

Одлуку доставити: кандидату, ментору, Катедри за производно машинство и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић